6. ULUSAL
SU MÜHENDİSLİĞİ SEMPOZYUMU

BİLDİRİLER KİTABI

19 - 23 EKİM 2026

İZNİK - BURSA

BİLİM KURULU

Prof. Dr. Adem AKPINAR
Prof. Dr. Ali GÜL
Prof. Dr. Alper BABA
Prof. Dr. Asu İNAN
Prof. Dr. Ayşegül AKSOY
Prof. Dr. Ayşegül ÖZGENÇ AKSOY
Prof. Dr. Berna AYAT AYDOĞAN
Prof. Dr. Birol KAYA
Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN
Prof. Dr. Deniz DÖLGEN
Prof. Dr. Ebru ERİŞ
Prof. Dr. Egemen ARAS
Prof. Dr. Emine ÇOKGÖR
Prof. Dr. Gökçen BOMBAR
Prof. Dr. Gökmen TAYFUR
Prof. Dr. Hale ÖZGÜN
Prof. Dr. Halit APAYDIN
Prof. Dr. Havva Eylem POLAT
Prof. Dr. İsmail TAŞ
Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN
Prof. Dr. Mehmet Şükrü GÜNEY
Prof. Dr. Meriç ALBAY
Prof. Dr. Murat KANKAL
Prof. Dr. Mustafa Tuğrul YILMAZ
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU
Prof. Dr. Orhan GÜNDÜZ
Prof. Dr. Ömer Levend AŞIKOĞLU
Prof. Dr. Ömer YÜKSEK
Prof. Dr. Ramazan Meral
Prof. Dr. Serdar KORKMAZ
Prof. Dr. Sezar GÜLBAZ
Prof. Dr. Şebnem ELÇİ
Prof. Dr. Şerife Tülin AKKAYA ASLAN
Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU
Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR
Prof. Dr. Tolga ERDEM
Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA
Prof. Dr. Zafer BOZKUŞ

Prof. Dr. Lütfü AKÇA (Çağrılı Konuşmacı)
Prof. Dr. İbrahim GÜRER (Çağrılı Konuşmacı)
Prof. Dr. Mehmet Şükrü GÜNEY (Çağrılı Konuşmacı)

ORGANİZASYON VE DÜZENLEME KURULU

Dr. Bülent Çağlar ÖZCAN
Yasemin ELDAYIH KANBER
Gülcan AYATA
Zafer Nuh DEMİREL
Dr. Ayşe ÖZER
Gökhan GÜLHAN
Ulaş ANIL

ÖNSÖZ

Su; yaşamın, tarımın, sanayinin, enerjinin ve şehirlerimizin sürdürülebilir gelişiminin temelidir. Ancak günümüzde suyu yalnızca geliştirilmesi gereken bir doğal kaynak olarak değil; gıda güvenliğini, ekonomik kalkınmayı, çevresel dengeyi ve toplumsal refahı doğrudan etkileyen stratejik bir değer olarak ele almak zorundayız.

İklim değişikliğinin etkileri, yağış rejimlerindeki düzensizlikler, uzun süreli kuraklıklar ve kısa sürede yoğunlaşan yağışların yol açtığı taşkınlar, su yönetiminde daha bütünleşik ve öngörülü yaklaşımları zorunlu kılmaktadır. Bir yandan su arzının güvence altına alınması, diğer yandan taşkın risklerinin azaltılması; bilimsel veriye, güçlü gözlem ağlarına, doğru planlamaya ve zamanında karar almaya dayalı bir mühendislik anlayışı gerektirmektedir.

Ülkemizin su kaynaklarını korumak ve gelecek nesillere güvenle aktarabilmek için suyun havza ölçeğinde yönetilmesi, sektörler arası dengeli tahsis edilmesi, kayıpların azaltılması ve su verimliliğinin artırılması büyük önem taşımaktadır. Türkiye Ulusal Su Planı'nın 2026–2035 dönemine yönelik ortaya koyduğu stratejik çerçeve de su güvenliğini, iklim değişikliğine uyumu ve kaynakların sürdürülebilir kullanımını önümüzdeki dönemin temel öncelikleri arasında konumlandırmaktadır.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğümüz; barajlardan sulama tesislerine, içme suyu temininden taşkın kontrolüne kadar geniş bir yelpazede sahip olduğu köklü mühendislik birikimi ve saha tecrübesiyle ülkemizin su altyapısının geliştirilmesinde kritik bir görev üstlenmektedir. Bu birikimi yeni teknolojilerle güçlendirmek, bilimsel araştırmalarla beslemek ve değişen risklere karşı daha dirençli yapılar ve sistemler geliştirmek ortak sorumluluğumuzdur.

Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı olarak araştırma, deney, modelleme, teknik inceleme ve kalite kontrol faaliyetlerimizi; DSİ yatırımlarının güvenli, kaliteli, ekonomik ve uzun ömürlü olmasını destekleyen temel bir teknik altyapı olarak görüyoruz. Tasarım aşamasından yapım sürecine, işletmeden bakım ve izlemeye kadar her aşamada güvenilir verinin ve bağımsız teknik değerlendirmenin önemine inanıyoruz. Sahada karşılaşılan sorunların araştırma gündemine taşınmasını, araştırma çıktılarının ise doğrudan uygulamaya aktarılmasını hassasiyetle gözetiyoruz.

Bu anlayışla hazırlanan bu yayının/çalışmanın, su mühendisliği alanındaki uygulamalara ve araştırmacılara faydalı olmasını temenni eder; çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçen tüm çalışma arkadaşlarıma ve katkı sunan paydaşlarımıza teşekkür ederim.

Aydın SAĞLIK
TAKK Daire Başkanı

İÇİNDEKİLER

Taşkın Tünellerinin Gelişimi ve Ülkemizde Uygulanabilirliği 1

Ergani Barajının Farklı Yıkılma Senaryolarında Barajın Mansabında Oluşacak Taşkın Tehlike Haritalarının DEFRA Yöntemi ile Belirlenmesi 8

HECRAS 2B Modeli ile Taşkın Riski Analizi ve Taşkın Koruma Önlemlerinin Karşılaştırılması: İzmir Çamlı Deresi Havzası Örneği 16

Malatya İçme Suyu Kaynağına Ait Taşkın Risklerinin Araştırılması 23

Konya İli İçme Suyu Şebeklerinde Kayıp ve Kaçak Azaltma Çalışmaları 27

Su Şebekeleri Basınç Yönetiminde Alternatif Bir Yöntem: Turbo Pompalama Sistemi 34

İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde DMA Uygulama İşlerinin Seçim ve Sıralaması: Vaka Temelli Uzman Değerlendirmesine Dayalı Bir Karar Destek Modeli 44

Ayazağa İçme Suyu Şebekesinin Hidrolik Modellenmesi ve SCADA Verisiyle Kalibrasyonu 49

Pompajlı İletim Hatlarında Kolon Ayrılmasına Karşı Koruma Yapılarının Karşılaştırmalı İncelenmesi 56

Su Dağıtım Sistemlerinin Hidrolik Modellemesi: Kağıthane–Nurtepe Mahallesi İçme Suyu Şebekesi Uygulaması 60

Su Dağıtım Sistemlerinin Hidrolik Modellenmesi ve Kalibrasyonu: Paşaköy DMA 64

Geleneksel Pik Katsayılarının Yüksek Frekanslı SCADA Verileriyle Karşılaştırılması: Rize Su Dağıtım Şebekesi Örneği 71

Kuraklık İndislerinin Karşılaştırılmasında Korelasyon ve Uyum Ölçütlerinin Farklı Zaman Ölçeklerinde Değerlendirilmesi: Bergama İstasyonu Örneği 77

İklim Değişikliğinin Akım Rejimine Etkilerinin Olasılıksal Değerlendirilmesi: İznik Gölü Havzası Örneği 83

İkim Değişikliğinin İç Anadolu Bölgesi'nde Evapotranspirasyon, Kuraklık ve Su Bütçesi Dinamikleri Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi 90

İklim Değişikliğinden Kaynaklanan Risklerin Meteorolojik ve Tarımsal Kuraklık Açısından İncelenmesi: Karacabey Örneği 94

Ayırma Duvarlı Simetrik Akarsu Kavşağında Taban Morfolojisinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma 100

Eğlence 1 HES Projesinin Kuru Dere Yataklarında Oluşan Ani Taşkınların Taban Sediment Hareketi Üzerindeki Etkisi 106

Akarsularda Odunsu Materyal Akışı, Tuzaklama Yöntemleri Ve Yenilikçi Bir Yaklaşım 111

Anroşman Tabanlı Kanallarda Çözünmüş Oksijen Artırımının Deneysel Olarak İncelenmesi 117

Design of Small Dams Kitaplarındaki Radyal-Kapaklı Savak Debisi Hesapları için Bilgisayar Programları 123

Jeoteknik Parametrelerin Su Yapıları Tasarımlarına Etkisi: DSİ Projelerinden Uygulama Örnekleri 135

Atık Barajlarının Tasarımında Yükseltim Yöntemleri ve Atık Malzeme Özelliklerinde Göz Önünde Bulundurulması Gereken Bazı Hususlar 139

Sucul Ortamlarda Mikroplastik–Radyonüklit Etkileşimleri ve Radyonüklit Taşınımındaki Rolü 143

Koruyucu Toprak İşleme ve Doğrudan Ekimin Silajlık Mısırda 149

Sulama Şebekelerinde Deterministik Yöntemlerle BKV Konumlandırma ve Tam Maliyet Optimizasyonu 154

Kuraklık Koşullarında Borulu (Basınçlı) ve Açık Kanallı Sulama Şebekelerinin İşletme Performansının Karşılaştırılması: Büyük Menderes Havzası Örneği 161

Yağmursuyu Hasadının Kentsel Taşkın Debisine Etkisinin SWMM ile İncelenmesi: İTÜ Ayazağa Kampüsü Örneği 166

Türkiye'de Uydu Tabanlı Yağış Aşındırıcılığı Tahmin Doğruluğunun Günlük Modellerle İyileştirilmesi 171
Yağış-Akifer Beslenim İlişkisine Bağlı Süzülme Katsayısı Hesabı: Uluova (Elazığ) Havzası Örneği 177
Türkiye'de Ekstrem Yağışların Zamansal Dinamikleri 185
Ömerli Havzası Yağış-Akış Modelinin HEC-HMS Programı ile Geliştirilmesi ve Kalibrasyonu..... 191
Su Yapılarında Doğal Yapı Gereçlerinin Projeye Etkileri 196
Musabeyli Barajı Batardolarında Meydana Gelen Hasarların Hidrolojik ve Hidrolik Açıdan Değerlendirilmesi 199
Darlık Barajı Yıkılma Taşkınının HEC-RAS ile Modellenmesi ve Mansapta Taşkın Risklerinin Değerlendirilmesi 206
Açık Kanal Akımlarında Tesla Vanası Yardımıyla Akım Enerjisinin Sönümlenme Performansının Bir Değerlendirilmesi 212
Dolusavak Plakaları Arasındaki Derz Boşluklarında Akım ve Türbülans Özelliklerinin İncelenmesi 217
Hacıosman Deresi (Havza) Su Toplanma Alanında Taşkın Riskinin CBS Tabanlı Morfometrik Analizi 222
Baraj Hidrolik Yapılarının Tasarımında HAD Analizlerinin Katkıları ve DSİ Pratiğinde Sağladığı Esneklikler 231
Sinop Kıyılarında İklim Değişikliğinin Modellenmesi 236
Ogee Savaklarda Kullanılan Farklı Baffle Blok Geometrilerinin Hidrolik Performansının HAD ile Değerlendirilmesi 243
Düşüm Havuzlarında Hidrolik Sıçrama Performansının OpenFOAM ile İncelenmesi 249
Nehir Hidrokinetik Enerjisi Uygulamalarında Düşey Eksenli Türbin Seçimine Yönelik Deneysel Bir Karşılaştırma 255
Göllerin Trofik Durum Olasılıklarının Hesaplanması Amaçlı Bir Yazılımın Geliştirilmesi..... 260
İznik Gölünde Klorofil-a'nın Uzaktan Algılama ile izlenmesi..... 264
Dijital İkiz Yaklaşımı ile Bulut Tabanlı ve Çok Kaynaklı Uzaktan Algılama Verileri Destekli Mevsimsel Havza Yönetim Çerçevesi 270
İznik Gölü Su Mevcudiyetinin Budyko Eğrisi ile Değerlendirilmesi ve Geleceğe Yönelik Tahmini 278
Uzaktan Algılanmış SWOT-Dinamik Dünya Verileriyle İzmir İçme Suyu Rezervuarlarının Yükseklik–Alan Dinamiklerinin Analizi..... 283
Atıksu Arıtma Tesislerinde Havalandırma Havuzlarının Hidrodinamik Analizi ve Arıtma Performansının İyileştirilmesi: Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi Örneği 287
Evsel Atıksu Arıtımında Yenilikçi Teknolojiler: Sürdürülebilir ve Enerji Verimli Arıtma Yaklaşımları 291
Acı Su Kaynağının Ters Osmoz Teknolojisi ile İçme Suyu Kalitesine Dönüştürülmesi: Milas Ekinanbarı Kaynağı Örneği..... 294
Gediz Nehir Havzasında Arıtılmış Atıksuyun Yeniden Kullanım Alternatiflerinin Önceliklendirilmesi 298
Türkiye Hidrojeolojisinin Değerlendirilmesi Kapsamında Havza Bazlı Hidrojeolojik Etütler: Turkuaz Rapor Serisi..... 303
Batı Akdeniz Havzasında Hidrostratigrafik Karakterizasyon ve Yeraltısuyu Alt Havza Sınırlarının Belirlenmesi 307
Bahçeyaka-Bayır Bölgesindeki (Muğla, Türkiye) İçme Suyu Kuyuları ve Kaynakları İçin Yeraltısuyu Koruma Alanlarının Belirlenmesi Projesi..... 321
Konya Kapalı Havzası'nda Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Bitki Su Tüketimi Esas Alınarak Yeraltısuyu Fiili Çekimlerinin ve Çekim Lokasyonlarının Belirlenmesi 327
Türkiye'de Yeraltısuyu Aramaları: Hidrojeofiziksel DES Verilerinin Ters Çözümü ve Yorumlanması İçin Yazılım Geliştirilmesi 335

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrasında Enkaz Döküm Alanlarındaki Asbest ve İnorganik Kirleticilerin Yeraltısuyu Kimyası Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması 339

Konya Acıgöl Krater Gölünün Kıyı Kenar Çizgisinin Belirlenmesine Hidrojeolojik Yaklaşım..... 347

Bartın Yeraltısuyu Alt Havzası'nda Yeraltısuyu Bilançosunun Belirlenmesi: Farklı Yöntemlerin Karşılaştırmalı Analizi 352

Yeraltısuyu Sistemi Bütçelerinin Değerlendirilmesi: Kızılırmak Havzası Örneği 357

Trabzon Yeraltısuyu Alt Havzası'nda Yeraltısuyu Kalitesinin ve Kirlilik Baskılarının Hidrojeolojik Kavramsal Model İle Değerlendirilmesi 363

Yeraltı Suyu Çekim Kararlarında Belirsizlik Tabanlı 3B Sayısal Modelleme: Kavramsal Nokta Tabanlı Sentetik Bir Akifer Uygulaması 371

Hidrolojik Çalışmaların Güncellenmesi Gerekliliği..... 378

Samsun, Türkiye'de Ekstrem Yağış Analizi İçin GPM-IMERG ve CHIRPS Uydu Yağış Ürünlerinin Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi..... 384

Yeşilırmak Havzasında Akım Rejimlerinin Çoklu Hidrolojik Göstergelerle Değerlendirilmesi 389

Sulama Suyu Kalitesi İndeksleri 394

Bölgesel Ölçüm Alanlarında Seyrek Debi Verisinin Sıkıştırılmış Algılama ile Yeniden Yapılandırılması ve Etkileri 398

Samsun Terme Ovasında Kentsel Taşkın Risk Değerlendirmesi ve Yapı Ölçeğinde Doğrudan Hasar Tahmini 404

Küçük Menderes Havzası Su Ortamlarında Per- ve Poliflorlu Alkil Maddelerin (PFAS) Değerlendirilmesi 410

Spor Tesislerinde Kuraklığa Dirençli Su Yönetimi: Alternatif Su Kaynaklarının SWMM ile Değerlendirilmesi 416

Taşkın Tünellerinin Gelişimi ve Ülkemizde Uygulanabilirliği

Sema GÜR
DSİ 1. Bölge Müdürlüğü, Ankara Cad. No:221 BURSA, 0009-0000-6203-8563
semagur@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: taşkın tüneli, iklim değişikliği, TARP, SMART Tünel, MAODC.

1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, taşkın tünellerinin tarihsel gelişimini incelemek, dünyadaki başarılı uygulamaları değerlendirmek ve bu uygulamalardan elde edilen deneyimler ışığında Türkiye'de taşkın tünellerinin büyükşehirlerde uygulanabilirliğini tartışmaktır.

2. Giriş

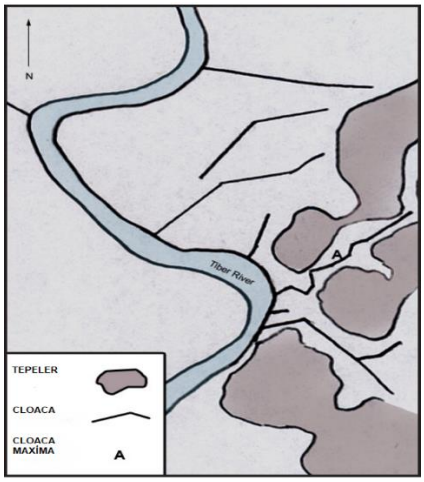
Kentleşme, tarım ve orman alanlarının azalması, toprak yüzeylerin yerini beton ve asfalt yüzeylerin alması, zeminin infiltrasyon kapasitesini neredeyse tamamen ortadan kaldırabilmektedir. İnfiltrasyon kapasitesi azaldığında ise aşırı yağışlarda tüm yağış akışa geçmektedir. Taşkın genellikle, nehir, göl, veya okyanus gibi su kütlelerinde meydana gelen taşmanın bir sonucu olarak veya yüzeyin suya doygun olması nedeniyle yeraltına sızamayan yağmur suyunun doğrudan akışa geçmesiyle ortaya çıkmaktadır. Taşkınlar en tehlikeli doğal afetlerdir ve büyük can ve mal kayıplarına neden olmaktadırlar [1]. Ayrıca iklim değişikliklerinin de etkisiyle bu doğal afetin yoğunluğu ve sayısındaki artış tüm dünyadaki ülkeleri etkilemektedir [2]. Çağımızın iki önemli sorunu, hızlı kentleşme ve iklim değişikliği, tehlike arz eden bir şekilde bütünleşmiş ve bütün bir yerkürenin geleceğini tehdit eder bir hal almıştır [3].

Tüneller yer altında teşkil edilen biri giriş diğeri çıkış ağzı olmak üzere iki ucu bulunan, insanları veya araçları daha kısa süreli olarak bir yerden bir yere ulaştıran geçitlerdir [4]. Zamanla teknolojide meydana gelen ilerlemeler sonucunda, farklı ulaşım noktalarını, demiryolu hatlarını birbirine bağlayan ve suyu derive eden kanalları oluşturan yapılar haline gelmişlerdir. Tarihte tüneller antik dönemde Romalılar tarafından su iletimi ve derivasyon amaçlı kullanılmışlardır [5].

3. Taşkın Tünellerinin Gelişimi

3.1 Cloaca Maxima Tüneli

Şekil 1. De genel vaziyet planı görülen Cloaca Maxima, Antik Roma'da inşa edilen, kelime anlamı "En Büyük Lağım" olan dünyanın en eski ve en gelişmiş kanalizasyon sistemlerinden biridir.



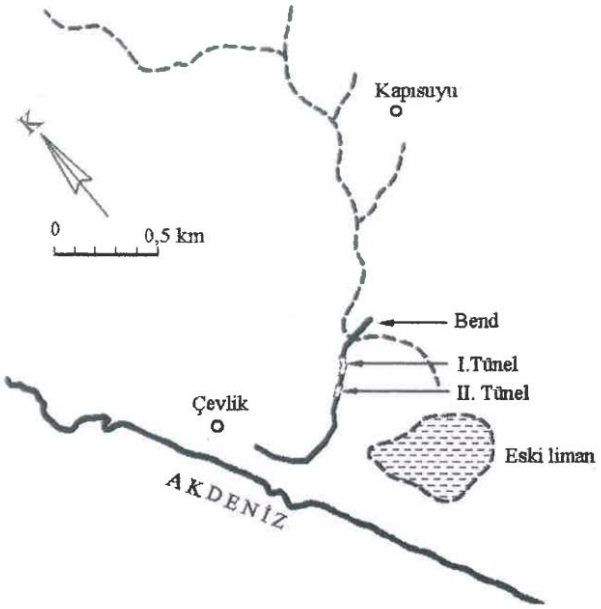
Şekil 1. Cloaca Maxima Tüneli [6]

Başlangıçta bataklıkları kurutmak ve yağmur sularını Tiber Nehri'ne taşımak için açık bir dere yatağı olarak kurulmuş, daha sonra üstü kapatılarak saraylara, hamamlara ve tuvaletlere bağlanmıştır. Yapımına M.Ö. 6. Yüzyılda Roma Kralı Lucius Tarquinius Priscus döneminde başlanmıştır. İlk başta açık

bir kanal olan yapının üzeri M.Ö 3. Yüzyıldan itibaren taş tonozlarla kapatılmıştır. İçinden bir teknenin geçebileceği kadar büyük ve sağlam şekilde inşa edilmiştir. Cloa Maxima Roma Forumu ve çevresindeki vadilerde yer alan bataklıkları kurutmuş, şehirdeki atıksuları ve yağmur sularını toplayıp Tiber Nehrine akıtmıştır. Günümüzde bile Roma şehir merkezindeki bazı eski bölümlerin yağmur suyunu tahliye etmek için hâlâ kullanılmaktadır [7].

3.2 Vespasianus-Titus (Çevlik) Tüneli

Antakyanın 35 km batısında, Samandağ ilçesinin Çevlik Köyü yakınındaki antik "Seleucia di Pieria" kenti ve limanının, derenin taşkınlarına maruz kalması ve taşkınlarda derenin getirdiği rüsubatla limanın dolmasını önlemek üzere, Şekil.2 de görüldüğü üzere, dere bir bentle kabartılarak, iki tünel kesimini de içeren uzun bir mecra ile çevrilmiştir. Kenti ve limanı taşkından korumak için kentin içinden geçen derenin güzergahı değiştirilmiştir. Tesisler M.S. 69-81 yılları arasında inşaatına devam edilmiş olan M.S. 2. Yüzyılda tamamlanan, toplam 120 m uzunluğunda ve 5-7 m mertebesinde boyutları olan iki tünel kesimini de kapsayan, 70 m^3/s kapasiteli ve toplam 875 m uzunluğundaki akarsu çevirme sistemi türünün antik dünyadaki en önemli örneğidir [8].



Şekil 2. Vespasianus-Titus (Çevlik) çevirme kanalı ve tünellerinin genel yerleşim planı [8]

3.3 Chicago Derin Tüneli-TARP (Tunnel And Reservoir Plan)

Chicago, Michigan Gölü kenarında gelişen bir şehirdir ve aynı zamanda da Michigan Gölü'ne dökülen Chicago Nehri'nin yağış havzasında yer almaktadır. Onlarca yıl şehrin bütün atıkları Chicago Nehrine akıtılmıştır. Böylelikle göl dolayısıyla da şehrin içme suyu kaynağı kirletilmiştir. 1885 yılında yaşanan büyük salgında 90.000 kişi hayatını kaybetmiştir. Salgından sonra kısıtlı bütçe imkanları çerçevesinde ve günün teknolojik koşullarının izin verdiği ölçüde kademeli olarak 2 millik derivasyon tüneli, sonrasında da biri 45 mil uzunluğunda olmak üzere 2 adet kanal, pompa istasyonu ve baraj inşa edildi. Ancak günde 2 inç veya daha fazla yağmur yağdığı zaman nehir-kanal sisteminde oluşan hacmin üstesinden gelemediği deneyimlenmiştir [10].

1970li yıllarda bir grup mühendis taşkın ve su kirliliği problemini çözmek için çeşitli plan önerilerini masaya yatırdılar. Alternatif projeler arasından TARP isimli hibrit plan en iyi ve en ekonomik plan olarak seçildi. Şekil 3.te bir bölümü görülmekte olan rezervuar tünel sistemi, sağanak yağışları Chicago'da yer altında depolamayı amaçlıyordu. Böylelikle sular pompalanıp, işlemden geçirilip sonrasında da kanal nehir sistemine bırakılabilecekti. Sistemde ayrıca su arıtma tesisleri ve ayrık kanalizasyon sistemi yapılması da amaçlanmıştı. TARP olarak adlandırılan plan, 35 feet çapında, dere yatağının 150-300 feet aşağısında ve 131 mil uzunluğunda tünellere ilaveten 3 adet büyük yüzey rezervuarı yapılması da planlanmıştır [10].



Şekil 3. İnşa halindeki Faz II McCook Rezervuarının havadan görünüşü [9]

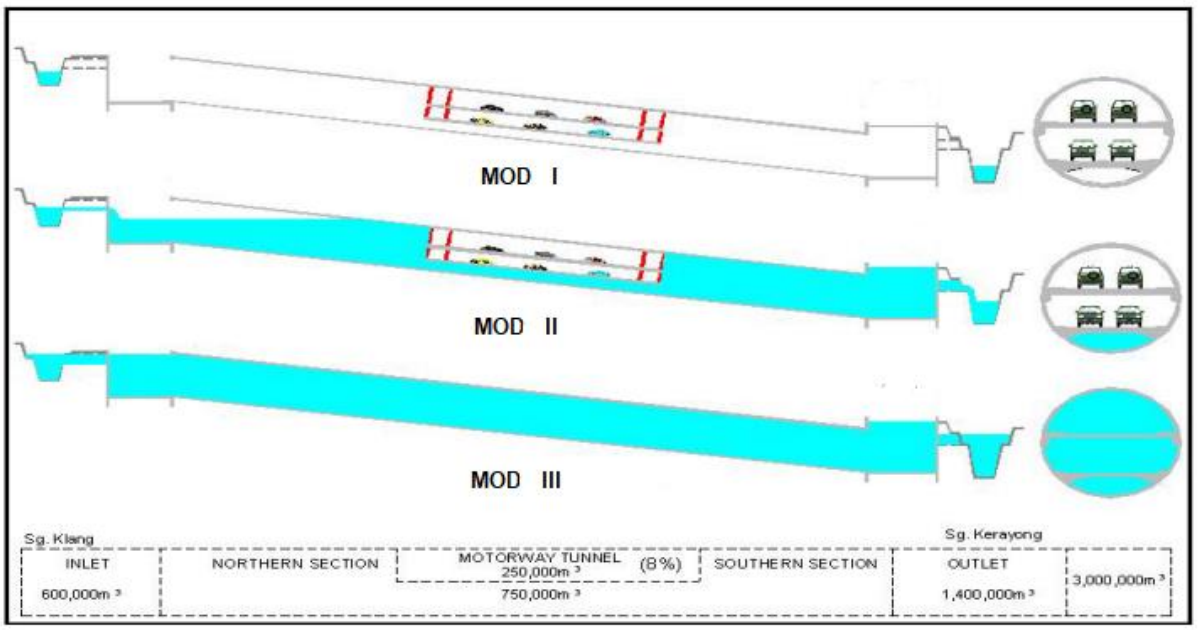
3.4 SMART (Stormwater Management And Road Tunnel) Tünel

Kuala Lumpur her yıl muson yağmurları mevsiminde aşırı yağış alan bir şehirdir [11]. Bu tünel Malezya Kuala Lumpur'da hem Kuala Lumpur şehrinin trafiğini rahatlatmayı sağlayan hem de taşkın problemini hafifletmek için tasarlanan yeni ve sıra dışı bir mühendislik projesidir. Bu projeyi eşsiz kılan özellik; tünelin merkezinde yağmursuyu tünelinin içinde 3 km uzunluğunda çift katlı karayolunun bulunmasıdır. Yağmursuyu tünelinin uzunluğu 9,7 km çapı ise 13.2 m dir [12]. Tünel enkesiti Şekil 4.te görülmektedir.



Şekil 4. SMART Tünelin en kesit görüntüsü [13]

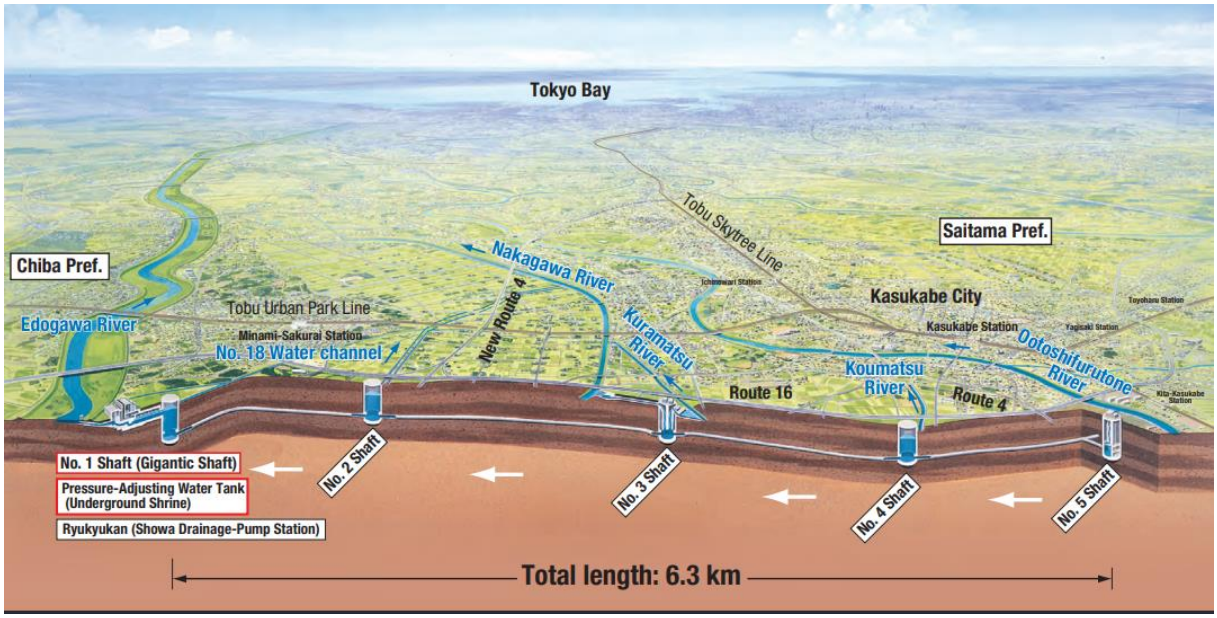
Tünel, Şekil 5 te görüldüğü üzere Mod I, Mod II ve Mod III olmak üzere üç şekilde çalışmaktadır. Mod I normal durumdur ve yağmurun düşük miktarda yağdığı ve fırtına vb. bir durumun olmadığı, karayolunun trafiğe açık olduğu durumdur. Sisteme yağmursuyu veya taşkın yönlendirilmemektedir. Mod II de hafif veya orta şiddetli fırtınanın söz konusu olduğu durumdur. SMART sistem faaliyete geçer ve taşkın bypass ile karayolunun altındaki kanala yönlendirilir. Üst kanal ise hala sürücülerin kullanımına açık tutulur. Mod III Tünel trafiğe kapatılır. Öncelikle bütün araçlar tahliye edilir ve otomatik su geçirmez kapılar açılarak taşkının tünelin tamamından geçmesi sağlanır [5], [13]. Taşkın sona erdiğinde tünel kontrol edilir ve basınçlı yıkama sistemleriyle temizlendikten sonra yaklaşık 48 saat içinde karayolu trafiğine tekrar açılır [1].



Şekil 5. SMART Tünelin çalışma modları [13]

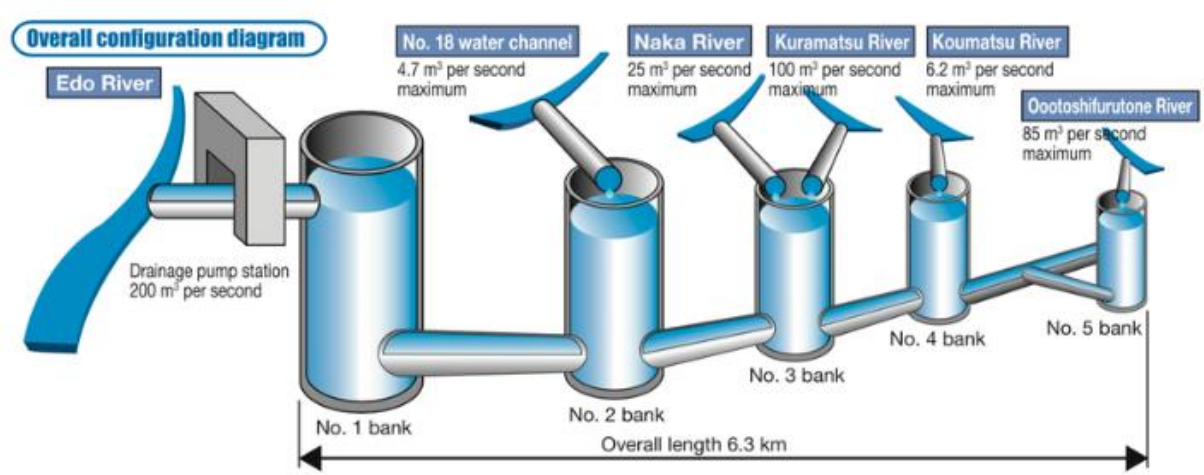
3.5 MAODC (The Metropolitan Area Outer Discharge Channel) Tüneli

İlk çağlardan beri nehirler doğal dere yatağı güzergahını takip ederek ve tarım alanlarını geçerek Tokyo Körfezine dökülmekteydi. Bununla birlikte 1950'li yılların ortalarından itibaren bu bölgede yoğun bir kentleşme meydana geldi. Kentleşme ise bölgeye düşen yağmuru absorbe eden pirinç tarlalarını yok etti. Bu durum betonlaşma sonucunda tayfun meydana geldiğinde veya yağışlı dönemlerde yağışın direkt akışa geçmesine neden oldu. Sonuç olarak söz konusu bölgede 1980 li ve 1990 lı yıllar arasında altı adet büyük taşkın meydana geldi. Bunlardan ikisi 30.000 konutun taşkına maruz kalmasına neden oldu. Japonlar 17 yıllık bir süre içerisinde 2 milyar dolarlık bir bütçeyi kullanarak Tokyo Tünelini inşa ettiler. Metropol alanının kenar mahalleleri üzerindeki su deşarj tüneli kısaca G-Can (gesuikanaru: drenaj kanalı) olarak da adlandırılmaktadır. Bu sistem insan eliyle yapılmış dünyadaki en büyük tahliye sistemidir ve gerçek bir mühendislik harikasıdır [1]. Sistemin kuşbakışı görünüşü Şekil 6 da yer almaktadır.



Şekil 6. MAODC in kuşbakışı görünüşü [14]

MAODC yüzeyin 50 metre aşağısında yer almakta olup Japonya'da yapılan ilk yeraltı nehir sistemidir. Tünelin çapı 10.6 m ve uzunluğu 6,3 km'dir. Şekil 7 de görüldüğü üzere tünel 5 adet şaft formunda depolama tesisini birbirine bağlamaktadır. Bu depolama tesisleri devasa boyutlu ve silindirik formlu yapılardır. Bunların her biri 70 m derinliğinde ve 30 m iç çapa sahiptir. Ve en büyük şaft biriken suyu pompalarla 200 m3/s kapasite ile Edogawa Nehrine pompalamaktadır. İnşaata 1993 yılı mart ayında başlanmış ve 2006 haziranında tamamlanmıştır [14].



Şekil 7. MAODC Drenaj sistemi [14]



Şekil 8. Yeraltı tapınağını andıran basınç kontrollü tank

4. Ülkemizde Taşkın Tünelleri

4.1 Demre Çevreli Mahallesi Taşkın Tüneli

Türkiye'de Antalya ili, Demre ilçesi, Çevreli Mahallesinde taşkın kontrolü ve tarım arazilerini koruma amacıyla inşa edilen Demre Çevreli Mahallesi Ova Drenajı isimli projedir. Bu projede tünel 5,20 m genişliğinde ters u tüneli şeklinde ve 1.598 m uzunluğundadır.

2019 yılında tamamlanan proje ile yaklaşık 3.500 da sera ve tarım bahçesi ile yerleşim yerleri taşkın riskinden korunmuştur. Proje kapsamında tünel kazısı ve beton kaplama imalatlarının yanı sıra binlerce metre kanal ve menfez yapımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Çevreli Mahallesi taşkın kontrol tüneli

5. Değerlendirme

İncelenen taşkın tüneli örnekleri, taşkın kontrolü anlayışının tarihsel süreç içerisinde değişen ihtiyaçlar doğrultusunda önemli bir gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır. İlk dönem uygulamalarında temel amaç yerleşim alanlarının drenajının sağlanması ve taşkın sularının güvenli bir şekilde uzaklaştırılması iken, günümüzde taşkın tünelleri yalnızca suyun tahliyesini sağlayan yapılar olmaktan çıkmış; depolama, taşkın geciktirme, su kalitesinin korunması ve ulaşım altyapısıyla bütünleşik çok amaçlı mühendislik sistemleri hâline gelmiştir.

Çalışmada incelenen sistemler teknik açıdan değerlendirildiğinde, her birinin bulunduğu bölgenin topoğrafik, hidrolojik ve kentsel özelliklerine göre tasarlandığı görülmektedir. Chicago TARP Sistemi büyük depolama rezervuarları ile birlikte çalışarak taşkın hacmini azaltmayı hedeflerken, SMART Tüneli aynı altyapı içerisinde hem karayolu ulaşımını hem de taşkın kontrolünü sağlayan yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Japonya'daki MAODC Sistemi ise yüksek nüfus yoğunluğuna sahip metropol alanlarında büyük taşkın debilerini yeraltında depolayarak kontrollü şekilde tahliye etmektedir. Bu örnekler, taşkın tünellerinin tek tip bir mühendislik çözümü olmadığını; şehirlerin ihtiyaçlarına göre farklı tasarım yaklaşımlarının geliştirilebildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak dünyadaki başarılı uygulamalar, taşkın tünellerinin özellikle yoğun kentleşmiş ve yüksek taşkın riski taşıyan bölgelerde etkili bir taşkın yönetim aracı olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin tünel mühendisliği alanındaki teknik deneyimi ve son yıllarda kazandığı uygulama kapasitesi dikkate alındığında, büyükşehirlerde taşkın riski yüksek havzalarda bu sistemlerin fizibilitesinin araştırılması ve uygun görülen alanlarda uygulanması, iklim değişikliğine uyum sağlayan sürdürülebilir taşkın yönetimi açısından önemli bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

6. Sonuçlar

İncelenen örnekler, taşkın tünellerinin yalnızca taşkın sularının güvenli bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamadığını, aynı zamanda kentleşmenin yoğun olduğu bölgelerde arazi kullanımını optimize eden, çevresel zararları azaltan ve sürdürülebilir şehircilik anlayışına katkı sunan önemli altyapı yatırımları olduğunu göstermektedir.

İklim değişikliğinin etkisiyle kısa sürede yüksek şiddette yağışların daha sık görülmesi ve hızlı kentleşme nedeniyle geçirimsiz yüzeylerin artması, özellikle büyük şehirlerde mevcut taşkın kontrol sistemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Yoğun yapılaşma bulunan alanlarda açık taşkın kanallarının oluşturulması kamulaştırma, arazi temini ve sosyal etkiler bakımından önemli güçlükler doğurmaktadır. Bu nedenle taşkın tünelleri, yeraltında inşa edilmeleri sayesinde mevcut kent dokusunu bozmadan

yüksek debilerin güvenli şekilde taşınmasına olanak sağlayan etkili bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye, son yıllarda tünel mühendisliği, TBM teknolojileri ve yeraltı yapıları konusundaki bilgi birikimi ve uygulama deneyimi sayesinde bu tür projeleri gerçekleştirebilecek teknik kapasiteye sahiptir. Özellikle İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve benzeri büyükşehirlerde taşkın riski yüksek havzalarda yapılacak ayrıntılı hidrolojik ve ekonomik fizibilite çalışmalarının ardından taşkın tünellerinin planlanması, gelecekte oluşabilecek can ve mal kayıplarının azaltılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, taşkın tünelleri ilk yatırım maliyetleri yüksek olmakla birlikte uzun vadede taşkın zararlarının azaltılması, şehir yaşamının kesintisiz devam ettirilmesi ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından sürdürülebilir ve stratejik bir altyapı çözümüdür. Ülkemizde iklim değişikliğine uyum politikaları kapsamında taşkın tünellerinin alternatif bir taşkın kontrol yöntemi olarak değerlendirilmesi ve yüksek riskli şehirlerde uygulanabilirliğinin ayrıntılı mühendislik çalışmalarıyla desteklenmesi önerilmektedir.

6. Kaynaklar

[1] Nagare, N., Kotawdekar, H., Mhatre, S. Ve Patil, S.B. (2020), Underground drainage system for flood mitigation for Mumbai Region, Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol 17, Issue 4, 32-41p.

[2] Tsuchia, N, Tortajada, C. Ve Shivani, R. (2018) Flood disaster prevention:Lessons from Tokyo, Global Water Forum. https://thirdworldcentre.org/2018/01/flood-disaster-prevention-lessons-from-tokyo/

[3] Kaya, Y., 2018. İklim değişikliğine karşı kentsel kırılganlık: İstanbul için bir değerlendirme. Intenational Journal of Social Inquiry, vol, 11, Issue 2, 219-257s.

[4] Nuhu, I ve Maimunah, B.A., (2015), Arelationship between flood occurances and the maintanence Works of SMART tunnel, Kuala Lumpur, Malaysia, İntenational Journal Research and Review, 434-449 p.

[5] Nuhu, I ve Maimunah, A., (2013), A review of the 7imülasyon on the evaluation and roles of tunnels technology in managing environmental disaster. Environmental Science, 1-7 p.

[6] Hopkins, J.N.N., 2007, https://waters.iath.virginia.edu/Journal4Hopkins.pdf

[7] Machline, V.C. ve Machline, C. (2014), Urban sanitation and use of human waste as manure in ancient Rome. Proceedings of the 4th İnternational Conferenceon Industrialand Hazardous Waste Management, 1-9p.

[8] Alkan, A. Ve Öziş, Ü. (2008), Çevlik tarihi su tünelli çevirme sistemi. Tarihi Su Yapıları Konferansı, 93-96s.

[9]Wikipedia,2023,https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_and_Reservoir_Plan#/media/File:Aerial_view_of_McCook _Reservoir_Phase_II_construction,_September_2023.JPG

[10] Changnon, S., (2010), A unique Solution to Chicago's Water Pollution: Tunnels and Reservoirs. Transactions of the Illinois State Academy of Science, vol 103, 119-124 p.

[11] Varadharajan, R. B. Ve Bailey, C. J. (2013), Performance analysis of the storm water management and road tunnel – SMART in Kuala Lumpur. İnternational Journal of Water Resources and Environmental Engineering, vol 5 (7), 410-417 p.

[12] Kamis, A., Setan, H. Ve Fung, P.L.C. (2007), The applications of surveying techniques in Kuala Lumpur SMART tunel Project. Conference: Proceedings of ISG/GNSS, 1-12 p.

[13] Santhiman, M.S. ve Weei, L.H., 2006, ITS of SMART. International Seminar on Intelligent Transport System(ITS) In Road Network Operations, 1-15 p.

[14] Akagi, H. (2018) Amazing underground construction technology in Japan, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 3-19 p.

Ergani Barajının Farklı Yıkılma Senaryolarında Barajın Mansabında Oluşacak Taşkın Tehlike Haritalarının DEFRA Yöntemi ile Belirlenmesi

Cesur KAPLAN*
DSİ 10.Bölge Müdürlüğü, Diyarbakır, 0000-0002-4899-1814
cesurkaplan@dsi.gov.tr; 192115201@firat.edu.tr

Mehmet Cihan AYDIN
Bitlis Eren Üniversitesi, BİTLİS, 0000-0002-5477-1033
mcaydin@beu.edu.tr;

Nihat KAYA
Fırat Üniversitesi, ELAZIĞ, 0000-0002-9820-9587
nkaya@firat.edu.tr

Ali EM
Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, 0000-0001-8170-9422
aliem@dicle.edu.tr

Anahtar Kelimeler: baraj yıkılması, taşkın analizi, ArcGIS, Hec-RAS, DEFRA

1. Amaç

Barajların yıkılması durumunda oluşabilecek taşkın senaryolarının belirlenmesi etkili bir afet yönetimi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada beton ağırlık barajının (Ergani Barajı) yıkılması ve sonrasındaki olası taşkın senaryolarından birisi ele alınarak taşkın incelenmesi amaçlanmıştır.

Ergani Barajı gövdesinin modal analizi ile mod ve frekans değerleri bulunmuştur. Eşdeğer statik analiz ile baraj gövdesi üzerindeki deplasman, basınç ve çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Bu çekme gerilmelerine göre barajın muhtemel gedik şekilleri tahmin edilerek olası 5 yıkılma senaryosu belirlenmiştir. Sonrasında, 5 farklı yıkılma senaryosu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile 10 farklı giriş taşkın debisi için simüle edilerek 50 farklı çıkış taşkın hidrografı belirlenmiştir. Son aşamada ise, bu taşkın hidrografları HEC-RAS programına giriş hidrografı olarak tanımlanarak sayısal yükseklik haritaları yardımıyla en tehlikeli durum olan 5. Senaryoya göre taşkın yayılım haritaları elde edilmiştir [1]. Bu bildiride farklı olarak, barajın 891 kotu ile 904 kotu arasındaki çatlak yolundan betonun ani kopması sonucunda oluşacak baraj yıkılması durumunda barajın mansap kısmında oluşacak taşkının DEFRA yöntemine göre taşkın tehlike derecesi ve taşkın alanları belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Ergani Barajı gövdesinin enkesit özellikleri Şekil 1'de verilmiştir.

2.1. Ergani Barajı'nın Farklı Yıkılma Senaryoları

Ergani Barajı'nın muhtemel 2 farklı çatlak yolu tespit edilmiştir. Bu 2 muhtemel çatlak kırılmasına ek olarak 3 farklı durum daha düşünülmüştür. Bunlar: Senaryo 1, Senaryo 2, Senaryo 3, Senaryo 4, Senaryo 5 olmak üzere toplamda 5 farklı senaryo dikkate alınmıştır. Her bir senaryonun 10 farklı debide ani yıkılması düşünülerek barajın mansap kısmında 50 farklı durum için taşkın hidrografları elde edilmiştir [1].

Bu senaryolar sırasıyla [1];

Senaryo 1: 10 farklı debinin baraj gövdesi yıkılmadan dolusavak yoluyla akımın deşarj edilmesi ile barajın mansap kısmında oluşan taşkın hidrografları bulunmuştur. Bundan sonra bu senaryo S1 olarak adlandırılacaktır.



Şekil 1. Ergani Barajı maksimum enkesiti ve genel görünüşü [2]

Senaryo 2: 10 farklı debinin başlık betonunun kopması (ani kırılması) ile (909 m kot ile 918 m kotları arasındaki 9 m yüksekliğindeki başlık betonu) sonucu barajın mansap kısmında oluşan taşkın hidrografları bulunmuştur. Bundan sonra bu senaryo S2 olarak adlandırılacaktır.

Senaryo 3: 10 farklı debinin 1. Çatlak yolunun kırılması ile oluşan durumda (ani kırılması) (904 m kot ile 918 m kotları arasındaki betonun kopması) barajın mansap kısmında oluşan taşkın hidrografları bulunmuştur. Bundan sonra bu senaryo S3 olarak adlandırılacaktır.

Senaryo 4: 10 farklı debinin 2. Çatlak yolunun kırılması ile oluşan durumda (ani kırılması) ile (891 m kot ile 918 m kotları arasındaki betonun kopması) barajın mansap kısmında oluşan taşkın hidrografları bulunmuştur. Bundan sonra bu senaryo S4 olarak adlandırılacaktır.

Senaryo 5: 10 farklı debinin baraj gövdesi betonunun çok büyük bir parçasının kopması (ani kırılması) (880 m kot ile 918 m kotları arasında x yönünde 42 m, y yönünde 90 m uzunluğunda, z yönünde 38 m uzunluğunda) sonucu barajın mansap kısmında oluşan taşkın hidrografları bulunmuştur. Bu durum oluşabilecek en kötü senaryo olarak düşünülmüştür. Bundan sonra bu senaryo S5 olarak adlandırılacaktır.

Bu bildiride farklı olarak, Senaryo 4'ün gerçekleşmesi durumunda barajın mansabında oluşacak taşkın alanların yüzdesi ve DEFRA yöntemine göre taşkın tehlike dereceleri gösterilmiştir.

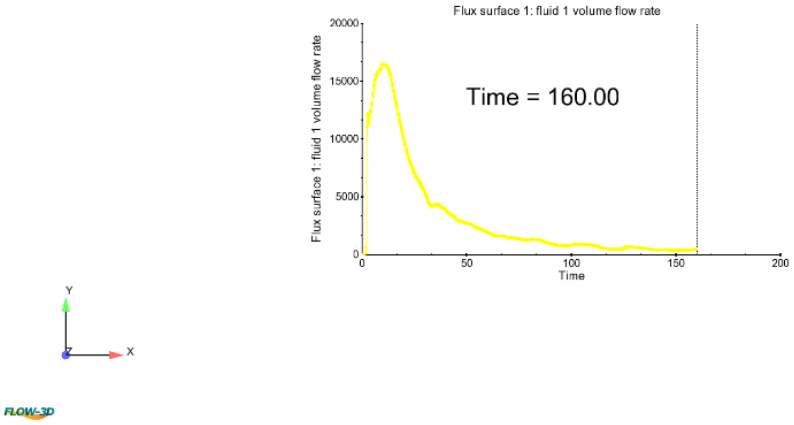
2.2. Ergani Barajı 4.Senaryoya Göre Baraj Yıkılması Durumu

Flow-3D ile oluşturulan sınır şartları ile 4.senaryo da pik debiler bulunmuştur. Şekil 2 ve Şekil 3'te Q_{10000} taşkın debisinin ve Q_{QEBT} taşkın debisinin gelmesi durumunda barajın mansabında oluşacak pik debiler görülmektedir.

En büyük debiler için; Senaryo 4'e göre Q_{10000} 157,6 m³/s taşkın debisinin gelmesi durumunda mansapta oluşan taşkın hidrografı maksimum 16 459,4 m³/s olmaktadır. Senaryo 4'e göre Q_{QEBT} 294,8 m³/sn taşkın debisinin gelmesi durumunda mansapta oluşan taşkın hidrografı maksimum 16 513,4 m³/s olmaktadır.



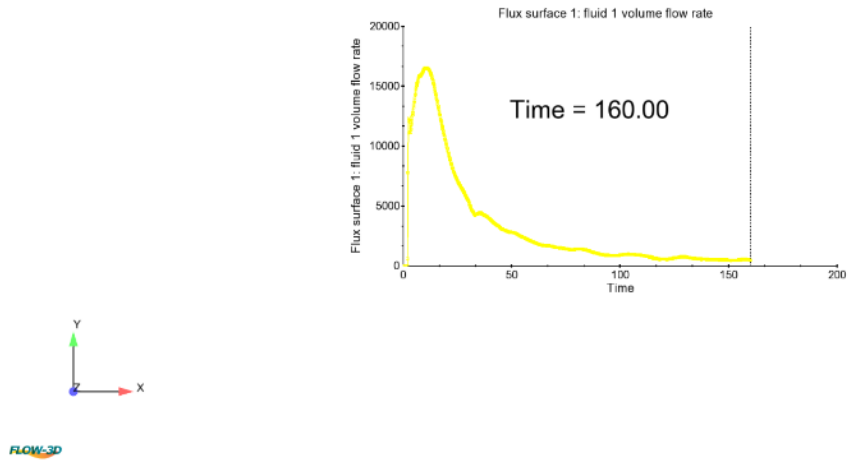
Şekil 2. Ergani Barajında S4 senaryosunda Q_{10000} debisinin geçmesi durumunda taşkın durumu



Şekil 3. Ergani Barajında S4 senaryosunda Q_{10000} debisinin geçmesi durumunda barajın mansap kısmında oluşan hidrograf



Şekil 4 Ergani Barajında S4 senaryosunda Q_{QEBT} debisinin geçmesi durumunda taşkın durumu



Şekil 5. Ergani Barajında S4 senaryosunda Q_{QEBT} debisi geçmesi durumunda barajın mansap kısmında oluşan hidrograf

Ergani Barajı'nın farklı yıkılma senaryolarının toplu değerlendirilmesi Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı yıkılma senaryolarına göre mansapta oluşan pik debilerin tablo ile gösterimi [1]

	Senaryo 1 (m^3/s)	Senaryo 2 (m^3/s)	Senaryo 3 (m^3/s)	Senaryo 4 (m^3/s)	Senaryo 5 (m^3/s)
Q_2	38,3	3343,0	7468,8	16410,0	19356,0
Q_5	54,5	3346,7	7457,0	16405,1	19372,4
Q_{10}	63,9	3327,2	7516,5	16404,4	19386,3
Q_{25}	74,2	3348,6	7538,3	16429,2	19399,6
Q_{50}	86,1	3336,4	7540,6	16442,1	19400,5
Q_{100}	91,2	3350,9	7567,2	16411,4	19403,2
Q_{500}	115,7	3342,4	7759,3	16444,0	19408,1
Q_{1000}	135,7	3368,3	7572,7	16471,0	19406,7
Q_{10000}	170,5	3364,2	7600,5	16459,4	19413,2
Q_{QEBT}	294,8	3411,8	7643,4	16513,4	19481,2

3. Değerlendirme

3.1. Baraj Yıkılması Durumunda Barajın Mansabında DEFRA Yöntemi ile Taşkın Tehlike Haritalarının Belirlenmesi

Hecras kullanılarak, barajın mansabında farklı senaryolarda taşkın haritaları belirlendi. Barajın mansabında 4.senaryo için en büyük 5 debi için taşkın haritaları bulundu. Bunlar Q_{100}, Q_{500}, Q_{1000}, Q_{10000} ve Q_{QEBT}'dir. Bu taşkın haritalarının derinlik ve hız değerleri de ayrıca hesaplanmıştır.



(a) (b)

Şekil 6. Ergani Barajı Google uydu haritası

3.2 DEFRA Yöntemiyle Barajın Mansabında 2D Sel Tehlikesi Haritaları

Taşkın tehlike haritaları, taşkın sularının dağılımını, derinliğini ve hızını veya bunların kombinasyonunu akış hızına göre gösteren haritalardır. Taşkın tehlike haritaları, tehlike sınıfına göre dört gruba ayrılır: 1) Düşük, 2) Orta, 3) Yüksek ve 4) Çok Yüksek.

DEFRA yöntemi Birleşik Krallık Tarım ve Çevre Bakanlığı tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem ayrıca Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından da önerilip kullanılmaktadır. Çeşitli taşkın tehlikesi haritası sınıflandırmaları mevcuttur. DEFRA yöntemi, uygulanabilirliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle daha çok tercih edilen bir yöntemdir [3-5] (Eşitlik 1).

(1)

$$\text{Taşkın Tehlike Derecesi} = [\text{Yükseklik} * (\text{Hız} + 0{,}5)] + \text{Süprüntü Miktarı}$$

Tehlike sınıfları ve seviyeleri Tablo 6'da özetlenmiştir. Düşük: Tehlike derecesi 0,75'ten düşük olan durumlar. Orta: Tehlike derecesi 0,75 ile 1,25 arasında olan durumlar. Yüksek: Tehlike derecesi 1,25 ile 2,50 arasında olan durumlar. Çok Yüksek: Tehlike derecesi 2,5'in üzerinde olan durumlar.

4. Sonuçlar

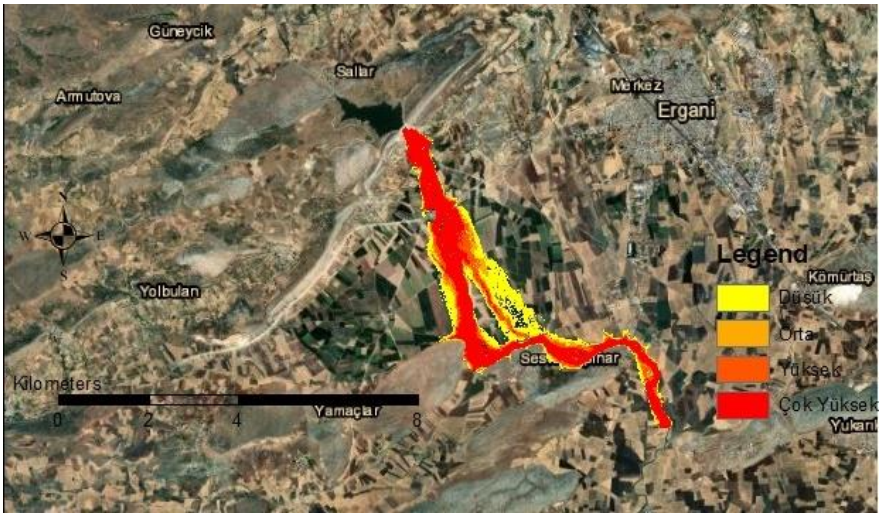
4 no'lu senaryo için en büyük 5 debi (Q_{100}, Q_{500}, Q_{1000}, Q_{10000} ve Q_{QEBT}) taşkın tehlike haritaları oluşturulmuştur. Bu potansiyel taşkın haritaları ArcGIS programı ile hesaplanmış ve DEFRA yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Her durum için taşkın tehlikesi koşulları altında su altında kalacak alanların yüzdeleri hesaplanmıştır. Defra Yöntemi'ne göre, su altında kalacak alanların yüzey alanı km² cinsinden gösterilmiştir. Tehlike derecesi gösterilmiştir.



(a) (b)

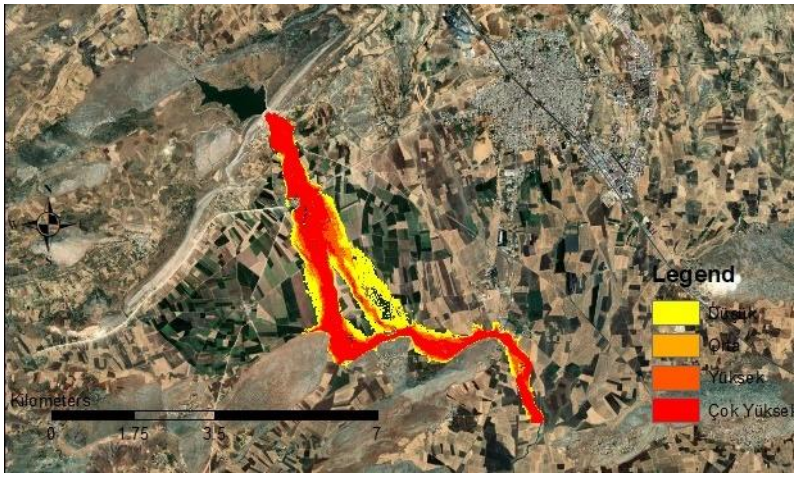
Şekil 7. Barajın mansabında Senaryo 4 Q_{qebt}'ye göre oluşturulacak derinlik (a) Senaryo 4'e göre, $Q_{qebt,}$ barajın aşağısında gerçekleşecek hızdır (b)

Senaryo 4'e göre, barajın hemen mansabında akım derinliği yaklaşık 16,35 m'dir, alt kısımlarda ise su derinliği 0,31 m'ye düşmektedir. Senaryo 4'e göre, akım hızı barajın hemen mansabında yaklaşık 13,29 m/s'dir; alt kısımlarda ise 0,25 m/s'ye düşmektedir.



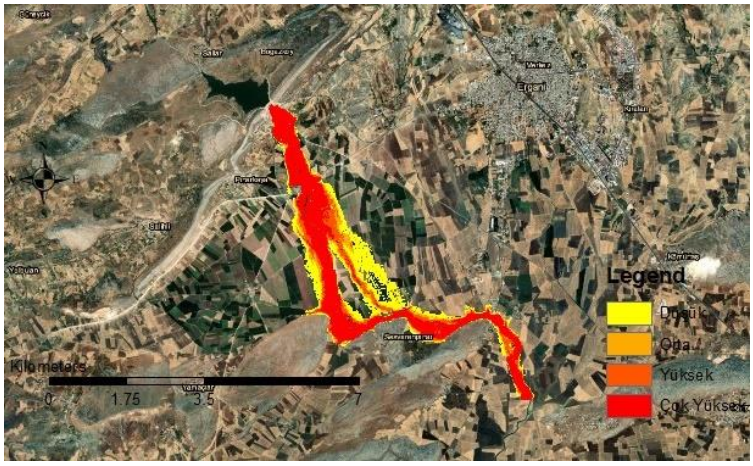
Şekil 8. Q_{100} Senaryo 4'e göre taşkın durumu

Toplamda 670 hektar arazi su altındadır. Defra yöntemine göre, arazinin % 26,9'u düşük, %8,2'si orta, % 14,0'ı yüksek ve % 50,9'u çok yüksek olarak sınıflandırılmıştır.



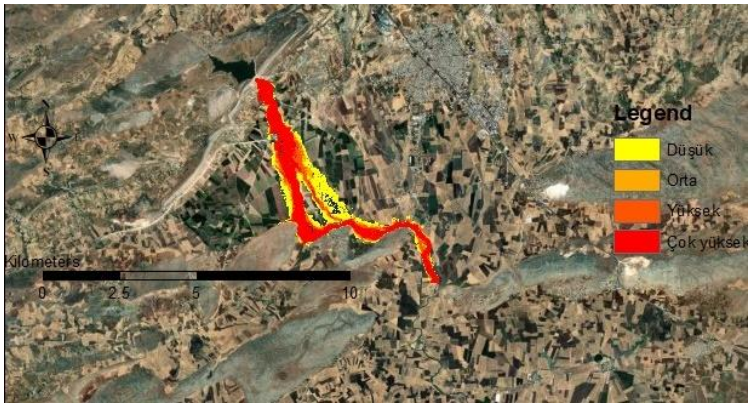
Şekil 9. Q_{500} Senaryo 4'e göre taşkın durumu

Senaryo 4'e göre, toplamda 671 hektar arazi taşkın tehlikesi altındadır. Defra yöntemine göre, % 26,8'i düşük riskli, % 8,2'si orta riskli, %14,0'ı yüksek riskli ve % 51,0'ı çok yüksek riskli olarak bulunmuştur.



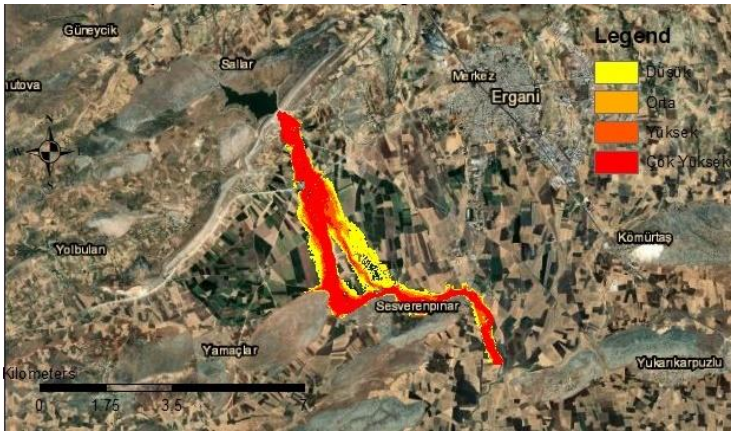
Şekil 10. Q_{1000} Senaryo 4'e göre taşkın durumu

Senaryo 4'e göre, toplam 672 hektar arazi taşkın tehlikesi altındadır. Defra yöntemine göre, % 26,8'i düşük riskli, % 8,2'si orta riskli, % 14,0'ı yüksek riskli ve % 51,0'ı çok yüksek riskli olarak bulunmuştur.



Şekil 11. Q_{10000} Senaryo 4'e göre taşkın durumu

Senaryo 4'e göre, toplamda 677 hektar arazi taşkın tehlikesi altındadır. Defra yöntemine göre, % 26,6'sı düşük riskli, % 8,0'ı orta riskli, % 14,0'ı yüksek riskli ve % 51,4'ü çok yüksek riskli olarak bulunmuştur.



Şekil 12. Q_{qebt} Senaryo 4'e göre taşkın durumu

Senaryo 4'e göre, toplam 672 hektar arazi taşkın tehlikesi altındadır. Defra yöntemine göre, % 26,8'i düşük riskli, % 8,0'ı orta riskli, % 14,0'ı yüksek riskli ve % 51,2'si çok yüksek riskli olarak bulunmuştur.

Tablo 2. 5 farklı senaryoda ve 5 farklı debi durumunda taşkın alanları

Farklı Senaryo ve Debilerde Taşkına Maruz Kalacak Alanlar					
	Q_{100} (he)	Defra Sınıfı	Q_{500} (he)	Taşkın Alanı %	Tehlike Derecesi (TD)
S4	180,0	26,9	180,0	26,8	Düşük
	55,0	8,2	55,0	8,2	Orta
	94,0	14,0	94,0	14,0	Yüksek
	341,0	50,9	342,0	51,0	Çok Yüksek
Taşkın Alanı	670,0	100,0	671,0	100,0	
	Q_{1000} (he)	Defra Sınıfı	Q_{10000} (he)	Defra Sınıfı	
S4	180,0	26,8	180,0	26,6	Düşük
	55,0	8,2	54,0	8,0	Orta
	94,0	14,0	95,0	14,0	Yüksek
	343,0	51,0	348,0	51,4	Çok Yüksek
Taşkın Alanı	672,0	100,0	677,0	100,0	
	Q_{qebt} (he)	Taşkın Alanı %		Defra Sınıfı	
S4	180,0	26,8		Düşük	
	54,0	8,0		Orta	
	94,0	14,0		Yüksek	
	344,0	51,2		Çok Yüksek	
Taşkın Alanı	672,0	100,0			

Diyarbakır'ın ilçeleri olan Ergani ile Çermik arasındaki mevcut karayolu tüm durumlarda çok yüksek tehlike grubunda yer almaktadır.

5. Kaynaklar

[1] C. Kaplan, M.C. Aydın, N. Kaya, An integrated analysis of dam break and flood propagation 15imülas Ergani RCC dam case study, Ain Shams Engineering Journal 17 (2026) 104253. https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2026.104253.

[2] https://dsi.gov.tr/Haber/Detay/1188, Devlet Su İşleri (n.d.).

[3] Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı, What is Corine?, https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/nedir.html (2025).

[4] O. Karagüllü, M. Kendüzler, Corine Sınıflandırması Raporu, Ankara, 2008.

[5] H.R., Wallingford, Defra /Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme Flood Risks to People Phase 2 FD2321/TR2 Guidance Document, 2006. www.defra.gov.uk/environ/fcd.

HECRAS 2B Modeli ile Taşkın Riski Analizi ve Taşkın Koruma Önlemlerinin Karşılaştırılması: İzmir Çamlı Deresi Havzası Örneği

Hazal DURMUŞ*
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Uluslararası Su Kaynakları Bölümü, 35430-Urla/İzmir, Türkiye.
0009-0001-1374-9120
hazaldurmus@iyte.edu.tr

Şebnem ELÇİ
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35430-Urla/İzmir, Türkiye.
0000-0002-9306-1042
sebnemelci@iyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* taşkın riski, hidrodinamik modelleme, taşkın koruma önlemleri, Çamlı Deresi

1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, İzmir'de yer alan Çamlı Deresi havzası taşkın yataklarındaki taşkın riskinin belirlenmesi ve farklı taşkın koruma önlemlerinin etkinliğinin HEC-RAS iki boyutlu (2B) hidrodinamik modellemesi ve maliyet analizi yoluyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Bu kapsamda öncelikle havzadaki kritik taşkın yayılım alanları ve risk odakları ortaya konulmaktadır. Ardından (i) taşkın duvarı uygulamaları, (ii) kanal ıslahı (genişletme), (iii) doğa temelli çözüm ve (iv) hibrit önlemler ayrı ayrı ele alınarak taşkın yayılım alanı ve taşkın hacmini azaltmadaki etkileri karşılaştırılmaktadır. Son olarak senaryoların hidrolik performansı, maliyetleriyle birlikte Pareto optimallik analiziyle değerlendirilerek en maliyet-etkin alternatif belirlenmektedir.

Çalışma, İzmir'deki bir akarsu için çok sayıda taşkın koruma alternatifinin 2B hidrodinamik modelleme ve maliyet analizi ile senaryo temelli olarak karşılaştırıldığı ilk çalışma olması bakımından literatüre özgün katkı sunmaktadır. Elde edilen bulguların; bölgesel koşullar altında hem hidrolik hem de ekonomik açıdan en uygun taşkın koruma stratejilerinin belirlenmesine, İzmir'de taşkın yönetimi politikalarının geliştirilmesine ve yerel yönetimlere bilimsel karar desteği sağlanmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

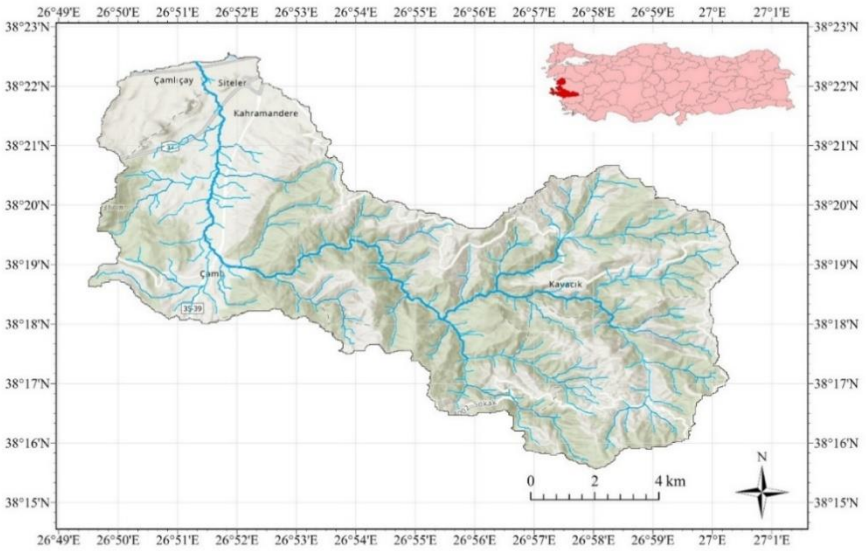
2.1. Çalışma Alanı

Çamlı Deresi havzası, Küçük Menderes havzasının İzmir Körfezi alt havzasında yer almaktadır. Dere, membada Güzelbahçe ilçesi sınırları içinde doğmakta; mansapta sol sahilde Urla ilçesi Çamlıçay Mahallesi, sağ sahilde Güzelbahçe ilçesi Siteler Mahallesi boyunca akarak Ege Denizi'ne dökülmektedir. Hidrolik modellemenin odağını oluşturan ana yatak kesimi, yerleşimin başladığı aşağı memba noktasından itibaren, derenin mansapta denize döküldüğü yaklaşık 8 km uzunluğundadır (Şekil 1). Güzergâh boyunca yatak eğimi 0,005 m/m'dir [1]. Çalışma alanı Q50, Q100 ve Q500 tekerrürlü taşkın debileri sırasıyla 134,67 m^3/s, 156,24 m^3/s ve 206,31 m^3/s'dir [2].

2.2. Kullanılan Veriler

Hidrodinamik modellemenin temel girdilerini sayısal yükseklik modeli (SYM), hidrolojik kayıtlar, arazi gezisi gözlem ve ölçümleri, arazi örtüsü verisi ile toprak tipi ve sızma katmanları oluşturmaktadır. Çalışma alanı için ulaşılabilen en yüksek çözünürlüklü topoğrafik veri, Harita Genel Müdürlüğünden temin edilen 5 m çözünürlüklü SYM'dir; arazi yüzeyi bu veri kullanılarak ArcGIS Pro ortamında oluşturulmuş ve WGS 84 / UTM Zone 35N koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Farklı tekerrür periyotlarına (Q50, Q100 ve Q500) ait tasarım taşkın hidrografları DSİ 2. Bölge Müdürlüğünden temin edilmiş ve memba sınır koşulu olarak kullanılmıştır [2] (Şekil 2). Arazi örtüsü verisi ESA WorldCover 2021 veri tabanından sağlanmıştır [3] (Şekil 3). Toprak tipi katmanı için USDA hidrolojik toprak grubu sınıflarıyla uyumlu NASA HYSOGs250m veri seti kullanılmış [4]; sızma katmanının tanımlanmasında USDA TR-55 eğri numarası (CN) tabloları esas alınmıştır [5].

Tablo 1'de özetlenen bu veri kümesi, Çamlı Deresi Havzasının topografik, hidrolojik ve hidrolik özelliklerinin HEC-RAS 2B modelinde temsil edilmesinin temelini oluşturmaktadır.

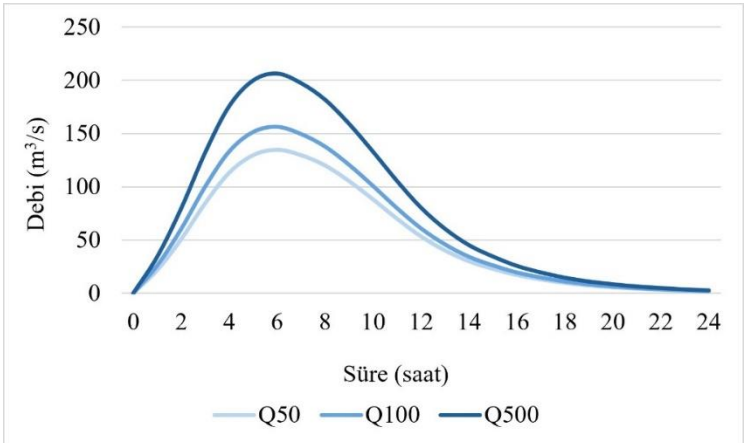


(a)

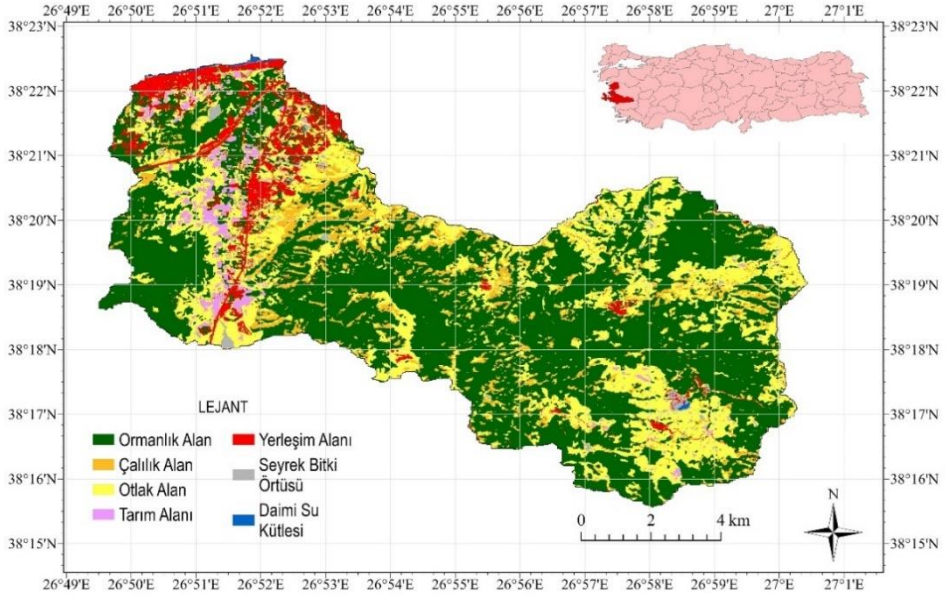


(b)

Şekil 1. İzmir, Türkiye'de yer alan Çamlı Deresi Havzası ile akarsu ağı (a) ve hidrodinamik modelleme için belirlenen çalışma alanı sınırları (b)



Şekil 2. 50, 100 ve 500 yıl tekerrürlü taşkın hidrografları [2]



Şekil 3. Çamlı Deresi Havzası arazi örtüsü sınıfları [3]

Tablo 1. HEC-RAS 2B modelinde kullanılan temel girdi verilerinin özeti

Girdi Verisi	Kullanım Amacı	Kaynak
5 m çözünürlüklü SYM	Arazi yüzeyini ve topografik özellikleri tanımlar; 2B hesaplama alanı ile hidrolik geometrinin oluşturulmasında kullanılır	Harita Genel Müdürlüğü (HGM)
Q50, Q100 ve Q500 taşkın hidrografları	Farklı tekerrür periyotlarındaki kararsız akım 18imülasyonlar18 için memba sınır koşullarını tanımlar	DSİ 2. Bölge Müdürlüğü
ESA WorldCover 2021 arazi örtüsü verisi	Taşkın ovasındaki yüzey direncini temsil eden Manning pürüzlülük katsayılarının (n) mekânsal dağılımını sağlar	Avrupa Uzay Ajansı (ESA) resmi websitesi
HYSOGs250m hidrolojik toprak grupları	Sızma modellemesi ve SCS eğri numarası (CN) tabanlı yağış kaybı hesapları için hidrolojik toprak gruplarını tanımlar	NASA EarthData resmi websitesi
Arşiv taşkın fotoğrafları (1995 taşkını)	Simulasyon sonuçlarının gözlenmiş tarihsel su seviyeleriyle karşılaştırılmasıyla model kalibrasyonuna esas oluşturur	Siteler Mahallesi Muhtarlığı, Güzelbahçe

2.3. İki Boyutlu (2B) Hidrodinamik Modelin Kurulması ve Senaryoların Simülasyonu

Havzanın taşkın davranışı HEC-RAS 6.7 beta yazılımı ile iki boyutlu (2B) olarak modellenmiştir. Model kurulumunun ilk aşaması; SYM üzerinde kanal batimetrisinin temsil edilmesi, 2B akım alanı sınırlarının belirlenmesi, hesaplama ağının oluşturulması, sınır koşullarının tanımlanması; arazi örtüsü, toprak tipi ve sızma katmanlarının yazılıma aktarılması ve akarsu üzerindeki hidrolik yapıların (köprüler) modele dâhil edilmesi adımlarından oluşmaktadır.

Temin edilen SYM'de dere yatağı batimetrisi yeterli ayrıntıda temsil edilmediğinden, kanal enkesit geometrisi saha gözlemleri ve uydu görüntülerinden yararlanılarak HEC-RAS'ın 1B geometri araçlarıyla sayısallaştırılmış, 1 m çözünürlüklü raster olarak dışa aktarılmış ve akım hesabından önce arazi yüzeyine entegre edilmiştir [6]. Yeniden yapılandırılan bu arazi yüzeyi 2B akım alanının tanımlanmasında kullanılmış; ardından hesaplama ağı oluşturulmuş, membada taşkın hidrografı, mansapta ise yatak eğimine bağlı normal derinlik (0,005) sınır koşulu tanımlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, Chow (1959) Manning pürüzlülük katsayılarının, ESA WorldCover 2021 arazi örtüsü sınıflarına karşılık gelen değerlerin atanmasıyla tanımlanmış [7]; katsayı seçimleri saha gözlemleri ve uydu görüntüleri ile desteklenmiştir.

Modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla iki ayrı kalibrasyon süreci yürütülmüştür. İlkinde, hesaplama ağının çözüm sonuçlarına etkisini belirlemek üzere 2-10 m aralığında değişen hücre boyutları ile ağ hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Hücre boyutunun küçültülmesi çözüm doğruluğunu artırmakla birlikte hesaplama süresini önemli ölçüde uzattığından, doğruluk ile hesap yükü arasında denge sağlayan boyutun belirlenmesi amaçlanmıştır. Analiz sonucunda optimum hücre boyutu, 2B akım alanı geneli için 4 m, kırılma çizgileri ve sıklaştırma bölgeleri için 3 m ve 2 m olarak belirlenmiştir.

Diğer analizde, arazi örtüsü sınıflarına atanan Manning pürüzlülük katsayıları Q500 debisi altında kalibre edilmiştir. Dere yatağı ESA WorldCover verisinde ayrı bir sınıf olarak temsil edilmediğinden, yatak manuel çizimle sayısallaştırılarak bağımsız bir arazi örtüsü poligonu olarak tanımlanmıştır. Kalibrasyonda, çalışma alanına ait erişilebilen tek kayıt olan ve Siteler Mahallesi Muhtarlığından temin edilen 4 Kasım 1995 taşkınına ait fotoğraflar esas alınmıştır [8] (Şekil 4). Fotoğrafların çekildiği sitede yapılan arazi ölçümüyle belirlenen taşkın derinliği referans alınarak, yatak pürüzlülük katsayısı n = 0,045 olarak elde edilmiştir. Çalışma alanında başka bir tarihsel taşkın gözlemi veya resmî su seviyesi kaydına erişilemediğinden bağımsız bir doğrulama yapılamamıştır. Ancak kalibrasyon süreci, modelin mevcut tek tarihsel taşkın kanıtını kabul edilebilir doğrulukla yeniden ürettiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Çalışma alanında 4 Kasım 1995 tarihinde meydana gelen taşkına ait arşiv fotoğrafı [8]

Hesaplama ayarlarında, kararsız akım çözümü için difüzyon dalga denklemi tercih edilmiştir. Simulasyonlar 24 saatlik bir zaman aralığı için yürütülmüş, hesaplama zaman adımı Courant sayısı 0,5–2,0 aralığında kalacak şekilde uyarlanabilir olarak tanımlanmıştır.

Kalibre edilen model ile Q50, Q100 ve Q500 taşkın debileri için herhangi bir taşkın önlemi olmadan mevcut haliyle 19imülasyonlar yürütülmüş, taşkın koruma senaryoları için ise referans senaryo Q500 debisi altında değerlendirilmiştir (Şekil 5).

2.4. Senaryo Analizi

Taşkın koruma önlemleri, referans senaryosunda yatak dışına taşmanın gerçekleştiği ve yerleşimin en yoğun olduğu mansap kesiminde değerlendirilmiştir. Bu kesim, Güzelbahçe Abdullah Baydar Caddesi köprüsünden Ege Denizi'ne dökülme noktasına kadar uzanmakta olup, önlemler her iki kıyı boyunca yaklaşık 1720 m uzunluğunda uygulanmıştır.

Biri müdahalesiz referans durumu (REF) olmak üzere toplam 11 senaryo Q500 debisi altında ayrı ayrı modellenmiştir (Tablo 2). Senaryolar; yapısal önlemler (SM1–SM6), doğa temelli çözüm (NBS1) ve hibrit önlemler (HM1–HM3) olmak üzere üç grupta tanımlanmıştır. Hibrit senaryolarda ortak bileşen olarak en

düşük duvar yüksekliği (SM1) korunmuş, böylece ikinci önlemin sağladığı ek katkının ayrıştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 5. Referans senaryoda Q500 debisi altında mansap kesiminde oluşan taşkın yayılımı ve derinlikleri

Her senaryonun hidrolik performansı, taşkın hacmi ve taşkın yayılım alanındaki azalma oranları üzerinden değerlendirilmiş; sol ve sağ kıyı taşkın alanları ayrı hesap poligonları olarak ele alınarak kıyılar arası su aktarımının görünür kılınması sağlanmıştır.

Tablo 2. Q500 debisi altında modellenen taşkın koruma senaryoları

SENARYO	TANIM
REF	Müdahalesiz referans durumu
SM1–SM4	Taşkın duvarı (sırasıyla 1,5 / 2,0 / 2,5 / 3,0 m yüksekliklerde)
SM5–SM6	Kanal genişletme (1 m / 2 m)
NBS1	3 m genişliğinde yüksek pürüzlü kıyı bitki tamponu (n=0,16)
HM1	1,5 m duvar + 1 m kanal genişletme (SM1 + SM5)
HM2	1,5 m duvar + 2 m kanal genişletme (SM1 + SM6)
HM3	1,5 m duvar + kıyı bitki tamponu (SM1 + NBS1)

3. Değerlendirme

3.1. Senaryoların Hidrolik Performansı

Referans durumda Q500 debisi 350,17 × 10^3 m^3 taşkın hacmi ve 650,98 × 10^3 m^2 yayılım alanı üretmektedir. Sol kıyı daha geniş bir alanda sığ, sağ kıyı ise daha dar bir alanda derin biçimde su altında kalmakta; bu topografik asimetri tüm önlemlerin performansını belirlemektedir.

Taşkın duvarlarında yükseklik–performans ilişkisi belirgin biçimde doğrusal değildir. 1,5 m duvar (SM1) hacmi yalnızca %40,99 azaltırken, yüksekliğin 2,0 m'ye çıkarılması (SM2) bu oranı %95,03'e yükseltmektedir. Yalnızca 0,5 m'lik artışın 54 puanlık kazanç sağlaması, Q500 su yüzeyi kotasının bu iki değer arasında kaldığını ve SM1'in pik sırasında aşıldığını göstermektedir. 2,5 m (SM3) ve 3,0 m (SM4) duvarlar taşkını tamamen önlemekte, aralarında fark bulunmamaktadır; dolayısıyla SM4 hidrolik açıdan ek fayda sağlamayan bir aşırı tasarımdır.

Kanal genişletme tek başına yetersiz kalmaktadır. Taşkın hacminde SM5 sonucu %15,14; SM6 sonucu %25,25 azalma olmuştur; genişletme miktarı ile performans arasındaki ilişki azalan verimlidir. Buna karşılık genişletmenin duvarla birleştirilmesi toplamsalın üzerinde bir etki üretmektedir: HM1 %70,71, HM2 %80,47 azaltım sağlarken, bileşenlerinin ayrı ayrı katkıları toplamı sırasıyla yaklaşık %56 ve %66'dır. Genişletme su yüzeyini düşürerek aynı 1,5 m duvara etkin hava payı kazandırmakta ve aşılan kesim uzunluğunu kısaltmaktadır.

Kıyı bitki tamponu (NBS1) Q500 altında azaltım sağlamamış, hacim referansa göre %3,9 artmıştır. Artan pürüzlülük bileşik kesitin iletim kapasitesini düşürerek su yüzeyini yükseltmekte ve erken taşmaya yol açmaktadır; 3 m genişlik ova ölçeğine göre dar kalmaktadır. Aynı mekanizma HM3'te kıyılar arası su aktarımı olarak belirginleşir: sol kıyı hacmi %53 azalırken sağ kıyı hacmi %13,8 artmakta, toplam performans duvarın tek başına verdiğinin gerisinde kalmaktadır. Bu aktarım, kıyılar ayrı poligonlar olarak değerlendirilmediğinde toplam değerlerde görünmez kalmaktadır.

Taşkın koruma senaryolarının Q500 debisi altındaki hidrolik performansı ve maliyetleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Taşkın koruma senaryolarının Q500 debisi altındaki hidrolik performansı ve maliyetleri

Senaryo	Tanım	Taşkın hacmi azalması (%)	Yayılım alanı azalması (%)	Maliyet (TL)
REF	Müdahalesiz referans durumu	-	-	-
SM1	1,5 m yüksekliğinde taşkın duvarı	40,99	37,60	12,191,336
SM2	2,0 m yüksekliğinde taşkın duvarı	95,03	94,76	18,964,300
SM3	2,5 m yüksekliğinde taşkın duvarı	100,00	100,00	27,091,858
SM4	3,0 m yüksekliğinde taşkın duvarı	100,00	100,00	36,574,008
SM5	1 m kanal genişletme	15,14	10,43	340,870
SM6	2 m kanal genişletme	25,25	17,83	681,739
NBS1	3 m kıyı bitki tamponu (n = 0,16)	0,00	0,00	327,094
HM1	1,5 m duvar + 1 m genişletme	70,71	66,43	12,532,206
HM2	1,5 m duvar + 2 m genişletme	80,47	80,40	12,873,075
HM3	1,5 m duvar + kıyı bitki tamponu	15,14	19,51	12,518,430

*NBS1 senaryosunda azaltım sağlanmadığından oran 0 olarak verilmiştir; hesaplanan değerler referans duruma göre hacimde %3,9, alanda %1,6 daha yüksektir.

3.2. Maliyet Analizi

Senaryoların ekonomik etkinliğinin belirlenmesi amacıyla maliyetler, yapısal önlemler (taşkın duvarı ve kanal genişletme) için DSİ 2026 Birim Fiyat Kitabı, doğa temelli çözüm için ise OGM 2026 Birim Fiyat Cetveli esas alınarak hesaplanmıştır. Hibrit senaryoların maliyetleri, bileşen senaryoların maliyetleri toplanarak belirlenmiştir. Senaryoların maliyetleri Tablo 3'te verilmiştir.

Elde edilen maliyetler, taşkın alanı ve hacmindeki azalma oranlarıyla birlikte Pareto optimallik analiziyle karşılaştırılmıştır. Buna göre her iki göstergede de etkin küme REF, SM5, SM6, SM1, HM1, HM2, SM2 ve SM3 senaryolarından oluşmaktadır. SM4, SM3 ile aynı korumayı daha yüksek maliyetle sağladığı için; NBS1 azaltım sağlamadığı için; HM3 ise SM1'den pahalı olup daha düşük performans gösterdiği için etkin alternatifler arasında yer almamıştır. HM2 yaklaşık %80 azaltımı 12,873,075 TL ile sağlarken, tam koruma sağlayan SM3'ün maliyeti 27,091,858 TL'dir. Bu nedenle HM2 en maliyet-etkin alternatiftir; SM3 ile arasındaki tercih ise kabul edilebilir risk düzeyine bağlıdır. Yer kısıtı nedeniyle ayrıntılı ekonomik analize burada yer verilememiş olup analiz, çalışmanın dayandığı tezde sunulmaktadır [6].

3.3. Çalışmanın Kısıtları

Çalışma alanı için erişilebilen en yüksek çözünürlüklü SYM 5 m grid aralığına sahiptir. LiDAR tabanlı yükseklik modelleri veya kritik kesitlerde yapılacak yerinde jeodezik ölçümler, kanal geometrisini ve taşkın ovası topoğrafyasını daha doğru temsil edecektir. Mansap çıkışında ölçülmüş su seviyesi verisi bulunmadığından normal derinlik sınır koşulu kullanılmıştır; denize dökülen akarsular için su seviyesi hidrografı daha uygun olacaktır. Çalışma kesiminde 1995 taşkını dışında gözlem kaydı bulunmadığından modelin bağımsız doğrulaması yapılamamıştır. Bu nedenle raporlanan azalma oranları mutlak tahminler olarak değil, senaryolar arasındaki göreli farklar olarak yorumlanmalıdır. Çalışmanın ana amacı taşkın koruma önlemlerini karşılaştırmak olduğundan, model yalnızca su akımını temsil etmekte; sediment taşınımı ve yüzen rüsubatın (özellikle köprü açıklıklarında tıkanma) etkileri dikkate alınmamaktadır. Dolayısıyla sonuçlar temiz su akımı koşulları için geçerlidir. Sediment ve rüsubat etkilerinin modele dahil edilmesi ileriki çalışmalar için önerilmektedir.

4. Sonuçlar

Çamlı Deresi mansap kesimi Q500 debisinde önemli bir taşkın riski taşımakta olup, yerleşimin en yoğun olduğu kesimde 350,17 × 10³ m³ hacim ve 650,98 × 10³ m² yayılım alanı oluşmaktadır.

Q500'e karşı tam koruma en az 2,5 m yüksekliğinde taşkın duvarı (SM3) ile sağlanmakta, 3,0 m duvar (SM4) ek hidrolik fayda üretmemektedir.

Duvar yüksekliği ile performans arasındaki eşik davranışı, tasarım su seviyesinin doğru belirlenmesinin kritik olduğunu göstermektedir; kotanın az miktarda düşük tahmin edilmesi korumanın etkinliğini yarıdan fazla azaltabilmektedir.

Kanal genişletmenin duvarla birleştirilmesi toplamsalın üzerinde bir kazanç sağlamakta; HM2 senaryosu yalnızca 1,5 m duvar ile %80 düzeyinde azaltım üretmektedir.

3 m'lik kıyı bitki tamponu tek başına ekstrem olaylara karşı yeterli değildir; NBS çözümleri farklı senaryolar altında yeniden değerlendirilebilir.

Pareto analizine göre HM2 senaryosu, yaklaşık %80 azaltımı tam koruma sağlayan SM3'ün maliyetinin yarısından azıyla (12,873,075 TL'ye karşı 27,091,858 TL) sağlamakta ve en maliyet-etkin alternatif olmaktadır.

Elde edilen bulguların, İzmir'de taşkın yönetimi uygulamalarına ve yerel yönetimlerin karar süreçlerine bilimsel dayanak sağlaması amaçlanmaktadır.

5. Kaynaklar

[1] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (2019). Küçük Menderes Havzası Taşkın Yönetim Planı, Ankara.

[2] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 2. Bölge Müdürlüğü (2026). Çamlı Deresi 50, 100 ve 500 Yıl Tekerrürlü Taşkın Hidrografları, Yayımlanmamış Kurum Verisi, İzmir.

[3] Zanaga, D. Vd. (2022), "ESA WorldCover 10 m 2021 v200", Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.7254221.

[4] Ross, C. W. Vd. (2018), "Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling", ORNL DAAC, doi: 10.3334/ORNLDAAC/1566.

[5] USDA Natural Resources Conservation Service (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55 (TR-55), Washington D.C.

[6] Durmuş, H. (2026). Analysis of Flood Risk and Comparative Assessment of Flood Mitigation Measures Using a Hydrodynamic Model: A Case Study of the Çamlı Stream Basin, İzmir. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.

[7] Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, 680p, New York.

[8] Güzelbahçe Siteler Mahallesi Muhtarlığı (2026). 4 Kasım 1995 Taşkınına Ait Arşiv Fotoğrafları, Yayımlanmamış Arşiv Belgesi, İzmir.

Malatya İçme Suyu Kaynağına Ait Taşkın Risklerinin Araştırılması

Muharrem Furkan GÜLGEN
Devlet Su İşleri 92.Şube Müdürlüğü, mfgulgen@dsi.gov.tr

Ömerul Faruk DURSUN
İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 0000-0003-3923-5205, faruk.dursun@inonu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: içme suyu, taşkın, Gündüzbey Kaptajı, HEC-RAS

1. Amaç

Malatya ilinin tek içme suyu tedarik noktası olan Gündüzbey Kaptaj yapısı ve çevresi, topografik yapısı ve dik eğimli yan kolları nedeniyle deprem, heyelan ve taşkın gibi doğal afetler bakımından incelenmesi gerekmektedir. Geçmiş yıllarda bölgede yaşanan ve aniden gelişen taşkın olayları, içme suyu altyapısının güvenliği ve su kalitesi üzerinde ciddi tehditler oluşturmuştur. Bu çalışmanın amacı, Derme Deresi havzasında belirlenen kesitler için farklı tekerrür periyotlarındaki taşkın debilerini hesaplamak ve 1 boyutlu hidrolik modelleme ile taşkın su yüzü profillerini belirlemek ve kaptaj yapısının taşkın güvenliğini değerlendirmektir.

2. Materyal ve Yöntem

İklim değişikliğinin, küresel ısınmanın ve hızlı sanayileşmenin su temini ve taşkın etkileri açısından içme suyu kaynakları üzerindeki etkileri ile ilgili son zamanlarda birçok araştırma yapılmaktadır. Doğal afetlerden biri olan taşkın, akarsuyun muhtelif nedenlerden dolayı yatağından taşarak, yerleşim yerlerine, çevresindeki arazilere, altyapı tesislerine ve canlılara zarar vermek suretiyle, etki bölgesinde normal sosyal ve ekonomik faaliyetleri kesintiye uğratacak büyüklükte bir akış oluşturması olayı şeklinde ifade edilmektedir [1]. Taşkınlar ülkemizde ve dünyanın birçok bölgesinde ciddi hasarların ve kayıpların nedenleri arasında olduğundan, taşkın karakteristikleri ve taşkın altında kalabilecek alanlar arasındaki ilişkinin, taşkın nedenli felaketlerle uygun mücadele gereğiyle detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Taşkın ve taşkın alanları üzerine yapılacak detaylı bir çalışma; hidrolojik, hidrolik, topoğrafik ve diğer ilişkili unsurların zaman ve alan boyutunda analizini gerekli kılmaktadır. Son zamanlarda, modellerle taşkın yatağı belirleme tekniği taşkınların nerede ve ne kadar bir süre sonra oluşacağının daha doğru tahmini için kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem sayesinde, taşkın tahminlerinin daha doğru ve daha kısa sürede yapılması ve taşkından etkilenecek alanların daha doğru olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu türden bir çalışma için, hidrolojik/hidrolik modeller ile CBS ideal bir destek oluşturmaktadır [2]. Taşkın su yüzü modellemelerine ait yazılımlar, arazi ve dere yatağına ait topoğrafik bilgilerin akarsuya ait Hidrolojik veriler ile Hidrolik hesaplamaların bilgisayar ortamında kısa sürede detaylı ve görsel olarak analiz edilmesine imkân sağlamaktadır.

Sheffer ve ark. (2007), geçmişte Fransa'nın Gardon Irmağı'nda yaşanan büyük taşkınların hidrolik analizini HEC-RAS paket programıyla gerçekleştirmiştir [3]. Geçen 500 yıl boyunca havzada, radyo-karbon birikimi ve jeolojik katmanların durumu göz önüne alındığında en az 5 tane büyük taşkın olayının meydana geldiği anlaşılmıştır. Cook ve Merwade (2009), HEC-RAS ve Finite-Element Surface-Water Modeling System (FESWMS) programlarını kullanarak, taşkın haritalarının üretilmesi, gereken yerlere ulaştırılması ve yenilenmesi konularına açıklık getirmişlerdir [4].

6 Şubat 2023'te Malatya ve çevresi, bir dizi depremle sarsılmıştır. Deprem sonrası, Gündüzbey Kaptaj Tesisi'nde suyun bulanıklığı artmış ve Malatya Valiliği, halkı şebeke suyunu içmemeleri konusunda uyarmıştır. Deprem, kaptaj tesisi içerisinde yer alan bazı su kaynaklarının kesilmesine neden olmuş ve bir sonraki gün çamurlu su akmaya başlamıştır. Ancak, birkaç gün sonra suyun debisi normale dönmüş ve birkaç hafta sonra da içilebilir hale gelmiştir. Bu olay, depremlerin su kaynakları üzerindeki etkisinin büyüklüğünü ve doğal afetler sonrasında su kaynaklarının yönetiminin önemini gözler önüne sermiştir. Malatya ili içme suyu kaynağı olan Kaptaj tesisleri civarında 1992 yılında büyük bir taşkın olayının yaşanmış olması konunun önemini pekiştirmektedir [5,6].

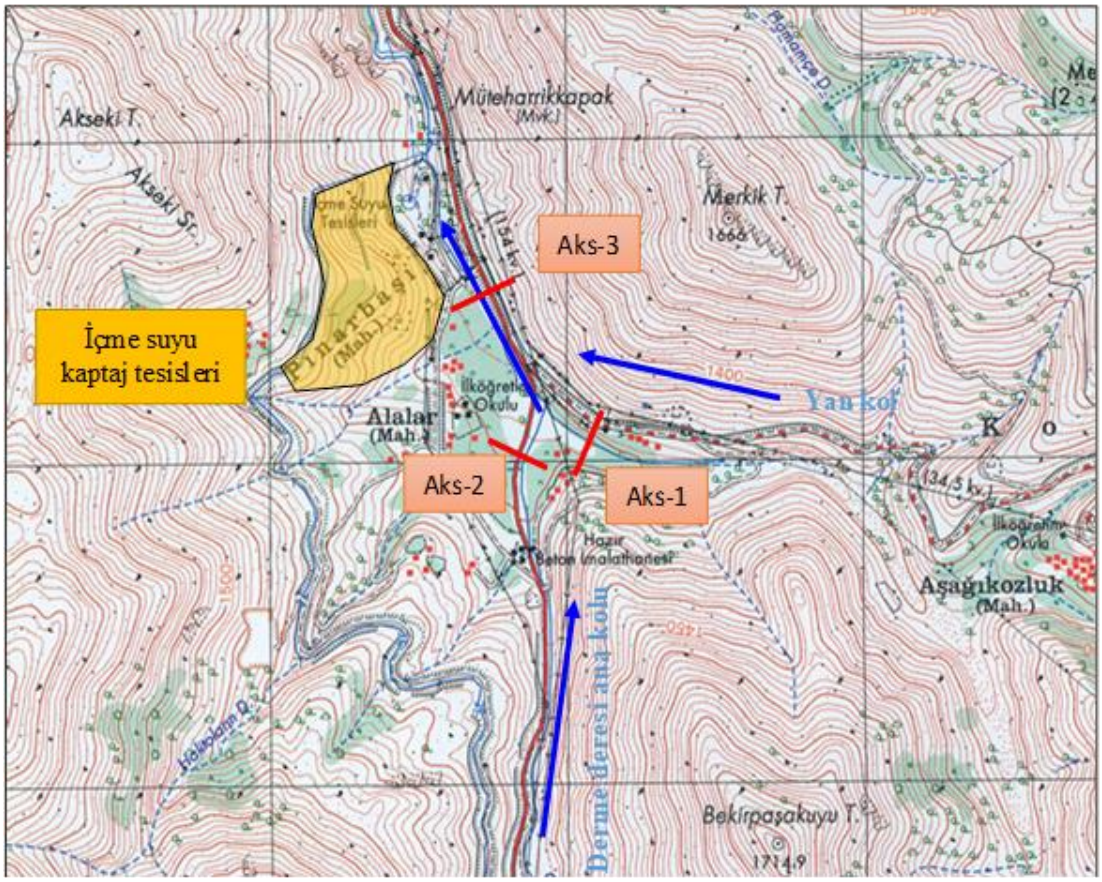
Bu çalışmada incelenen, Malatya ili Yeşilyurt ilçesi Kaptaj tesisleri Derme Deresi havzasında yer almakta olup, iki ayrı kolun birleşiminden oluşmaktadır. Çalışma alanı 1/25000 ölçekli L44-C1 pafta indeksli memleket haritasında yer almaktadır. Projede büyük olan kol ana dere diğeri ise yan kol olarak isimlendirilmiştir. Yağış-akış dönüşümünde Mockus Sentetik Hidrograf Yöntemi uygulanmış, hidrolik modellemede ise HEC-RAS 1D yazılımı kullanılmıştır.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü Malatya istasyonunun 24 saatlik maksimum yağış verileri ve havza parametreleri kullanılarak Mockus metodu ile pik debiler hesaplanmıştır. Aks-1 (A=19,41 km^2, L=7,26 km) ve Aks-2 (A=33,19 km^2, L=12,70 km) kesitleri için Toplam Toplanma Süreleri sırasıyla 0,80 saat ve 1,35 saat olarak elde edilmiştir [7]. Tablo 1'de Aks-1 ve Aks-2 için elde edilen taşkın debileri verilmiştir. Aks-1 ve Aks-2 için hesaplanan bu değerler iki derenin Kozluk köyü yakınındaki birleşim noktasından sonra Derme Deresi adıyla Gündüzbey Kaptaj tesislerinin yanından geçmektedir. Kaptaj tesislerinin yanındaki ise kesit Aks-3 olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 1. Taşkın debileri

Tekerrür Periyodu (Yıl)	Aks-1 Q(m^3/sn)	Aks-2 Q (m^3/s)
Q_2	1,44	2,70
Q_5	4,25	6,93
Q_{10}	6,74	10,57
Q_{25}	10,52	16,00
Q_{50}	13,68	20,51
Q_{100}	17,14	25,38
Q_{500}	24,34	35,63
Q_{1000}	27,44	40,04

Şekil 1'de Derme deresi havzası ve dereyi oluşturan iki ana kol ve Aks-1 ve Aks-2 yerleri görülmektedir. Gündüzbey Kaptaj tesisleri Aks-2 nin mansabında sol sahilde yer almaktadır.



Şekil 1. Derme deresi havzası

Çalışma alanı enkesit verileri ve deredeki Manning pürüzlülük katsayıları (n=0,125) kullanılarak kararlı akış (steady flow) koşullarında hidrolik analiz gerçekleştirilmiştir. Gündüzbey Kaptaj tesisinin yer aldığı dere yatağında su derinlikleri ve akım özellikleri belirlenmiştir.

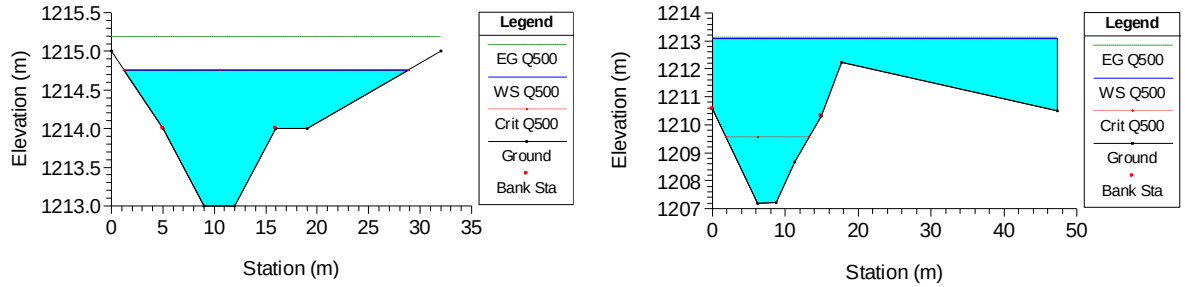
3. Değerlendirme

Mockus metoduna göre yapılan hesaplamalarda, havzanın dik eğimi ve kısa toplanma süreleri nedeniyle pik debilerin oldukça hızlı teşekkül ettiği tespit edilmiştir.

Q_{100} Taşkın debileri 17,14 m^3/s-25,38 m^3/s aralığında, Q_{500} ve Q_{1000} Taşkın debileri ise 24,34 m^3/s- 40,04 m^3/s aralığında hesaplanmıştır [7].

Sahada yapılan incelemeler neticesinde dere yatağı pürüzlüklerinin, iri taşlı her iki sahilinde çoğunlukla ağaçlı şevlerin olduğu ve dolanma oranının 1-1,15 aralığında kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 2'de HEC-RAS 1D hidrolik model simülasyon sonuçlarına göre özellikle mansap kesitlerinde taşkın seviyesi verilmiştir. 500 yıllık taşkın debileri için ana ve yan kol birleşiminden sonra Kaptaj tesisleri hizasına ait olan bu kesitlerde taşkın yayılımı olduğu belirlenmiştir. Tablo 2'de Q500 debisi için oluşacak akım özellikleri verilmiştir. Bu durum Malatya içme suyu temini yapılan tek su kaynağı olan Gündüzbey kaynağı civarında taşkın riski bulunduğunu göstermektedir. Geçmişte bölgede yaşanmış olan ve can kayıplarına ve kaynak suyunun belirli bir süre kullanılamamasına neden olan taşkın olayı da göz önüne alınacak olursa, konu hakkında daha detaylı incelemeler ve analizler yapılmasına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Derme deresi memba kısımlarında yağışlı dönemlerde heyelan riski bulunan yamaçların olduğu da saha incelemeleri esnasında gözlenmiştir. Bu bölgelerin detaylı etüt edilmesi ve heyelan analizlerinin taşkın riski ile birlikte değerlendirilmesi yararlı olacaktır.

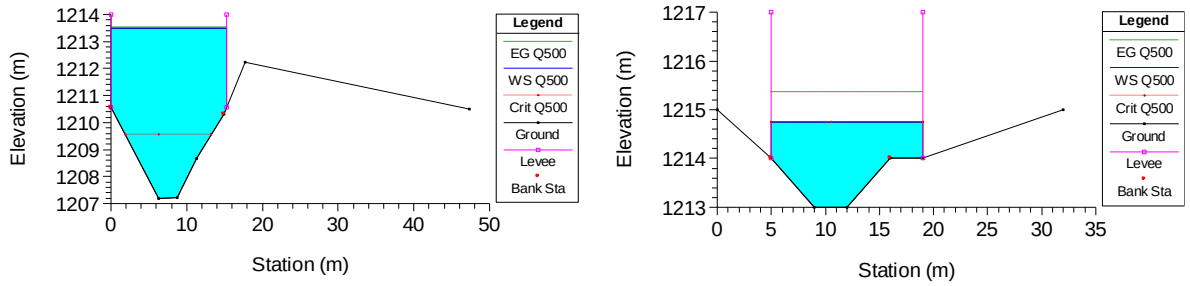


Şekil 2. Derme dersi mansap kesitlerinde Q_{500} taşkın debisi için oluşan su seviyeleri

Tablo 2. Derme deresi için Hec-RAS 1 boyutlu analizi ile elde edilen akım özellikleri

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	2	Q2	4.00	1213.00	1213.46	1213.46	1213.63	0.229691	1.82	2.20	6.65	1.01
3	2	Q5	11.00	1213.00	1213.79	1213.79	1214.05	0.197665	2.27	4.84	9.30	1.00
3	2	Q10	17.00	1213.00	1213.99	1213.99	1214.30	0.184219	2.48	6.85	10.89	1.00
3	2	Q25	26.00	1213.00	1214.24	1214.24	1214.57	0.130143	2.60	10.81	18.26	0.89
3	2	Q50	34.00	1213.00	1214.40	1214.40	1214.75	0.115339	2.74	13.98	21.15	0.86
3	2	Q100	42.00	1213.00	1214.53	1214.53	1214.91	0.108028	2.87	16.95	23.54	0.85
3	2	Q500	59.00	1213.00	1214.76	1214.76	1215.18	0.100171	3.12	22.85	27.69	0.84
3	2	Q1000	67.00	1213.00	1214.86	1214.86	1215.30	0.097448	3.21	25.54	29.39	0.84

Kaptaj tesislerini Derme deresi taşkınlarından korunması için dere yatağının her iki sahilinde 3,5 m yüksekliğinde duvar inşa edilmesi durumu da analiz edilmiştir. Şekil 3'te taşkın yaşanan kesitlerde her iki sahilde duvar yapılasının taşkın yayılımını engellediği görülmektedir. Tablo 3'te de duvarlı durum için oluşacak akım özellikleri verilmiştir.



Şekil 3. Derme dersi mansap kesitinde taşkın duvarı yapılması durumunda Q_{500} taşkın debisi için oluşan su seviyeleri

Tablo 3. Derme deresi için taşkın duvarlı durumda Hec-RAS 1 boyutlu analizi ile elde edilen akım özellikleri

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	2	Q500	59.00	1213.00	1214.75	1214.75	1215.36	0.082716	3.55	17.50	14.00	0.96
3	1	Q500	59.00	1207.18	1213.48	1209.55	1213.52	0.001002	0.81	74.16	15.27	0.12

4. Sonuçlar

Derme Deresi havzasının hidrometeorolojik yapısı gereği taşkınlar aniden gerçekleşme eğilimindedir. Q_{100} üzerindeki tekerrür debilerinde içme suyu kaptaj tesisi taşkın riski altına girmektedir. Hec-RAS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen 1 boyutlu analizlere göre çalışma alanındaki dere kesitinde her iki sahilde 3 m yüksekliğinde duvar yapılması halinde taşkın önlenebilecektir. Sahada yapılan gözlemsel incelemelerde üst havzada şev eğimleri yüksek olan dere yataklarında heyelan riski olduğu düşünülmektedir. 1992 yılında bölgede yaşanan taşkın olayında kaptaj tesisleri civarına büyük kayaların taşınmış olması bölgedeki heyelan riski düşüncesini güçlendiren bir olaydır. Bu nedenle bölgede taşkın ve heyelanın beraber inceleneceği 2 boyutlu analizlerin yapılması yararlı olacaktır. Kaptaj yapısının üst kotlarında rüsubat tutucu tersip bendi ve/veya sel kapanı planlanmalı ve mevcut dere yatağı kesiti Q_{500} debisini emniyetle geçirecek şekilde genişletilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışmayı FYL-2024-3792 kod numaralı proje ile destekleyen İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

[1] Ecer, R. Yenigün, K., (2007). Gap Bölgesinde Kentsel Altyapının Bir Taşkın Örneğinde İrdelenmesi; Nedenler ve Öneriler, s.186, TMMOB Afet Sempozyumu, 5-7 Aralık, Ankara.

[2] Onuşluel Gül G. Gül A., (2010). İzmir Bostanlı Havzası İçin Taşkın Alanlarının Hec-HMS ve Hec-RAS Modelleri ile Belirlenmesi, II. Ulusal Taşkın Sempozyumu, 267-274, Afyonkarahisar, 22-24 Mart 2010.

[3] Sheffer, N.A., Rico, M., Enzel, Y. “The Palaeoflood Record of The Gardon River, France: A Comparison With The Extreme 2002 Flood Event”, Geomorphology, 98 (1-2): 71-83 (2008).

[4] Cook, A., Merwade, V., “Effect of Topographic Data, Geometric Configuration and Modeling Approach on Flood Inundation Mapping”, Journal of Hydrology, 377: 131–142 (2009).

[5] DSİ 9. Bölge Müdürlüğü Malatya Derme Regülatörü Fezeyan Hasarı Raporu, 1991, (Yayınlanmamış).

[6] Geyikli, M. S. (2015). Taşkın risk haritalarının CBS yazılımları yardımıyla belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.

[7] DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, (2026), Malatya Yeşilyurt Derme deresi Taşkın Hidrolojisi Raporu, Elazığ.

Konya İli İçme Suyu Şebeklerinde Kayıp ve Kaçak Azaltma Çalışmaları

Ahmet ACAR
KOSKİ Su Tesisleri Dairesi Başkanlığı
ahmedacar42@gmail.com

Şerife Yurdagül KUMCU
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Konya, Türkiye
Orcid no: 0000-0002-2367-1531
syurdagulkumcu@ erbakan.edu.tr

Ali YÖNEL*
DSİ 4.Bölge Müdürlüğü, 41. Şube Müdürlüğü, Konya, Türkiye
Orcid no: 0009-0007-6224-4122

Anahtar Kelimeler: konya, içme suyu şebekeleri, fiziki su kayıpları, su kullanımı

1. Amaç

Türkiye'de kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 1519 m^3 civarındadır. Kişi başına su miktarı 2000m^3' den az ise su azlığı, 1000m^3' den az ise su fakiri olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizin su kıtlığı çeken sınıfta yer alması da su tasarrufunun önemini arttırmakta olup içme suyu kayıplarının sebebi olan borulardaki su sızıntı ve kayıp kaçakların, izinsiz kaçak şebeke bağlantılarının ve yanlış kayıt yapan ve okunan su sayaçlarının düzeltilmesini gerektirmektedir.

Bu amaç doğrultusunda farklı bölgelerde araştırmalar yapılmıştır. Konya içme suyu şebekesinde kayıpları tespit ederek değerlendirmiş olup, Konya içme suyu şebekesine verilen su miktarları ve tahakkuk edilen miktarlar derlenerek kayıp su miktarı hesaplanmıştır. Kayıp su miktarı yaklaşık olarak %27 tespit edilmiştir. [1] Şanlıurfa ili için 2016 ve 2017 yıllarında içme suyu şebekesi için su dengesi oluşturarak içme suyu şebekesine verilen suyun %49,4'lük kısmının kaybolduğu tespit edilmiş, fiziki kayıpların bunun %31,6'lık kısmını oluşturdu, sebebin ise şebekenin 130 m'yi bulan yüksek basınçlarda işletilmesi olduğunu belirlenmiştir. [2] İzmit içme suyu şebekesinde 2019 yılı için su kayıplarını %29,50 olarak tespit etmiştir. 2014 yılında %45,40 olan su kayıplarının basınç yönetimi ve aktif sızıntı kontrol metotlarıyla %29,50 seviyelerine indiğini belirlenmiştir.[3]

Çalışma kapsamında Konya Selçuklu ilçesinde yer alan Kuzey bölgelerde bulunan bir mahalle çalışma alanı olarak belirlenmiş, mahalledeki fiziki su kayıp-kaçak arama çalışması kapsamında öncelikli olarak Scada sisteminden Konya üretim değerleri belirlenip daha sonra tahakkuk verileri belirlenerek mahalle içme suyunda kayıp kaçak raporları oluşturulması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Konya şehri Kosava-Sancak Mahalleleri'nde çalışma alanında su kayıp ve kaçakları arama bulma çalışmaları ile içme suyu hattındaki basıncın dönemsel vakitlerde kayıt altına alarak basınç yönetimi sağlanmaya çalışılmıştır. Çalışma sırasında bölgenin haritası NetCAD ile çizilmiş ve SCADA sistemi ile su kullanım oranları tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerin analiz edilmesi kayıp kaçak olma ihtimali olan noktalarda, suyun az kullanıldığı geç saatlerde gece okuması yapılarak, kaçak olma ihtimali yüksek olan bölgelerin açılması ile onarımı yapılmıştır.

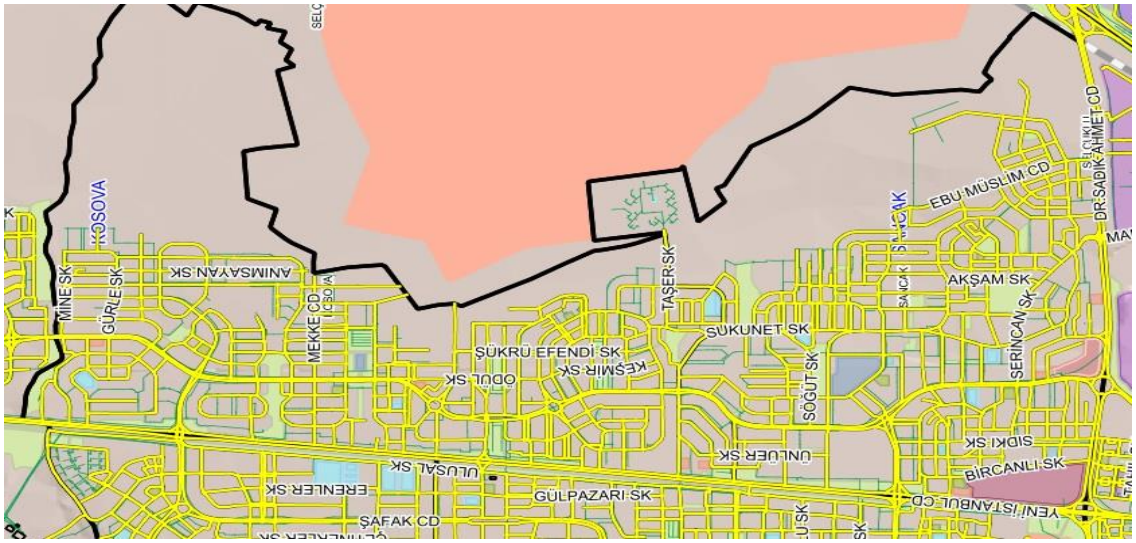
2.2 Yöntem

Çalışmada geçerli ana metot; küçük kapsamlı yapılan ölçüm çalışma alanının belirlenmesi izole alt bölge noktalarımızın (DMA) tespiti, çalışma alanına verilen giriş debisinin belirlenmesi ve çalışma alanındaki kullanım (sarfiyat) miktarının hesaplanmasıdır. Yapılan ölçümler sonucunda seçili bölgedeki su zayiatı ve kaçağı oranı (1) no'lu eşitlik ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Kaçak Oranı (\%)} = [(\text{Giriş Debisi}) - (\text{Toplam Tüketim}) / (\text{Giriş Debisi})] * 100 \quad (1)$$

Konya şehrinin Kosava-Sancak mahallelerini besleyen Buzlukbaşı Depo ve Parsana 2 bölgesinden beslenen ve çok katlı yeni yerleşim yapılarından oluşan Kosava-Sancak Mahalleleri, sadece bir tane akış noktasından beslenmektedir. Su kayıp ve kaçağı arama bulma onarma çalışması yapılan Sancak mahallesin seçilmesinde;

- Şebekenin eski ve AÇB borulardan oluşması kaçak oranının yüksek olması,
- Tek bir giriş hattından beslenmesi,
- Geçmiş zamanlardaki yapılan arıza ve yapılan onarımların fazla olması tespitinden deneyimler ve gözlemlere göre kaçak oranının fazla olabileceğinin tahmin edilmesi,
- Çalışma alanının "ana dağıtım hat ve güzergahının uzun ve abone bağlantısının karmaşık ve çok sayıda olması" özellikle etkin olmuştur. Çalışma alanı Şekil 1 'de verilmiştir.



Şekil 1. Konya Selçuklu Sancak Mahallesi çalışma bölgesi yerleşkesi

3. Değerlendirme

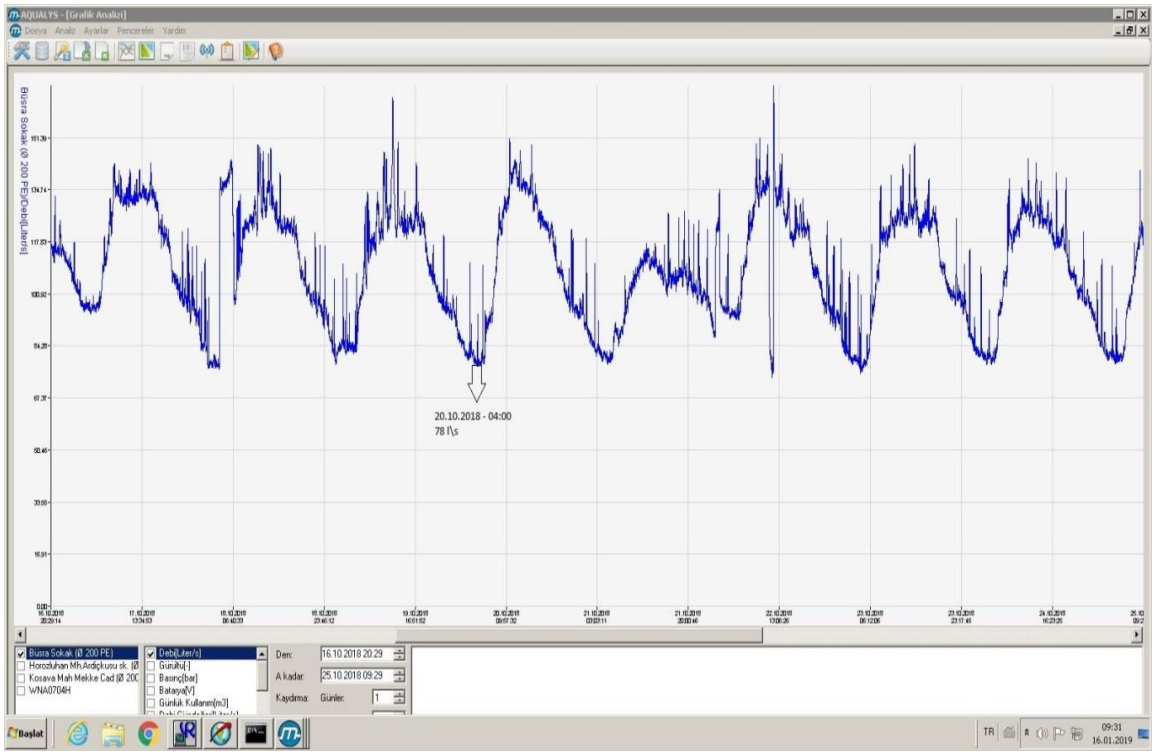
DMA BÖLGE ADI	: SANCAK MAH.BÜŞRA SOKAK
ABONE SAYISI	: 3714
ABONE BAĞLANTI SAYISI	: 242
ABONE ŞUBE YOLU(m)	: 728
ORTALAMA BASINÇ(bar)	: 4,90
ŞEBEKE(m)	: 11417
VANA SAYISI	: 94
KONTROL VANASI	: 3
BORU CİNSİ VE ÇAPI	: 200*PE
DEBİMETRE CİNSİ	: YİVLİ SENSÖRLÜ DALDIRMA TİP

İlk olarak çalışma bölgesinin gece debisi belirlenmiştir. Çalışma alanının gece debisi izleme grafiği Şekil 2'de verilmiştir.

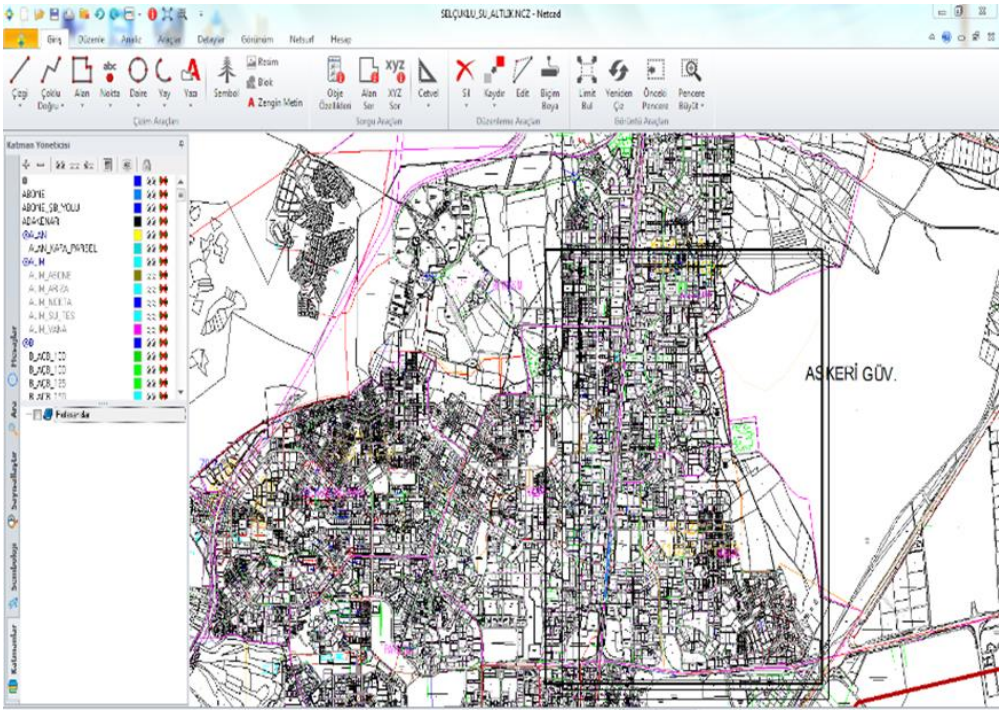
Şekil 1 üzerinde gece debisinin ortalama 78 litre\saniye olarak ölçüldüğü işaretlenmiştir. Bu debide Ardıçkuşu bölgesi de dahil olduğu için bu bölgeye ait miktar gece debisinden çıkartılmıştır. –44 = 34 litre\saniye Gece debisinin saniyede 34 litre olması burada önemli bir fiziki kayıp kaçak çalışması yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu durumda yapılacak çalışmalar sırası ile şöyledir: Çalışmalara başlamadan önce NetCAD üzerinden bölgenin haritası incelen ve bölgenin paftası alınır (Şekil 3) Bölgede bulunan kanalizasyon bacaları, PTT menholleri, vanalar tek tek kontrol edilir. Suyun yol bulup buralara dökülüp dökülmediği analiz edilir.

Açık veya kapalı olması gereken vanaların durumları incelenir. Bölgede büyük işletmelerin(fabrika, havuz vb.) olup olmadığı varsa gece çalışıp çalışmadığına bakılır. Basınç daraltma çalışması yapılarak; Bölgede farklı abonelerden basınç alınır, ortalama basınçtan farklı olan yerler belirlenir.

Çalışma bölgesi paftası Şekil 4 ‘de verilmiştir.



Şekil 2.Çalışma bölgesindeki gece debisi izleme grafiği



Şekil 3. Çalışma bölgesi Netcad üzerinde detaylı haritası



Şekil 4. Çalışma bölgesi pafta çıktısı

Bu çalışma kapsamında basınç daraltması yaparak arıza olabilecek yerlere yaklaşmaya çalışılmış olup olması gereken içme suyu basıncının 5-6 bar olması tespit edilmiştir. Bölgeden bir cami ve bir aboneden alınan basınç sonuçlarında aboneden alınan örnekte 3,58 bar ve cami örneğinde 3,8 bar olarak ölçülmüştür (Şekil 5).

Basınç daraltması sonucunda düşük basınç olan yerlerin boruları üzerinde yer mikrofonu ile akustik dinleme yapılarak ses alınan yerler işaretlenmiş yapılan kazılar ile 315 mm çapındaki içme suyu hattında arızaların meydan geldiği yerler tespit edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Çalışma bölgesinde debi ölçümleri



Şekil 6. 315'lik boruda onarım çalışması

3.1. Step Test Çalışması

Su kuyularının verimini ve kuyu ve hattındaki su kayıplarını belirlemek için seçili bölgede step test çalışması yapılmıştır. İlk olarak vanalar, belirlenen sırayla tek tek kapatılarak anlık debilere bakılmıştır. Akışta meydana gelen orantısız düşüşler ve kaçak şüphesi olan boru kesimleri belirlenmiştir. Step test için belirlenen hat Şekil 7'de gösterildiği üzere dal sistemine çevrilmiştir. Ayrıca test esnasında su kalitesinin bozulmamasına dikkat edilmiştir.



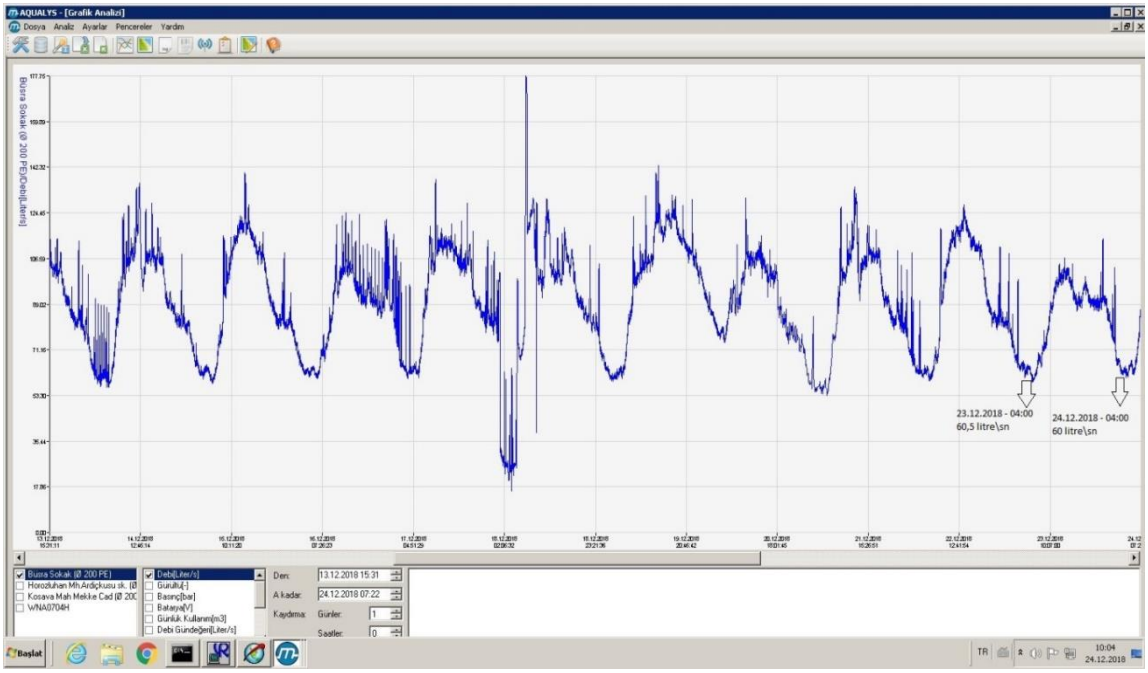
Şekil 7.Çalışma bölgesinde step test için pafta üzerinden belirlenmesi

Step test esnasında hat üzerinde belirtilen vanaların kapatılıp açılmasından dolayı hattaki borular içerisinde kaçak durumu kontrol edilmiş ve su kaçağı olan bir borunun arızası büyüyerek hattan sızan su Şekil 8'de gösterildiği üzere yüzeye çıkmıştır.



Şekil 8.Kaçak olan yerde yüzeye su çıkması

Yapılan onarım neticesinde tekrar debi kontrolleri yapılmış olup çıkan sonuçlar Şekil 3.7 de gösterilmiştir. Çalışmaya başlamadan önce 34 l/s olan gece debisinin içme suyu kaçak tespiti yapılarak hattın onarımı ile Şekil 9'da gösterildiği üzere 20 l/s'ye düşürüldüğü tespit edilmiştir. Saniyede 14 litre kazanç sağlanarak yılda bu rakam 435456000= 435 bin m^3 kazanç içme suyu kazancı sağlanmış olarak kaydedilirmiştir.



Şekil 9. Hattın onarımı sonrası Sancak Mahallesi gece debisi 20 l\s

4. Sonuçlar

Çalışma bölgesindeki yapılan pratik çalışmalar ile basınç seviyesinin 40 mss (4 bar) olabileceği yeterli bulunarak ve bu basınçta içme suyu hattının işletilmesinin rahatlıkla yapılabileceği görülmüştür. Oluşturulan DMA bölgesinde yapılan tetkik ve araştırmalara göre, dikkate değer anlamda kayıpları görülmüştür. Bu nedenle, yapılmış ve ekonomik ömrünü tamamlamış olan içme suyu hatları ıslah ve yenileme çalışmalarına önem vermesi veya yenilemesi uygun olacaktır.

DMA tasarımı ve uygulaması öncesinde içme suyu şebeke hattı üzerinde yapılan basınç çözümleme çalışmasında çalışma bölgesinde de sıklıkla basınç dalgalanmalarının yaşandığı, 60 bar seviyesinde ani basınç artışlarının ve düşüşlerinin olduğu gözlemlenmiştir. DMA çalışma bölgelerinin uygulanmasından sonra kaydedilen basınç profili değerleri, basıncın kusursuz bir şekilde iyileştirildiğini, hiçbir lokasyonda negatif basınç değerlerinin gözlemlenmediğini ve dengeli bir basınç değerine ulaşılabileceğini gösterilmiştir.

Bu çalışma bölgesinin oluşturulmasıyla, tekrarlanan negatif basınç nedeni ile meydana gelebilecek önemli sorunları ortadan kaldırmaya çalışılmıştır. Başlangıç ve sonuç gece debisi arasında gerçek kayıp kazanımı toplam miktarı saniyede 14 litre yılda yaklaşık 442 bin m^3 olmuştur. Maliyet kazanç değerlendirmeleri içme suyu m^3 2026 birim fiyatı üzerinden yılda 20.632.560 TL sadece bu bölge için ekonomi yapıldığı hesaplanmıştır.

DMA'ları orantılı bir şekilde işletip bakım onarımını yaparak, zamanla artış gösteren gece debisi ve yeni oluşan sızıntı kayıplarına hızlı müdahale edeceği göz önünde bulundurularak reel kayıp kaçakların ikinci gece debisi sınırında devam edeceği varsayımı yapıldığında, DMA tasarımlarının pratikte arazi çalışmalarında uygulanması ile önemli miktarlarda su tasarrufu sağlanacaktır. Ayrıca, orantılı işletme ve sürekli fiziki su kayıp-kaçak çalışmaları ile tasarım kendisini kısa süre içerisinde geri ödeyecek ve kazanıma sağlanacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Körpe, M. (2018). Konya içme suyu şebekesinde su kayıplarının tespiti ve değerlendirilmesi (Master's thesis, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

[2] Gerger, R., ve Aslan, A. (2019). Şanlıurfa İli İçin İçme Suyu Kayıp ve Kaçaklarının Tespiti. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(2), 26-35.

[3] Kızılöz, B. (2021). İçme suyu dağıtım sistemlerinde su kayıplarının azaltılması: Kocaeli örneği. Dergi Park, Volume 7, Number :2

[4] Karakuş C.B., Yıldız S., ve Cerit O., (2010) Sivas kenti içme suyu şebekesindeki su kayıpları ve kayıp oranını azaltma çalışmaları, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi.

[5] KOSKİ Genel Müdürlüğü (2018), Konya Büyükşehir Belediyesi Koski Genel Müdürlüğü 2018 Yılı Faaliyet Raporu, Konya.

[6] Şendil U. (1999) İçme suyu şebekelerine basınç ve su kaçağı arasındaki ilişki, Su ve Kanalizasyon Sempozyumu, Ankara.

[7] Özger M. (2017) Su şebekelerinde kayıp-kaçak yönetimi, İSKİ Eğitim Sunumu, İstanbul.

[8] Baykan O. (2017) Su yönetimi kapsamında içme suyu temin ve dağıtım sistemlerinde Su Kayıp ve Kaçaklarının Kontrolü, İstanbul

[9] Muhammetoğlu H., Muhammetoğlu A. (2017) İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü El Kitabı, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara

[10] Tuna M., Armut S., Tombul M. (2023) İçme Suyu Şebekelerinde Kayıp Kaçak Seviyesinin Belirlenmesi: Merzifon İlçesi Örneği, Kent Akademi Cilt 16 Sayı :1

Su Şebekeleri Basınç Yönetiminde Alternatif Bir Yöntem: Turbo Pompalama Sistemi

Ahmet DEMİRKAYA*
Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız kampüsü, Beşiktaş-İstanbul
ahmet.demirkaya @ std.yildiz.edu.tr

Zehra YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız kampüsü, Beşiktaş-İstanbul
zyumur@yildiz.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* su şebekesi, hidrolik modelleme, basınç yönetimi, turbo pompalama, enerji verimliliği

1. Amaç

Bu çalışmada eğimli arazilerde kurulu şebeke sistemlerinde, güncel mevzuata uygun basınç limitlerinin sağlanmasına yönelik enerji verimli alternatif bir yöntem sunulmuştur. Elde edilecek sonuçlarla; ideal basınçla su dağıtımı sayesinde enerji maliyetlerini düşürme, yüksek basınç kaynaklı boru arızalarında ve kayıp-kaçak oranlarında azalma beklenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü şehir şebeke sistemleri ile ilgili yürürlüğe koyduğu güncel yönetmeliklerde şebeke işletme basıncının 60 mSS'nu (5,8 bar) geçmemesini [1-2]; İller Bankası A.Ş.de şebekenin topoğrafik durumu göz önüne alınarak maksimum statik basıncın 60-65 mSS (5,8-6,3 bar) olacak şekilde basınç bölgelerinin oluşturulmasını istemiştir [3].

Mevcut şebeke sistemlerinde basınçlar çok daha yüksek seviyelerde olabilmektedir. Örneğin İSKİ'nin "İçme ve Kullanma Suyu Su Depoları Projelerinin Hazırlanması Teknik Şartnamesinde depo yerinin tespiti ile ilgili genel bir kabul olarak (Depoların Kot Durumu başlığı altında), "şebekede minimum işletme basıncı 30 mSS (2,9 bar) ve maksimum statik basınç 80 mSS (7,7 bar) sağlanacak yerde depo planlanacaktır" denilmektedir [4]. Yine "İçme ve Kullanma Suyu Şebeke Projelerinin Hazırlanması Teknik Şartnamesinde "Şebekenin katlara ayrılması halinde alt noktalarda maksimum 85 mSS (8,2 bar) statik basınç olacak şekilde katlar teşkil edilecektir" denilmektedir [5]. Dolayısıyla Su İdareleri şebeke üzerinde revize projeler geliştirmekte ve gerekli görülen yerlerde basınç kırıcı vanalar (BKV) ile özellikle üst basınç limitlerini sağlamaya çalışmaktadırlar.

Bu noktada alternatif bir çözüm yöntemi olarak, sahip olduğu potansiyel enerji nedeniyle hidrolik yükü yüksek olan bölgedeki suyun enerjisinin, hidrolik yükü daha düşük olan bölgeye aktarılabileceği öngörülmüştür. Turbo pompalama olarak adlandırılan bu yöntemde, suyun sahip olduğu enerjinin, yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen en uygun noktada bir türbin aracılığıyla alınarak pompaya aktarılması hedeflenmiştir.

Şehir şebeke sistemlerinde türbinler aracılığı ile enerji geri kazanımı konusunda literatürde birçok çalışma vardır [6;7;8;9;10]. Bununla birlikte su sistemindeki mevcut hidrolik enerjinin türbin ve pompa aracılığıyla daha verimli kullanılması konusunda literatürde iki çalışmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmalardan birinde, bir depodan başka bir depoya cazibe akışıyla gelen suyun hidrolik enerjisi, türbin olarak kullanılan pompa (PAT) ile mekanik enerjiye çevrilmektedir. Elde edilen bu mekanik enerjiyle de doğrudan pompa tahrik edilerek üçüncü bir depoya su aktarılmaktadır [11]. Diğer çalışmada ise şebeke akışının aşırı basıncından yararlanan bir PAT ile aynı konumdaki atık suyu arıtma tesisine ileten pompa tahrik edilmiştir [12]. Bu çalışmada ise enerji verimliliği merkeze alınarak su şebekesi içerisindeki hidrolik enerjinin daha dengeli dağıtılabilmesi konusuna odaklanılmıştır.

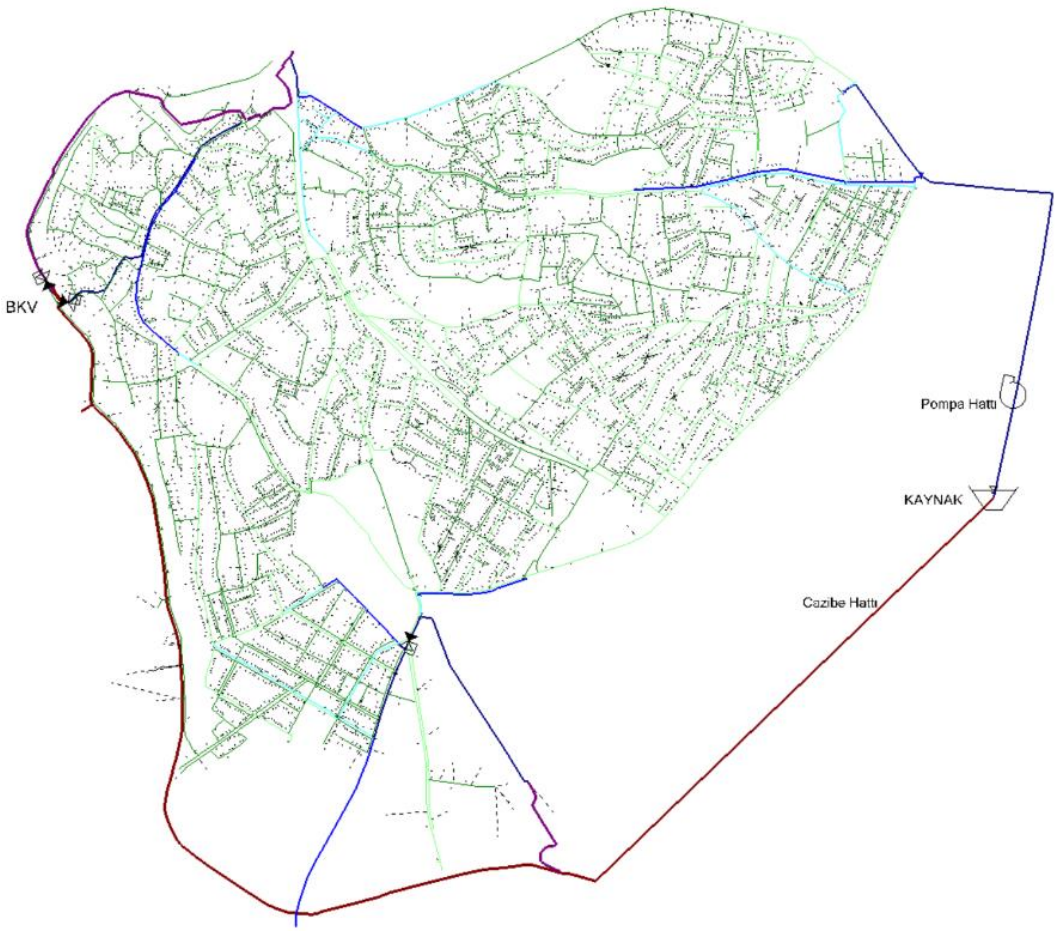
2.1. Turbo Pompalama Sistemi İçin Temel Kurulum Kriterleri

Bu sistem, yeni tasarımdan ziyade mevcut şebeke sistemlerinin iyileştirilmesine yöneliktir. Mevcut ya da yeni planlanan şebekede depo ve pompa sistemleri uygun yerlerde konumlandırılamamış ise burada sunulacak yöntem bir alternatif olabilir. Bunun için temel hususlar şunlardır:

1. Birbirine komşu olan ve birbirinin alt veya üst basınç katında kalan en az iki farklı besleme bölgesinin olması,
2. Birbirine komşu bölgelerin piyezometrik enerji seviyeleri farklı kaynaklardan besleniyor olması,
3. Aynı besleme bölgesi içerisinde yer alan tüketici bağlantı noktalarının kot seviyeleri arasındaki farkın, mevzuatta belirtilen minimum ve maksimum basınç limitleri arasındaki farktan büyük olması,
4. Birbirine komşu bölgeler, kendi içlerinde kot seviyelerine göre yeniden basınç katlarına ayrılmak istendiğinde, üst kotlar ile alt kotların bütüncül ayrı bölgeler oluşturabilmesi,
5. Yeniden basınç katlarına ayrıldığında piyezometrik enerji seviyesi fazla olan yeni üst bölgenin toplam hidrolik enerjisinin, yeni alt bölgenin (terfi ettirilecek bölge) ihtiyaç duyduğu toplam enerjiden yeterince büyük olması,
6. Yakın zamanda türbin ve/veya pompanın üzerinde bulunduğu hatlardaki debi ve basınç değerlerini önemli oranda değiştirecek mimari planlamaların olmaması,
7. Türbinin çalışacağı şebeke bölgesi ile pompanın çalışacağı şebeke bölgesinin farklı zamanlardaki tüketim değerlerinin, turbo pompa güç dengesini bozmayacak şekilde uyumlu olması,
8. Öngörülemeyen durumlar için sisteme basınç kontrolü içeren by-pass hattı eklenmesi,
9. Türbin tasarım noktasının maksimum debi noktasına yakın değerlerde olması,

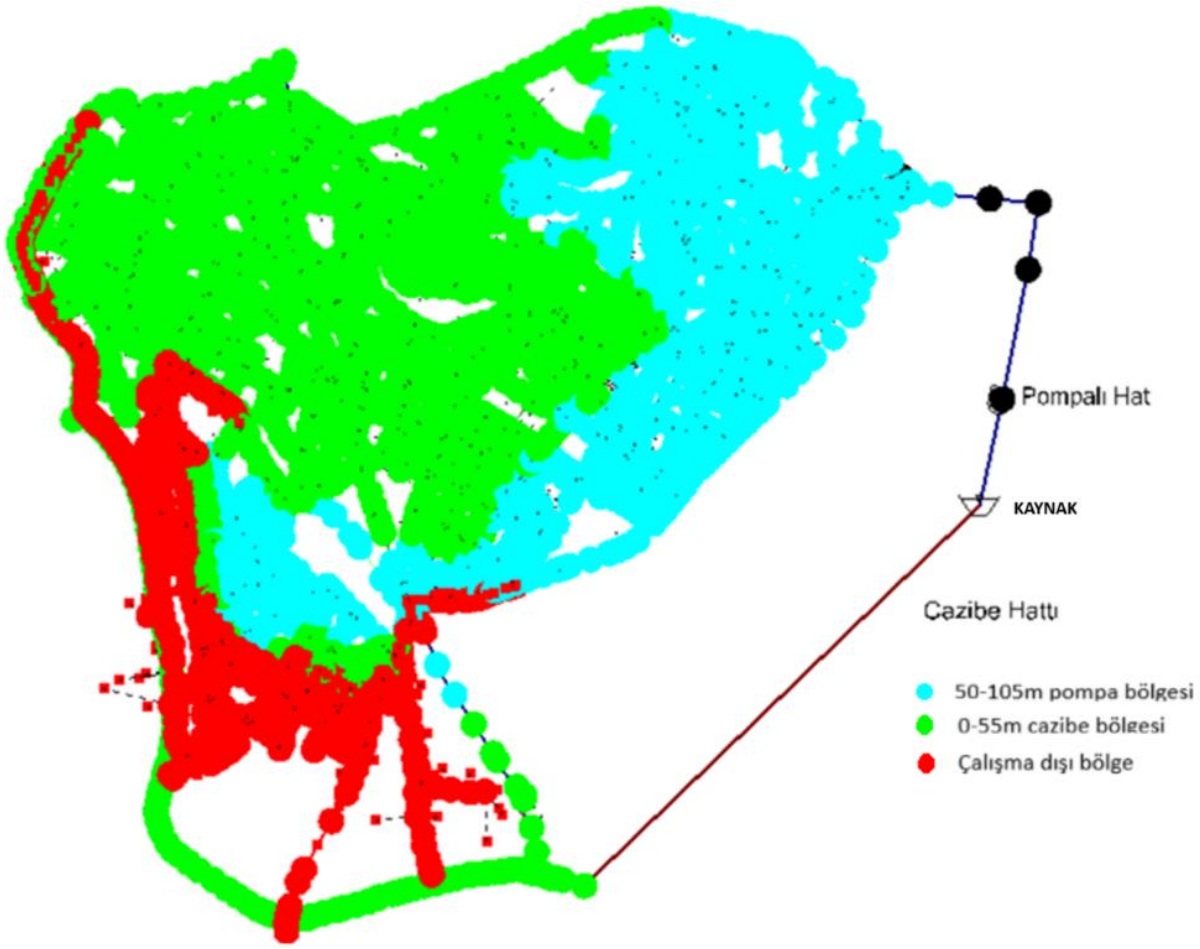
2.2. Örnek Besleme Alanı ve Mevcut Durum

Önerilen alternatif yöntemin hidrolik model üzerinde uygulanması için İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresinin desteği ile uygun bir şebeke alanı seçilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. 0-105 m kot aralığında şebeke örneği

Bu şebeke alanında mevcut besleme yapısı 0-55 m ve 50-105 m kot aralıklarındadır. Alt basınç katı (ABK) cazibeyle üst basınç katı (ÜBK) terfi ile beslenmektedir. Şekil 2'de çalışmaya dahil edilecek bölgeler yeşil ve mavi, çalışma dışı bırakılacak kısımlar ise kırmızı ile gösterilmiştir.

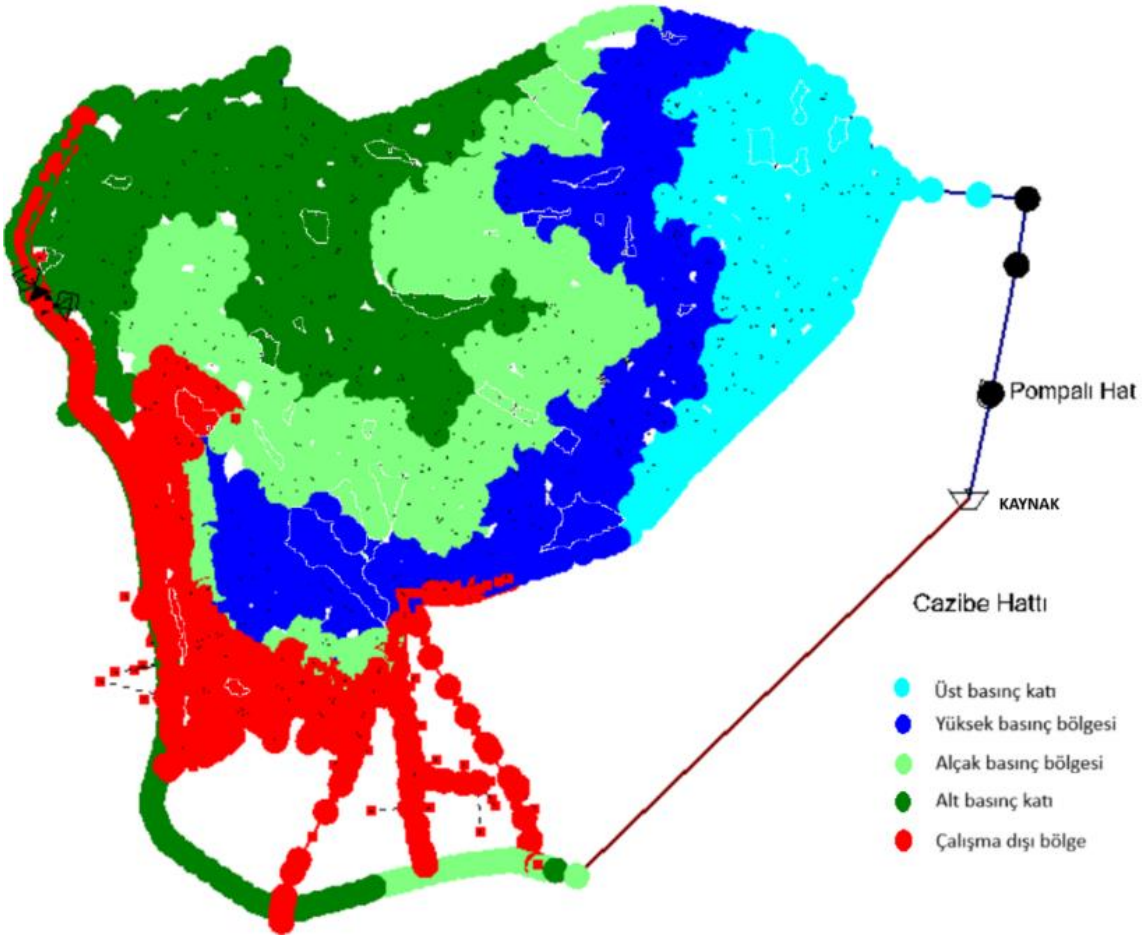


Şekil 2. İki ana basınç bölgesi (0-55 m ve 50-105 m) ve çalışma dışı bırakılan kısım

Hidrolik modelde yapılan ve Şekil 2'de gösterilen bölgeleme, eski mevzuattaki 50 mSS (4,8 bar) statik basınç farkına göre olup sahadakine göre kısmen farklılıkları söz konusudur. Alt besleme bölgesine iki noktadan giriş yapan su, 120 m üst seviye kotuna sahip depodan cazibe ile gelmektedir. Suyun giriş yaptığı noktalarda basınç kırıcı vanalar vardır. Basınç kırıcı çıkış basınçları 8-9 bar olup 2-3 bar basınç kırılımı uygulanmaktadır. Pompadan çıkarak üst bölgeye gelen su ise tek noktadan ve 3-4 bar değerinde giriş yapmaktadır. Bölgenin en alt kotları 50-55 m olduğu için basınçlar 8-9bar'lara çıkmaktadır. Alt bölgedeki BKV'lerde enerji kaybı olduğu gibi sonrasındaki kısımda ise basınç, olması gerekenden en az 2 bar fazladır. Bu yüksek basınçlı kısımlarda daha fazla düşüm uygulanamadığı için su ve enerji kayıpları yüksek olmaktadır.

2.3. Şebeke Alanının Turbo Pompalama Sistemine Göre Yeniden Bölgelere Ayrılması

Yukarıda anlatılan bölgeler turbo pompa uygulaması hedeflenerek kendi içinde tekrar basınç katlarına ayrılmış ve 4 adet basınç yönetim bölgesi meydana getirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Turbo pompalama sistemine yönelik oluşturulan basınç yönetim bölgeleri

En çok 30-35 mss (2,9-3,4 bar) statik basınç farkı dikkate alınarak alt ve üst basınç bölgeleri kendi içinde bölünmüş, alt basınç bölgesinin üst kısmı alçak basınç bölgesi (ABB), üst basınç bölgesinin alt kısmı da yüksek basınç bölgesi (YBB) olarak ayrışmıştır. Yeni basınç bölgelerinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

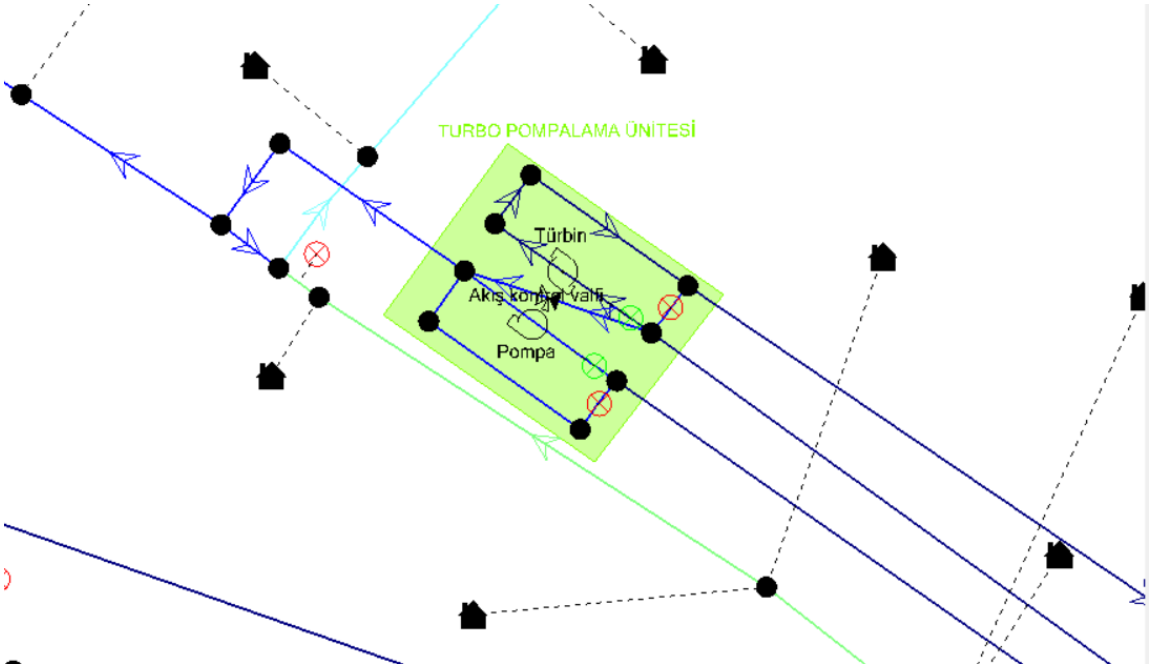
Tablo 1. Yeni basınç bölgelerinde tüketim ve şebeke özellikleri

	0-35m ABK	30-55m ABB	50-75m YBB	70-105m ÜBK
Yıldaki Ort. Saatlik Tüketim (m^3/h)	165	157	177	97
Şebeke Metrajı (m)	22566	16064	20263	14961
Bina Bağlantı Sayısı	1742	1593	1739	1275

2.4. Turbo Pompalama Sisteminin Yeni Plana Uygulanması

YBB'nin beslemesi türbinden, ABB'nin beslemesi ise türbin miline bağlı pompadan yapılmıştır. ÜBK'daki uygun olan noktalardan türbine, ABK'daki uygun olan noktalardan da pompaya besleme verilmiştir. Bu borulardaki debi ve basınç karakteristikleri türbin ve pompa kapasitelerini belirlemiştir.

Bu aşamada sistemin kurulacağı lokasyon, boruların uzunluğunu ve çapını doğrudan etkiler. Bu çerçevede türbin ve pompa konumları belirlenmiş ve bağlantıları Şekil 4'teki gibi yapılmıştır.



Şekil 4. Hidrolik modelde turbo pompalama sistemi

Modelde türbin ve pompa bağlı olmasa da eş zamanlı çalışacaklarından dolayı turbo pompa simüle edilmiş olur.

2.5. Türbin ve Pompa Kapasitelerinin Belirlenmesi

Yeni plana göre tasarlanan sistemdeki pompa ve türbin akış miktarlarının gerçeğe yakın tahmin edilebilmesi için hedeflenen çıkış basınç değerleri hidrolik modelde yaklaşık olarak tanımlanmıştır. Böylece basınca bağlı simüle edilen kayıp miktar gerçeğe yakın tahmin edilerek debi karakteristiği elde edilmiştir. Örnek şebeke modelinde pompada yaklaşık 20 mss (1,9 bar) artış, türbinde ise 30 mss (2,9 bar) düşüş oluşacak şekilde tanımlamalar yapılmıştır. Ayrıca ABK girişindeki BKV'nin düşürdüğü değerler de azaltılmıştır. Son olarak model çalıştırılarak hem türbin hem de pompa hattındaki akış miktarları tespit edilmiştir. Yapılan simülasyon ve seçim çalışmalarından sonra belirlenen değerler pompada 240m^3/h – 20 mSS (1,9 bar) ve türbinde 300 m^3/h – 30 mSS (2,9 bar) dır.

2.6. Enerji Dengesi

Sistem, kendi elektrik enerjisini üretecek şekilde çalışacaktır. Dolayısıyla türbinden gelen enerji, pompa ve dinamonun tükettiği toplam enerjiden büyük olmalıdır. Bu şart yılın herhangi bir zamanında sağlanmalıdır. Sağlanamadığı zamanlarda şebeke sistemi By-pass hattı ile kontrol altına alınmalıdır.

N_P, N_T, N_S, N_B, N_{GM} sırasıyla pompa, türbin, sistem, batarya şarjı ve dinamo miline aktarılacak güçleri (W) ifade etmekte olup aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır:

$$N_P = \rho . g . Q_p . \Delta H_p / \eta_P \quad (1)$$

$$N_{G_M} = \frac{N_S}{\eta_G \eta_S} + \frac{N_B}{\eta_B} \quad (2)$$

$$N_B = A * V \quad (3)$$

$$N_T = \rho . g . Q_T . \Delta H_T . \eta_T . \eta_m \quad (4)$$

Enerji dengesi şartı:

$$N_P + N_{G_M} \leq N_T \quad (5)$$

Burada;

ρ: Suyun yoğunluğu [kg/m^3]
g: Yer çekimi ivmesi [m/s^2]
Q_P: Pompadan geçen debi [m^3/s]
Q_T: Türbinden geçen debi [m^3/s]
ΔH_P: Pompanın aktardığı basınç farkı [m]
ΔH_T: Türbinde meydana gelen basınç düşüşü [m]
A: Akım miktarı [Amper]
V: Potansiyel fark [Volt]
η_P, η_T, η_S η_G, η_B, η_m: Sırasıyla pompa (0,80), türbin (0,85), sistem (0,95), dinamo (0,95), batarya (0,8) ve mekanik verim (0,95) değerlerini ifade etmektedir. Parantez içinde verilen değerler ön tasarım için kabul edilen değerlerdir.

Sistem ihtiyacı için 3 adet elektromanyetik debimetre (100 W), 1 adet doğrusal motor (500 W), 1 takım batarya (24 V – 10 A şarj voltajı) ve 1 adet otomasyon panosu (200 W) ön görülmüştür. Sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Enerji dengesi hesap tablosu

Q_P	240 m^3/h	η_P	0,82	N_P	16350 W
Q_T	300 m^3/h	η_T	0,85	N_T	19803 W
ΔH_P	20 m	η_B	0,80	N_S	1000 W
ΔH_T	30 m	η_G	0,95	N_B	240 W
η_m	0,95	η_S	0,95	N_{GM}	1408 W

Denklem 5'e göre;
15669 + 1408 = 17758 ≤ 19803 W değeri ile enerji denge şartı sağlanmıştır.

2.7. Tasarım ve Uygulama

Tasarım noktası değerleri dikkate alınarak türbin tasarımı yapılmış, HAD analizleriyle hidrolik model için gerekli olan karakteristik değerler belirlenmiş ve Tablo 3'te verilmiştir. Burada türbin Francis tipi kılavuz kanatlı bir türbin olduğu için minimum ve maksimum akış değerlerinde kanatların minimum ve maksimum açıklık miktarları dikkate alınarak sağlanabilecek düşü sınırları tespit edilmiştir. Dolayısıyla ara düşü değerleri kılavuz kanat kontrolüyle istenildiği gibi ayarlanabileceğinden tablodaki ara değerler ön görü ile yazılmıştır. Öte yandan üretici kataloglarından [13] temin edilen pompa nominal devir sayısı ve akış miktarına göre değişen türbin devri dikkate alınarak değişken devir pompa patterni Tablo 4'teki gibi tespit edilmiştir.

Tablo 3. Francis tipi türbin için debi-düşü karakteristiği

S	Flow (m^3/h)	Head ΔH (mSS)	S	Flow (m^3/h)	Head ΔH (mSS)
1	100	ΔH ≤ 31	14	230	28
2	110	32	15	240	27
3	120	33	16	250	27
4	130	33	17	260	27
5	140	33	18	270	27
6	150	33	19	280	27
7	160	33	20	290	28
8	170	33	21	300	30
9	180	33	22	310	31
10	190	32	23	320	33

11	200	31	24	330	35
12	210	30	25	340	37
13	220	29	26	350	ΔH ≥ 39

Tablo 4. Türbin devrine göre belirlenen değişken devir pompa patterni

Saatler	Saat Bazında Pompa Devir Oranları
1	0,39
2	0,33
3	0,31
4	0,29
5	0,31
6	0,37
7	0,46
8	0,63
9	0,74
10	0,84
11	0,90
12	0,97
13	1,02
14	0,98
15	0,95
16	0,92
17	0,92
18	0,95
19	1,00
20	1,07
21	1,09
22	1,01
23	0,76
24	0,50

Günler	Gün Bazında Pompa Devir Oranları
Pazartesi	0,98
Salı	0,98
Çarşamba	0,98
Perşembe	0,98
Cuma	0,98
Cumartesi	1,04
Pazar	1,07

Aylar	Ay Bazından Pompa Devir Oranları
Ocak	0,93
Şubat	0,86
Mart	0,97
Nisan	0,97
Mayıs	1,05
Haziran	1,06
Temmuz	1,13
Ağustos	1,10
Eylül	1,02
Ekim	1,01
Kasım	0,94
Aralık	0,95

Elde edilen karakteristik değerler turbo pompa modeline tanımlanmış ve çalıştırılmıştır. Yeni sisteme göre akış hızı yüksek gelişen borularda çap değerleri artırılmıştır. Seçilen pompa tasarım değerleri, güçte önemli bir değişiklik olmayacak şekilde 24 mss – 127 m^3/h olarak değiştirilmiştir. Sonuç itibariyle senenin en düşük ve en yüksek akışlarının gerçekleştiği günlerde hidrolik modelden elde edilen basınç değerleri önerilen yönteme göre Tablo 5'te, mevcut sisteme göre ise Tablo 6'da verilmiştir.

3. Değerlendirme

Tablo 5'te yeşil renkle gösterilen değerler dört besleme bölgesinde meydana gelecek minimum ve maksimum kritik nokta basınçlarını vermektedir. Buradaki basınç değerlerinin bazılarında limit basınçların (2,9 – 6,3 bar) bir miktar dışına çıkıldığı görülmektedir. Kot farkları ya da boru uzunluğuna bağlı olarak çap yetersizlikleri buna sebep olabilir. Bu çalışmadaki örnek bölgede şebeke boru çaplarında değişiklikler yapılarak çaptan kaynaklı etki en aza indirilmiştir. Bununla birlikte yeni bölge planında basınç katları arasındaki fark, şebeke bölgesi için dar ve uzun bölgeler oluşturmuştur. Ayrıca suyun bölgeler arası geçişi için komşu bölgenin kot aralığında kalan bazı borular gerekli bölgeye dâhil edilmiştir. Dolayısıyla basınç limitleri bu konumlarda aşılabilmektedir. Bununla birlikte debinin maksimuma çıktığı yaz aylarında türbinin ürettiği güçteki artış, pompa ve dinamonun çektiği güçteki artıştan az olduğu için pompa bölgesinde yeterince basınç oluşmamıştır. Fakat turbo pompa kaynaklı yetersiz basıncın oluştuğu zamanlarda, ABB ve YBB'nin arasına entegre edilecek kontrollü bir by-pass geçişi sorunu ortadan kaldırılabilir. Öte yandan yeniden bölge planlama safhasında ABB bölgesinin alanının biraz daha küçük tutulması da diğer bir çözüm alternatifi olarak değerlendirilebilir.

Özellikle belirtilmelidir ki, şebekelerde hedef basınç düzeyi genel olarak minimum basınç limitidir. Yani şebekede bir basınç optimizasyonu yapılacaksa hedeflenen nokta, basınç limitlerinin ortası değil minimum noktasıdır. Bunun temel sebebi boru patlama sayısını ve tespit edilemeyen patlaklardan kaynaklı su kayıplarını minimuma indirmektir. Dolayısıyla minimum basıncın oluştuğu kritik noktalardaki aboneler için basınçların 2,9 bar değerinin altına inmiş olması sorun teşkil etmiyorsa (örneğin tek katlı binalardaki aboneler), şebeke işletmesinde basınçların daha fazla yükseltilmesi istenmez. Yani sınırın altında kalan basınçlar, besleme bölgesine özgü değerlendirilmelidir.

Tablo 5. Turbo pompa hidrolik modelinde basınçlar

Yılın minimum tüketiminin olduğu günde (Örnekleme: 15 Ocak 2025 Çarşamba)								
	Kot Aralığı (m)	Bölge giriş basıncı (bar)	Mak. kritik basınç (bar)	Min. kritik basınç (bar)	Pompa girişinde basınç (bar)	Pompa çıkışında basınç (bar)	Türbin girişinde basınç (bar)	Türbin çıkışında basınç (bar)
ABK Bölgesi	3 - 36	7,2 (İdeal: 6,3)	7,5 (Kot: 3m)	3,4 - 3,9 (Kot: 36m)	-	-	-	-
ABB	27 - 56	-	6,1 - 4,9 (Kot: 27m)	2 - 2,3 (Kot: 53m)	1,5 - 2,1 (Kot: 55m)	2,3 - 3,9 (Kot: 55m)	-	-
YBB	34 - 76	-	6,8 - 7,5 (Kot: 34m)	2,7 - 3,5 (Kot: 76m)	-	-	8,3 (Kot: 55m)	4,8 - 5,7 (Kot: 55m)
ÜBK Bölgesi	68 - 103	3,6 - 3,9 (İdeal: 2,9)	6,9 - 7,2 (Kot: 68m)	3,5 - 3,8 (Kot: 103m)	-	-	-	-
Yılın maksimum tüketiminin olduğu günde (Örnekleme: 20 Temmuz 2025 Pazar)								
ABK Bölgesi	3 - 36	7,2 (İdeal: 6)	7,4 - 7,5 (Kot: 3m)	2,9 - 3,9 (Kot: 36m)	-	-	-	-
ABB	27 - 56	-	5 - 7 (Kot: 27m)	2 - 2,6 (Kot: 55m)	1 - 2,1 (Kot: 55m)	2,4 - 5,2 (Kot: 55m)	-	-
YBB	34 - 76	-	6 - 7,5 (Kot: 34m)	2,1 - 3,5 (Kot: 76m)	-		8,3 (Kot: 55m)	4,5 - 5,7 (Kot: 55m)
ÜBK Bölgesi	68 - 103	3,7 - 4,1 (İdeal: 2,9)	7 - 7,4 (Kot: 68m)	3,5 - 4 (Kot: 103m)	-	-	-	-

Tablo 6. Mevcut şebeke sisteminde hidrolik model basınçları

Yılın minimum tüketiminin olduğu günde (Örnekleme: 15 Ocak 2025 Çarşamba)				
	Kot Aralığı (m)	Bölge giriş basıncı (bar)	Mak. kritik basınç (bar)	Min. kritik basınç (bar)
Alt Bölge	3 - 56	8,3 (İdeal: 6,3)	8,6 (Kot: 3m)	2,9 - 3,2 (Kot: 56m)
Üst Bölge	49 - 103	3 - 3,2 (İdeal: 3)	8 - 8,4 (Kot: 50m)	2,9 - 3,2 (Kot: 103m)
Yılın maksimum tüketiminin olduğu günde (Örnekleme: 20 Temmuz 2025 Pazar)				
Alt Bölge	3 - 56	8,5 (İdeal: 6,3)	8,7 - 8,8 (Kot: 3m)	2,8 - 3,4 (Kot: 56m)

Üst Bölge	49 - 103	3,1 - 3,4 (İdeal: 3)	8,2 - 7,9 (Kot: 68m)	2,8 - 3,4 (Kot: 103m)

Mevcut şebeke planında alt bölge giriş basıncının 8 barın üzerinde olduğu görülmektedir (Tablo 6). Önerilen yeni planda 7,2 bardır (Tablo 5). İkinci olarak üst bölgenin maksimum kritik basıncı 8 barın üzerindeyken, önerilen planda 7,5 barı aşmadığı görülmektedir.

Mevcut plan ve önerilen plan arasında "ortalama basınç yaklaşımı" önemli bir karşılaştırmadır. Minimum akışın olduğu zamanlar için ortalama basınç hesaplandığında turbo pompalı sistemde 4,9 bar ve mevcut sistemde ise 5,8 bar olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın yapıldığı şebeke alanında yaklaşık 1 barlık düşüş elde edilmiştir.

ABB bölgesinde ön görülemeyen bir durumun oluşmasına karşılık olarak kritik nokta basınç değerlerini daha iyi bir noktaya çekmek için, modeldeki By-pass vanası (akış kontrol valfi) ABB'nin kritik nokta basıncına bağlı olarak belirli bir pattern düzeninde çalıştırılmıştır. Yılın en fazla tüketiminin olduğu 20 Temmuz 2025 tarihi baz alınarak model çalıştırıldığında minimum kritik nokta basınçları Tablo 7'de görüldüğü üzere uygun değerlere çekilebilmektedir.

Tablo 7. İlave olarak By-pass vanasının kullanılması durumunda kritik nokta basınçları

Yılın maksimum tüketimin günü (Örnekleme: 20 Temmuz 2025 Pazar)				
	Kot Aralığı (m)	Bölge giriş basıncı (bar)	Mak. kritik basınç (bar)	Min. kritik basınç (bar)
ABB	27 - 56	-	7 – 5,8 (Kot: 27m)	2,8 - 3,2 (Kot: 55m)

4. Sonuçlar

Bu çalışmanın sonucunda eğimli arazilerde, belirtilen kriterleri taşıyan şebeke bölgeleri için turbo pompalama ile basınç kontrolünün uygulanabileceği görülmüştür. Bu yöntemin uygulanması ile minimum ve maksimum kritik noktalar arasındaki basınç farkı, dolayısıyla da arıza ve su kayıpları daha düşük olacaktır. Basıncı düşürülen bölgelerde ortalama tüketim 500 m^3/h olduğundan 1 barlık düşüş, şebekenin enerji verimliliği açısından önemli bir kazanımdır. Öte yandan Alt Bölgenin girişinde BKV ile uygulanan 4 barlık düşme için türbin ile enerji geri kazanımı yapılırsa şebeke enerji verimliliği çok daha fazla olacaktır.

Uygulamanın zorluklarına gelindiğinde ise öncelikli olarak şunu belirtebiliriz; Şebekedeki boru çapları, önerilen yönteme göre yetersiz kalıyorsa ilave boru hatları gerekecek ve/veya sınır vanalarının konumları değiştiğinden ilave vana gereksinimi olacaktır. Bu durum şebekenin yeniden planlanmasına bağlı olarak gelişen ekstra bir yatırım maliyetidir. Maliyetin büyüklüğü gerekli miktara göre bölgeye özel değerlendirilmelidir. İkinci olarak ise, sistemin bir tür ara terfi merkezi görevi yapması yedekli çalışmayı gerektirecek ve yatırım maliyetini artıracaktır. Yani hem türbin hem pompa arada depo olmadan doğrudan abonelere su iletiminde çalışacağından sürekliliğin sağlanması gerekmektedir. Bu durum yedekleri ile dönüşümlü çalışmayı zorunlu kılar, dolayısıyla da yatırım maliyetini artırır. Önerilen sistemin ekonomik açıdan uygun olup olmadığına, hedeflenen şebeke alanına özel değerlendirilip karar verilmelidir. Hiç şüphesiz yönetmeliklerdeki basınç limitleri, yeni depoların yapılması ile DMA sınırlarının yeniden planlanmasını gerektirmekte ve şebekelerdeki inşaat, pompa, boru, vana vb. gerekli imalatlar yatırım maliyetlerini doğal olarak artırmaktadır. Bu yatırımların yapılmasının mümkün olmadığı ya da kısmen yapılabildiği durumlarda ise ister istemez farklı basınç yönetim uygulamaları gündeme gelmektedir.

Yöntem, mevcut hidrolik enerjiyi kendi içinde değerlendirerek daha dengeli bir basınç dağılımı sunmayı hedeflemektedir. Dolayısıyla enerji dönüşümleri ile kaybolan enerji daha az olacağından enerji geri kazanım türbinleriyle karşılaştırıldığında özgün bir değeri vardır. Öte yandan sistemde ikincil derecede çıktı olarak enerji geri kazanım durumu da söz konusudur.

Şebeke basınç yönetiminde bazı durumlar için alternatif olabilecek bu yöntemde daha belirgin sonuçlar elde edilebilmesi, hiç şüphesiz deneysel ve pilot uygulama çalışmaları ile sağlanabilecektir.

5. Kaynaklar

[1] https://mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=19651&mevzuatTur=KurumVeKurulus Yonetmeligi&mevzuatTertip=5 (Erişim Tarihi: 03.11.2025)

[2] https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/09/20200923-4.htm (Erişim Tarihi: 03.11.2025).

[3] İller Bankası (2013), İçme suyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname, İller Bankası Anonim Şirketi

[4] İSKİ, (2025), İçme ve Kullanma Suyu Su Depoları Projelerinin Hazırlanması T. Ş.

[5] İSKİ, (2024), İçme ve Kullanma Suyu Şebeke Projelerinin Hazırlanması T. Ş.

[6] N. Fontana, M. Giugni, L. Glielmo , G. Marini, R. Zollo, “Operation of a Prototype for Real Time Control of Pressureand Hydropower Generation in Water Distribution Networks” Springer Nature, Water Resources Management (2019), 33:697–712, https://doi.org/10.1007/s11269-018-2131-1

[7] Shojaeefard M. H., Saremian S., “Studying the Impact of Impeller Geometrical Parameters on the High-Efficiency Working Range of Pump As Turbine (PAT) Installed In the Water Distribution Network” Elsevier Renewable Energy 216 (2023) 119060, https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119060

[8] Bideris-Davos A. A. ve Vovos P. N., (2024 – 2) “Techno-Economic Design And Placement Tool For Energy Recovering Pressure Regulating Turbines İn Water Distribution Systems” Elsevier Renewable Energy 237 (2024) 121460, https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121460

[9] Sinagra M., Creaco E., Morreale G., Tucciarelli T., “Energy Recovery Optimization by Means of a Turbine in a Pressure Regulation Node of a Real Water Network Through a Data-Driven Digital Twin” Springer Water Resources Management (2023) 37:4733–4749 https://doi.org/10.1007/s11269-023-03575-0

[10]. McNabola A., Coughlan P., Williams A. (2014) “Energy recovery in the water industry: an assessment of the potential of micro-hydropower” WILEY Water And Environment Journal, 28 (2) (2014), pp. 294-304, 10.1111/wej.12046

11] Armando Carravetta, Lauro Antipodi, Umberto Golia and Oreste Fecarotta, “Energy Saving in a Water Supply Network by Coupling a Pump and a Pump As Turbine (PAT) in a Turbopump” MDPI Water 2017, 9(1), 62; https://doi.org/10.3390/w9010062

[12] Maria Cristina Morani, Armando Carravetta, Oreste Fecarotta, and Aonghus McNabola (2020) “Energy Transfer from the Freshwater to the Wastewater Network Using a PAT-Equipped Turbopump” MDPI Water 2020, 12(1), 38; https://doi.org/10.3390/w12010038

[13] https://sps.standartpompa.com/bin/standartpompaV3.dll?RQID=F8ECA1AA93CE407B85B77E0EEAB2510B (Erişim Tarihi: Ocak 2026).

İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde DMA Uygulama İşlerinin Seçim ve Sıralaması: Vaka Temelli Uzman Değerlendirmesine Dayalı Bir Karar Destek Modeli

Ender ACAR*
İSKİ, Asya Su Kayıpları ve Basınç Yönetimi Şube Müdürlüğü, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye
İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
acare@iski.gov.tr

Mehmet Melih KOŞUCU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye/ İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
0000-0001-5907-6964
kosucu@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: DMA tasarım işlerinin seçim ve sıralaması, çok kriterli karar verme, Best-Worst Method, vaka temelli uzman değerlendirmesi, su kaybı yönetimi.

1. Amaç

Su idareleri, üretilen suyun önemli bir kısmını dağıtım şebekesindeki fizikî ve idarî kayıplar nedeniyle faturalandıramamakta; bu durum uluslararası literatürde Faturalandırılmamış Su (Non-Revenue Water – NRW) kavramıyla ifade edilmektedir [1]. Şebekelerin hidrolik olarak izole edilmiş alt bölgelere, yani Ölçüm Bölgelerine (District Metered Area – DMA) ayrılması; kayıp-kaçak izlemenin ve basınç yönetiminin bölgesel ölçekte uygulanabilmesi açısından su kaybı yönetiminin merkezinde yer almaktadır [2]. Büyük ölçekli bir su idaresinde aynı anda çok sayıda DMA tasarım/imalat projesinin yürütülmesi gerektiğinde, saha ekiplerinin, bütçenin ve mühendislik kaynaklarının sınırlılığı nedeniyle hangi aday DMA'nın önce ele alınacağı sorusu, uygulamada sıklıkla informal, tecrübeye dayalı ve açıkça gerekçelendirilmemiş biçimde yanıtlanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, İstanbul (İSKİ hizmet bölgesi) örneklerinden yola çıkarak, DMA tasarım/imalat işlerinin sistematik, tekrarlanabilir ve gerekçelendirilebilir biçimde seçilip sıralanmasına imkân tanıyan, genel geçerliliğe sahip, çok kriterli karar verme (ÇKKV) tabanlı bir karar destek modeli oluşturmaktır. Çalışma iki adımlı bir mantıkla kurgulanmıştır: önce on ana kriterin DMA tasarım sürecindeki önemi literatür temelli olarak gerekçelendirilmiş, ardından bu kriterlere uygun somut DMA örnekleri aday havuzundan seçilmiştir. Önerilen model; klasik Analitik Hiyerarşi Süreci'nin (AHP) [3] tutarlılık denetim mekanizması ile En İyi-En Kötü Yöntemin (Best-Worst Method – BWM) [4] az sayıda karşılaştırma gerektiren pratikliğini birleştiren, ancak kriter karşılaştırmalarını soyut kriter adları yerine sahadan derlenmiş somut DMA "vaka kartları" üzerinden yaptıran hibrit bir yaklaşımdır. Çalışma, uzman panelinin henüz uygulanmadığı bir tasarım/geliştirme aşamasında olup, bu bildiride modelin mimarisi, sahadan derlenen 20 temsilci DMA örneğiyle birlikte sunulmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

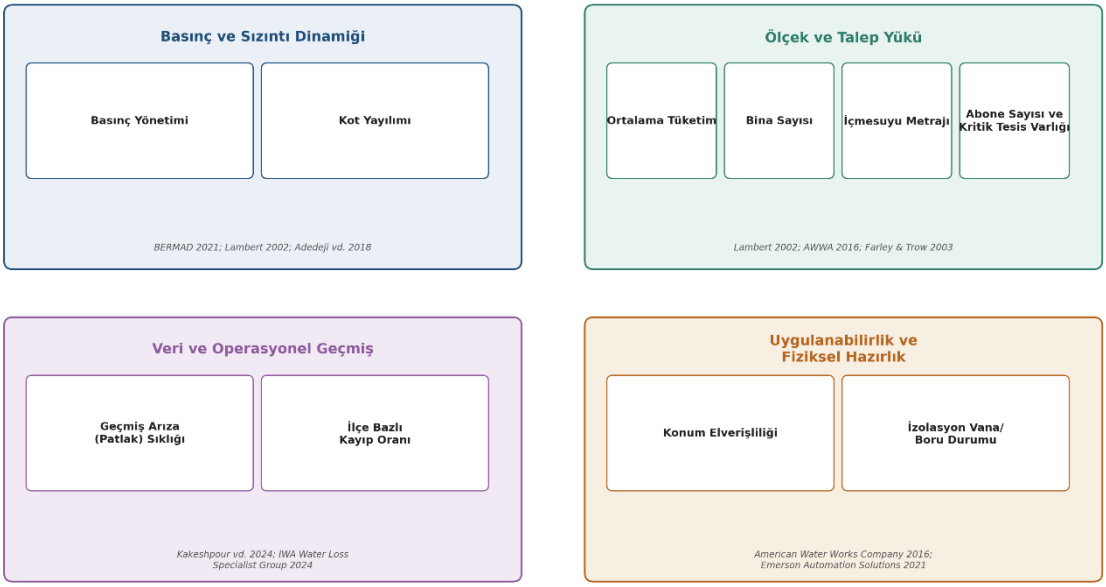
2.1 Çalışma Alanı ve Aday DMA Havuzu

Çalışma alanı, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (İSKİ) hizmet bölgesinde tasarım/imalat sırası bekleyen aday DMA'lardan oluşan bir havuzdur; adaylar Ümraniye, Şile, Kadıköy, Pendik, Kartal, Sancaktepe, Sultanbeyli ve Çekmeköy gibi Anadolu yakası ilçelerine dağılmaktadır. Aşağıda tanıtılan on ana kriterin her biri DMA bazında ölçülebilir nitelikte olup, her biri için havuzdan en uygun iki temsilci DMA belirlenmiştir; bir DMA birden fazla kritere aday olduğunda mükerrer gösterimden kaçınmak amacıyla yalnızca en baskın olduğu kriteri temsil edecek şekilde bir kez listelenmiştir. Bu yolla, on kriterin tamamını temsil eden toplam 20 DMA'lık bir vaka kartı seti oluşturulmuştur.

2.2 Önceliklendirme Kriterleri

Literatür taramasından elde edilen bulgular ışığında, DMA tasarım/imalat işlerinin seçim ve sıralamasında kullanılabilecek on kriter, dört tematik grup altında toplanmıştır (Şekil 1): Basınç ve sızıntı dinamiği [5,8], ölçek ve talep yükü [6,8], veri ve operasyonel geçmiş [12] ve uygulanabilirlik/fiziksel

hazırlık [13]. Konum Elverişliliği kriteri, kendi içinde trafik sirkülasyonu, çevredeki altyapı yoğunluğu, hidrolik denge noktasına yakınlık, işletme sağlığı ve telemetri/enerji erişilebilirliği olmak üzere beş alt kritere ayrılan, eşik niteliğinde bir kriterdir ve literatürde nicel bir önceliklendirme kriteri olarak nadiren ele alınan, saha deneyiminden türetilmiş özgün bir boyutu temsil etmektedir.



Şekil 1. On kriterin tematik gruplandırması ve literatür dayanağı özeti

2.3 Vaka Temelli Ağırlıklandırma Yöntemi

Kriter ağırlıklarının uzman görüşüyle elde edilmesinde kullanılan klasik AHP, n=10 kriter için 45 ikili karşılaştırma gerektirirken [3], BWM bu sayıyı yalnızca en iyi ve en kötü kriterin diğerleriyle karşılaştırılmasına indirgeyerek 2n-3=17'ye düşürmektedir [4]. Ancak her iki yöntem de karar vericiden soyut kriter adları üzerinden yargıda bulunmasını istediğinden, sahadan kopuk ve yapay bir değerlendirme ortamı yaratma riski taşımaktadır. Bu çalışmada önerilen yaklaşım, BWM'nin karşılaştırma yapısını korurken, soyut kriter isimleri yerine Şekil 2'de özetlenen gerçek DMA vaka kartlarını karşılaştırma nesnesi olarak kullanan hibrit bir tasarımdır: uzmandan, örneğin "Basınç Yönetimi kriterinin Bina Sayısı kriterinden ne kadar önemli olduğu" soyut biçimde sorulmak yerine, "ŞL30 (basınç yönetimi potansiyeli yüksek) ile Y-ÜMR 7 (bina sayısı yüksek) bölgelerinden hangisinin önce yapılacağı" sorulmaktadır; verilen yanıt, iki DMA'nın baskın olduğu kritere dolaylı bir öncelik ataması anlamına gelmektedir.

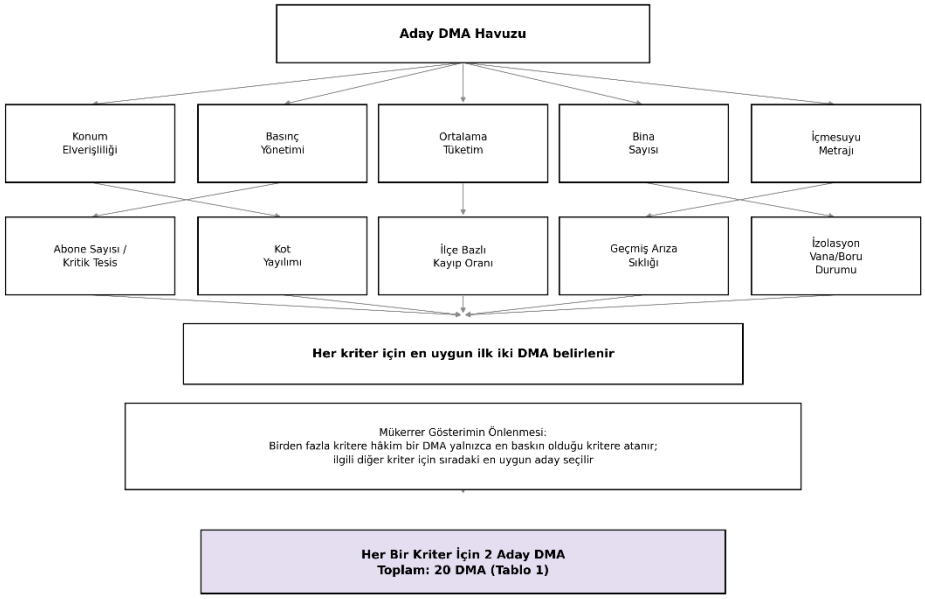
Yöntem dört adımdan oluşmaktadır: (i) her uzmanın Best-to-Others ve Others-to-Worst vektörleri, Rezaei'nin (2015) doğrusal olmayan min-max optimizasyon modeliyle çözülerek bireysel ağırlık vektörüne ve tutarlılık oranına dönüştürülür [4]; (ii) bireysel ağırlıklar, Forman ve Peniwati'nin önerdiği geometrik ortalama yöntemiyle [9] tek bir grup ağırlık vektöründe (wgrup) birleştirilir ve Saaty ile Vargas'ın dağılım testiyle [10] uzmanlar arası görüş ayrılığı denetlenir; (iii) wgrup ağırlıklarıyla TOPSIS [11] uygulanarak elde edilen model sıralaması, uzmanların ayrıca yanıtladığı bağımsız tam sıralama sorusuyla Spearman sıra korelasyon katsayısı (ρ) üzerinden çapraz doğrulanır; (iv) ağırlıklarda ±%10-20 aralığında senaryo bazlı değişiklikler uygulanarak sıralamanın duyarlılığı sınanır.

2.4 Uzman Anketinin Tasarımı

Grup tahmininin güvenilirliği açısından panelin; saha uygulama mühendisi, işletme/bakım sorumlusu, ölçüm-sayaç uzmanı ve hidrolik model/planlama mühendisi gibi farklı rolleri temsil eden, birbirinin yanıtını görmeden bağımsız değerlendirme yapacak en az 8-12 katılımcıdan oluşması öngörülmüştür. Anket; (0) katılımcı tanıtımı ve tarama, (1) 20 DMA vaka kartı ve bir kriter açıklama kartı arasından En İyi/En Kötü seçimi, (2)-(3) Saaty'nin 1-9 ölçeğiyle [3] yoğunluk puanlaması ve (4) 20 DMA'nın tam sıralanması olmak üzere beş bölümden oluşmakta ve toplam uygulama süresinin 20-30 dakika arasında kalması hedeflenmektedir.

3. Değerlendirme

Çalışma, uzman panelinin henüz uygulanmadığı bir geliştirme aşamasında olduğundan, bu bölümde nihai ağırlık ve sıralama sonuçları yerine, önerilen yöntemin sahadan derlenen somut verilerle ne ölçüde temellendirildiği değerlendirilmektedir. Şekil 2, aday havuzundan kritere özgü seçim yönteminin akış şemasını; Tablo 1 ise on kriterin tamamı için havuzdan seçilen öne çıkan temsilci DMA'ları özetlemektedir. Örneğin Pendik ilçesindeki PND05, aylık 294460,5 m³ ile havuzdaki en yüksek ortalama tüketime; Şile ilçesindeki ŞL30, 6,56 bar ile en yüksek planlı basınç düşürme potansiyeline; Sancaktepe ilçesindeki SCK28 ise yalnızca 2 m ile havuzdaki en düşük kot yayılımına sahiptir. Kadıköy ilçesindeki KDY07 ise komşu DMA'larla karışmaya yol açabilecek sıfır adet sınır vana/boru sayısıyla, izolasyon güvenilirliği açısından havuzdaki en uygun konumdadır; Şile ilçesindeki ŞL16 ise 8 boru kırığı, 108 şube yolu ve 6 hidrant arızasıyla havuzdaki en yüksek geçmiş arıza yüküne sahiptir. Bu somut büyüklükler, uzman anketinde kullanılacak "hangi bölge önce yapılmalı" sorularının, klasik AHP/BWM'nin soyut kriter karşılaştırmalarından farklı olarak, doğrudan doğrulanabilir saha verisine dayandığını göstermektedir.



Şekil 2. Aday DMA havuzundan kritere özgü seçim yönteminin akış şeması

Tablo 1. On kriterin tamamı için aday havuzundan seçilen öne çıkan temsilci DMA'lar

Kriter	Temsilci DMA	Öne Çıkan Saha Değeri
Konum Elverişliliği	ÜMR17	5 alt kriterin birleşik puanında havuzdaki en yüksek
Basınç Yönetimi	ŞL30	Planlanan minimum basınç yönetimi değeri: 6,56 bar
Ortalama Tüketim	PND05	Aylık ortalama 294.460,5 m³ (havuzdaki en yüksek)
Bina Sayısı	Y-ÜMR 7	5.460 bina (havuzdaki en yüksek)
İçmesuyu Metrajı	ŞL28	95.491 m hat uzunluğu (havuzdaki en uzun)
Abone Sayısı ve Kritik Tesis	KRT08	12.118 abone, 1.701 bina
Kot Yayılımı	SCK28	2 m kot farkı (verisi doğrulanan adaylar arasında en düşük)
Geçmiş Arıza Sıklığı	ŞL16	8 boru kırığı, 108 şube yolu, 6 hidrant, 5 priz arızası (toplam 127, havuzdaki en yüksek)
İlçe Bazlı Kayıp Oranı	ŞL21	Bulunduğu ilçenin (Şile) kayıp oranı: %49,18 (havuzdaki en yüksek)
İzolasyon Vana/Boru Durumu	KDY07	Karışmaya sebep olan sınır vana/boru sayısı: 0 (havuzdaki en düşük)

Tablo 2. Grup ağırlıklarının elde edilmesi ve doğrulanmasına yönelik planlanan dört adımlı analiz akışı

Adım	İçerik
1	Bireysel BWM çözümü (min-max optimizasyon modeli) ve tutarlılık oranı kontrolü
2	Geometrik ortalama ile grup ağırlığının konsolidasyonu ve dağılım testi
3	TOPSIS sıralamasının, uzmanların tam sıralama sorusuyla Spearman ρ üzerinden çapraz doğrulanması
4	±%10-20 senaryolu duyarlılık analizi

Toplam yirmi temsilci DMA vaka kartıyla on kriterin tamamı artık saha verisiyle temellendirilmiş olsa da, çalışmanın mevcut sınırlılığı uzman panelinin henüz uygulanmamış olması, dolayısıyla nihai kriter ağırlıkları ve DMA sıralamasının bu bildiride sunulamamasıdır. Öte yandan, modelin çıktısının hem TOPSIS tabanlı bir sıralama hem de uzmanların bağımsız tam sıralamasıyla Spearman ρ üzerinden çapraz doğrulanacak olması ve ±%10-20 duyarlılık analizine tabi tutulması, yöntemin yalnızca matematiksel olarak tutarlı değil, aynı zamanda saha pratiğiyle uyumlu sonuçlar üretmesini güvence altına almayı amaçlamaktadır.

4. Sonuçlar

İçme suyu dağıtım şebekelerinde DMA tasarım/imalat işlerinin vaka temelli uzman değerlendirmesiyle seçim ve sıralamasına yönelik bu çalışmadan elde edilen temel bulgular ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- Büyük ölçekli su idarelerinde, sınırlı kaynaklarla eş zamanlı yürütülen çok sayıda DMA tasarım/imalat projesi arasında hangisinin önce ele alınacağı kararı, uygulamada sıklıkla informal ve açıkça gerekçelendirilmemiş biçimde verilmektedir; bu durum kurumsal şeffaflık ve yatırım etkinliği açısından risk oluşturmaktadır.
- AHP, TOPSIS, DEMATEL, bulanık ÇKKV yöntemleri, BWM, MACBETH ve seçime dayalı deney gibi yöntemlerin literatür değerlendirmesi, her birinin güçlü ve sınırlı yönleri olduğunu; bu nedenle tek bir yönteme dayanmak yerine bütünleşik/hibrit bir tasarımın daha sağlam sonuçlar üretme potansiyeli taşıdığını göstermiştir.
- Önerilen model, BWM'nin az sayıda karşılaştırma gerektiren pratik yapısını korurken, kriter karşılaştırmalarını geniş bir aday DMA havuzundan seçilen 20 somut vaka kartı üzerinden yaptırarak, uzman değerlendirmesini sahaya özgü ve gerçekçi bir bağlama oturtmaktadır.
- Model çıktısının (grup ağırlıkları ve TOPSIS sıralaması), uzmanların bağımsız olarak verdiği tam sıralamayla Spearman korelasyonu üzerinden çapraz doğrulanması ve ±%10-20 senaryolu duyarlılık analiziyle sınanması planlanmaktadır.
- Çalışmanın bir sonraki adımı, on kriterin tamamını temsil eden 20 DMA'lık vaka kartı setiyle 8-12 kişilik uzman panelinin ankete tabi tutulmasıdır; bu adımın tamamlanmasıyla nihai kriter ağırlıkları ve 20 DMA'lık öncelik sıralaması elde edilecektir.

5. Kaynaklar

[1] IWA Water Loss Task Force. (2003). Assessing non-revenue water and its components: A practical approach. Water 21, 5(4), 63–65.

[2] IWA Water Loss Specialist Group. (2024). District metered areas: Guidance notes for DMA management (2. baskı). International Water Association.

[3] Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill.

[4] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega, 53, 49-57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

[5] Ciaponi, C., & Creaco, E. (2015). Different design criteria for district metered areas in water distribution networks. Procedia Engineering, 119, 983-992.

[6] Amorocho-Daza, H., Cabrales, S., Santos, R., & Saldarriaga, J. (2019). A new multi-criteria decision analysis methodology for the selection of new water supply infrastructure. Water, 11(4), 805. https://doi.org/10.3390/w11040805

[7] Sandoval, A., Requelme, N., & Cachipuendo, C. (2025). Multi-criteria decision making (MCDM) methodology for the prioritization of technical irrigation projects. Water Policy, 27(8), 804-822.

[8] Lambert, A. (2002). International report: Water losses management and techniques. Water Science and Technology: Water Supply, 2(4), 1-20.

[9] Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 108(1), 165–169.

[10] Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2007). Dispersion of group judgments. Mathematical and Computer Modelling, 46(7-8), 918–925.

[11] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer-Verlag.

[12] Caetano, J., Carriço, N., & Covas, D. (2022). Lessons learnt from the application of MCDA sorting methods to pipe network rehabilitation prioritization. Water, 14(5), 736. https://doi.org/10.3390/w14050736

[13] Mottahedin, A., Giudicianni, C., Di Nunno, F., Granata, F., Cunha, M., Walski, T., & Creaco, E. (2024). Analysis, design, and maintenance of isolation valves in water distribution networks: State of the art review, insights from field experiences and future directions. Water Research, 262, 122088. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122088

Ayazağa İçme Suyu Şebekesinin Hidrolik Modellenmesi ve SCADA Verisiyle Kalibrasyonu

Ardıl BARAN*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469 Sarıyer/İstanbul
baran20@itu.edu.tr

Mehmet Ali KARA
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469 Sarıyer/İstanbul
karam19@itu.edu.tr

Ardan Türkay SARAL
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469 Sarıyer/İstanbul
saral20@itu.edu.tr

Ömer Melih ÇINAR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469 Sarıyer/İstanbul
cinaro19@itu.edu.tr

İbrahim ÖZARSLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469 Sarıyer/İstanbul
ozarslan17@itu.edu.tr

Ufuk BAL
İSKİ, Avrupa Su Kayıpları ve Basınç Yönetimi Şube Müdürlüğü, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye
ubal@iski.gov.tr

Mehmet Melih KOŞUCU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye/ İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
0000-0001-5907-6964
kosucu@itu.edu.tr

Erdal KESGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye-0000-0002-9441-5359
kesgine@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: içme suyu şebekesi, hidrolik modelleme, kalibrasyon, su kaybı, basınç yönetimi

1. Amaç

İçme suyu dağıtım şebekeleri, suyu kaynaktan abonelere yeterli debi ve basınçla iletmesi beklenen, kentsel altyapının en yüksek yatırım değerine sahip bileşenlerinden biridir. Boruların büyük bölümünün yer altında bulunması, su kayıpları ve istenmeyen yüksek basınçlar gibi işletme sorunlarının doğrudan gözlenmesini güçleştirmekte; bu durum, ölçüm verisiyle birlikte kullanılan hidrolik modellemeyi güçlü bir yönetim aracı hâline getirmektedir [1].

Ülkemizdeki içme suyu şebekelerinin başlıca iki yapısal sorunu, yüksek su kayıpları ve istenmeyen yüksek basınç değerlerinin görülmesidir. Şebekeye verilen su ile abonelere faturalandırılan su arasındaki fark olarak tanımlanan gelir getirmeyen su, fizikî kaçaklar ve idarî kayıpları kapsamaktadır [2]. Şebekelerin verimli yönetimi için bu kayıpların asgari düzeye indirilmesi gerekmektedir. Dik

topoğrafyalı ve tek kaynaktan beslenen şebekelerde ise basınç, yüksek kotlarda yetersiz, alçak kotlarda aşırı olabilmektedir. Fizikî kayıplar büyük ölçüde servis basıncına bağlı olduğundan, hidrolik modelleme hem kayıpların temsil edilmesine hem de yüksek basınçlı riskli bölgelerin tespitine olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı; Ayazağa (Sarıyer, İstanbul) içme suyu dağıtım şebekesinin genişletilmiş periyotlu hidrolik modelini kurmak, modeli İSKİ SCADA debi verisiyle kalibre etmek ve kalibre model üzerinden şebekenin su dengesini ve basınç dağılımını tahmin etmektir. Çalışmanın literatüre katkısı iki yönlüdür: talep paterni ve üniform emitter katsayısı bileşenlerinin kalibrasyonda ayrı ayrı ayarlanması ve çoğu çalışmada bağımsız ele alınan su kaybı ile servis basıncının aynı kalibre model üzerinde simüle edilmesidir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma alanı, İstanbul'un Avrupa yakasında, Sarıyer ilçesindeki Ayazağa Mahallesi ve yakın çevresidir. Bölge; konut, ticaret, kampüs ve kurumsal kullanımların bir arada bulunduğu görece dik bir topoğrafyaya sahiptir.

Şebeke geometrisi, eleman özellikleri ve abone bilgileri İSKİ tarafından sunulan veriden alınmış; düğüm kotları coğrafi yükseklik verisinden türetilmiştir. Kalibrasyonda, çalışma alanını besleyen Sarıyer ölçüm istasyonunun 1 Aralık 2024 – 1 Ocak 2025 arasındaki 745 saatlik SCADA debi kaydı kullanılmıştır. Ham veri saat bazında ortalanarak 24 saatlik temsilî günlük profil çıkarılmıştır. Profilin ortalaması 301,40 m³/sa olup gece 05.00 dolaylarında en düşük (181,54 m³/sa), akşam 20.00'de ise en yüksek (368,75 m³/sa) değerini almaktadır.

2.2 Hidrolik Modelin Kurulması

Hidrolik model, EPANET hidrolik çözücü altyapısını temel alan [3] Bentley OpenFlows WaterGEMS yazılımıyla kurulmuştur [4]. Model; 4227 düğüm, 4044 boru ve sabit piyezometre seviyesine sahip tek bir rezervuardan oluşmaktadır. Tank, pompa ve vana bulunmadığından şebeke tek kaynaktan beslenen cazibeli bir sistemdir. Sisteme bağlanmayan elemanlar ayıklanarak simülasyonda 3534 boru ve 3376 düğüm aktif olarak kullanılmıştır. Modelin genel özellikleri Tablo 1'de, WaterGEMS ortamındaki genel görünümü ise Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hidrolik modelin genel özellikleri

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Düğüm sayısı (toplam / aktif)	4227 / 3376	Kot aralığı	15,3 – 117,5 m
Boru sayısı (toplam / aktif)	4044 / 3534	Rezervuar kotu (sabit)	140 m
Rezervuar / tank / pompa / vana	1 / 0 / 0 / 0	Hazen-Williams C	130 (üniform)
Abone bağlantısı	11776	Benzetim süresi / adım	23 sa (24 adım) / 1 sa
Talep yüklü düğüm	1549	Emitter K [L/(s·m^{0,5})] / üs (n)	0,00128 / 0,5

Boru pürüzlülüğü için şebeke genelinde tek bir Hazen-Williams katsayısı (C = 130) benimsenmiştir. Borularda sürtünme kaynaklı yük kaybı Eşitlik (1) ile hesaplanmaktadır.

$$h_f = \frac{10{,}67 \cdot L \cdot Q^{1{,}852}}{C^{1{,}852} \cdot D^{4{,}871}} \quad (1)$$

Burada h_f sürtünme kaynaklı yük kaybını [m], L boru uzunluğunu [m], Q debiyi [m³/s], C Hazen-Williams pürüzlülük katsayısını ve D boru çapını [m] göstermektedir.

Abone talepleri, 11776 abone bağlantısının sayaç verisiyle 1549 düğüme dağıtılmıştır. Talep, kullanım türüne göre dokuz kategoriye (mesken, ticaret, okul, resmî, askerî, sulama, sanayi, site ortak ve inşaat) ayrılmış ve her kategori için günlük bir talep paterni tanımlanmıştır. Abonelerin yaklaşık %96'sı mesken kategorisinde olup toplam talebin yaklaşık %77'sini oluşturmaktadır; toplam ortalama sayaçlı tüketim 184,2 m³/sa'dir.



Şekil 1. Ayazağa şebekesinin WaterGEMS modelindeki genel görünümü

Sistem giriş debisi ile sayaçlı tüketim arasındaki fark, aktif düğümlerin tamamına atanan üniform bir emitter debisiyle basınca bağlı kayıp olarak temsil edilmiştir; emitter debisi düğüm basıncının bir fonksiyonudur (Eşitlik 2).

$$q = K \cdot P^{n} \tag{2}$$

Burada q düğümden çıkan kayıp debisini [L/s], K emitter katsayısını [L/(s·m^{0,5})], P düğüm basıncını [m] ve n basınç üssünü göstermektedir. Basınç üssü için klasik orifis teorisine karşılık gelen n = 0,5 değeri benimsenmiştir. Üssün, boru malzemesi ve kaçak geometrisine bağlı olarak bu değerin üzerine çıkabildiği bilinmektedir [5]. Simülasyon, talebe bağlı analizle 1 saatlik zaman adımında 24 saatlik (00:00–23:00) genişletilmiş periyot için yürütülmüştür.

2.3 İki Katmanlı Kalibrasyon Yaklaşımı

Kalibrasyon, birbirinden bağımsız iki bileşen üzerinden kurgulanmıştır. Birinci bileşen, talep paternleriyle şekillenen günlük talep eğrisinin biçimidir. Başta mesken ve ticarî olmak üzere paternler, ölçülen profilin maksimum ve minimum tüketim saatlerine uyum sağlayacak şekilde kalibre edilmiştir. Bu bileşen, korelasyon katsayısı (r) ve belirleme katsayısı (R^2) gibi biçim temelli ölçütlerle değerlendirilmiştir. İkinci bileşen ise toplam sistem debisinin büyüklüğüdür ve şebeke geneline atanan üniform emitter katsayısıyla belirlenmektedir. Bu bileşen, ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE, Eşitlik 3) gibi büyüklük temelli ölçütlerle değerlendirilmiştir.

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100}{N} \sum \frac{|Q_{\mathrm{h}} - Q_{\mathrm{ö}}|}{Q_{\mathrm{ö}}} \tag{3}$$

Burada Q_{h} hesaplanan debiyi, $Q_{\mathrm{ö}}$ ölçülen debiyi ve N veri sayısını göstermektedir. Kalibrasyon öncesinde SCADA verisi ile model saati arasındaki sistematik ötelenme belirlenerek profiller senkronize edilmiştir. Optimum emitter katsayısı K, 0,00110–0,00130 aralığında sistematik olarak taranarak belirlenmiştir.

3. Değerlendirme

3.1 Kalibrasyon ve Doğrulama Başarımı

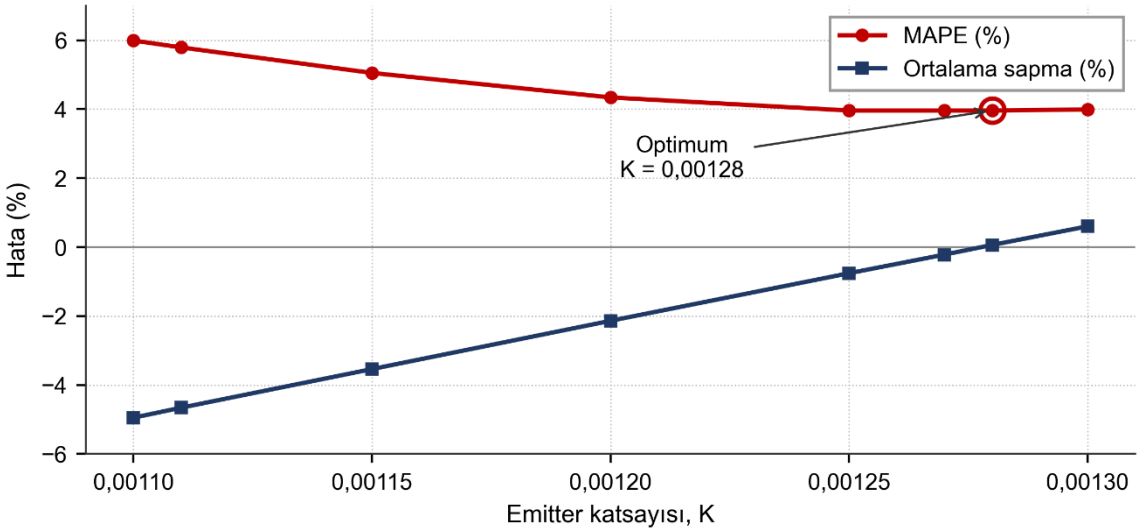
Emitter katsayısı taramasının sonuçları Tablo 2'de özetlenmiş, hata ölçütlerinin K ile değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Korelasyon katsayısı (r = 0,97) ve belirleme katsayısı (R^2 = 0,95) taranan tüm K değerlerinde sabit kalmıştır; zira emitter katsayısı debi eğrisinin yalnızca büyüklüğünü değiştirmekte, biçimini

etkilememektedir. Büyüklük temelli ölçütler ise *K* ile belirgin biçimde değişmektedir. Bu davranış, iki bileşenli kurgunun ayrışma varsayımını doğrulamaktadır.

Tablo 2. Emitter katsayısı kalibrasyon taramasının sonuçları

Emitter *K* [L/(s·m^{0,5})]	*r*	R^2	Ort. ölçüm (m³/sa)	Ort. model (m³/sa)	MAE (m³/sa)	MAPE (%)	Ort. sapma (%)
0,00110	0,97	0,95	301,40	286,49	18,01	5,99	−4,95
0,00111	0,97	0,95	301,40	287,35	17,40	5,79	−4,66
0,00115	0,97	0,95	301,40	290,74	15,17	5,05	−3,54
0,00120	0,97	0,95	301,40	294,94	12,82	4,34	−2,14
0,00125	0,97	0,95	301,40	299,10	11,44	3,96	−0,76
0,00127	0,97	0,95	301,40	300,75	11,31	3,96	−0,22
0,00128 *	0,97	0,95	301,40	301,58	11,26	3,96	+0,06
0,00130	0,97	0,95	301,40	303,22	11,21	3,99	+0,60

* Optimum katsayı.



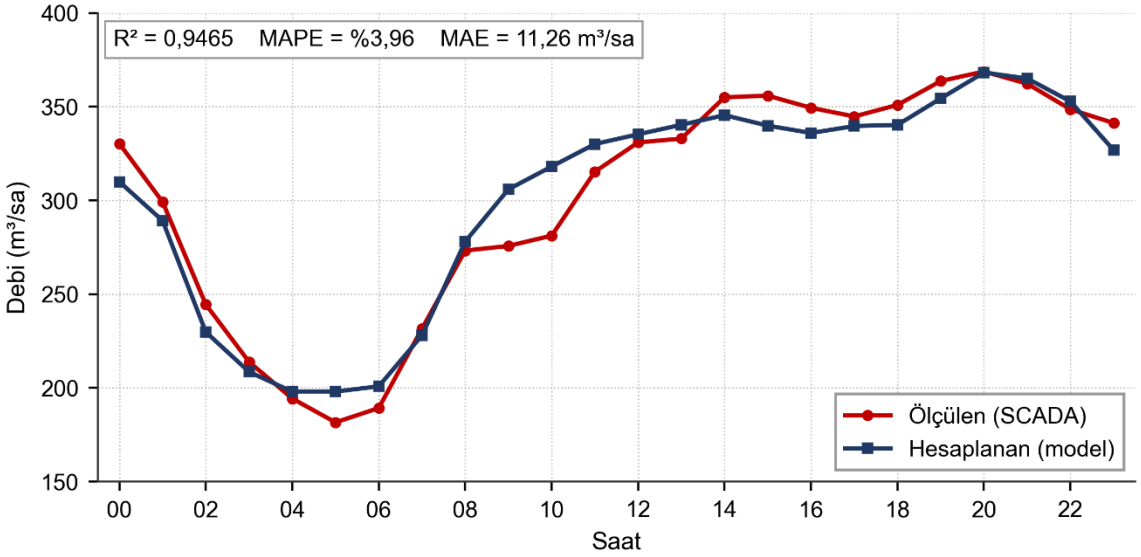
Şekil 2. Emitter katsayısına karşı ortalama mutlak yüzde hata ve ortalama sapmanın değişimi

En düşük ortalama mutlak yüzde hata (%3,96), K = 0,00125–0,00128 aralığında elde edilmiştir. *K* = 0,00130'da MAE bir miktar daha düşük (11,21 m³/sa) olsa da MAPE (%3,99) ve ortalama sapma (+%0,60) artmaktadır. Optimum katsayı, aynı MAPE değerini veren adaylar arasında ortalama sapmayı sıfıra en yakın (+%0,06) taşıyan *K* = 0,00128 olarak seçilmiştir; bu değerde ortalama model debisi 301,58 m³/sa, ortalama ölçüm 301,40 m³/sa ve ortalama mutlak hata 11,26 m³/sa'dir.

Seçilen katsayıyla kurulan modelin 24 saatlik debi sonuçları Şekil 3'te sunulmuştur. Doğrulama ölçütleri; korelasyon katsayısı *r* = 0,9729, belirleme katsayısı R^2 = 0,9465, ortalama mutlak hata 11,26 m³/sa ve ortalama mutlak yüzde hata %3,96 olarak hesaplanmıştır. En yüksek sapmalar sabah talep yükselişinde, 09:00 (+30,2 m³/sa) ve 10:00'da (+36,9 m³/sa) gözlenmiştir; 10:00'daki sapmanın yaklaşık 9 m³/sa'lik bölümü, ham verideki tek sıfır kaydının (sayaç kesintisi) bu saatin ortalamasını düşürmesinden kaynaklanmaktadır. Yaygın kabul ölçütü olan ±%5–10 ortalama sapma bandı [1], [6] göz önüne alındığında, elde edilen %3,96'lık değer bu bandın belirgin biçimde altındadır.

3.2 Su Dengesi ve Kayıp

Kalibre model, çalışmanın kabulleri altında sistem giriş debisi ile atanan sayaçlı tüketim arasındaki farkı tahmin etmektedir (Tablo 3). Sayaca dayalı ortalama talep 184 m³/sa, kalibre toplam sistem giriş debisi ise 301 m³/sa'dir. Aradaki yaklaşık 117 m³/sa'lik fark, toplam debinin yaklaşık %39'una karşılık gelmekte ve gelir getirmeyen su tanımıyla örtüşmektedir.



Şekil 3. Kalibrasyon sonrası 24 saatlik ölçülen ve hesaplanan debilerin karşılaştırması

Tablo 3. Kalibre model ile elde edilen sistem su dengesi

Bileşen	Debi (m³/sa)	Oran (%)
Sayaçlı tüketim (atanan talep)	184	61
Giriş debisi – sayaçlı tüketim farkı (emitter ile temsil)	117	39
Toplam sistem giriş debisi (kalibre)	301	100

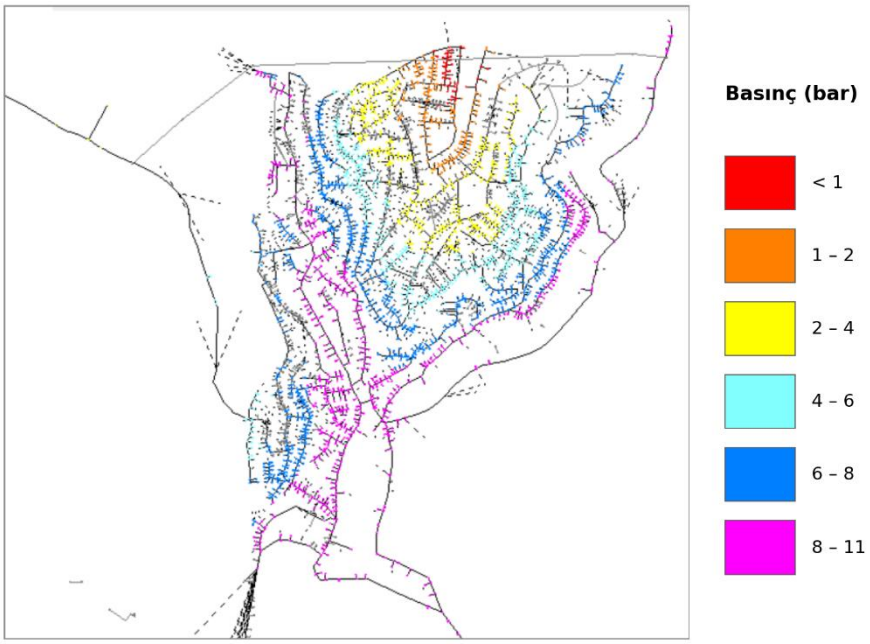
Bu tahmin, minimum gece debisi yaklaşımıyla bağımsız olarak sınanmıştır [7]. SCADA'da 05.00 dolaylarındaki minimum gece debisi yaklaşık 181 m³/sa, talep paternlerinden aynı saat için hesaplanan izinli gece tüketimi ise yaklaşık 75 m³/sa'dir. Aradaki yaklaşık 106 m³/sa'lik fark, gece kaçağının ölçüme dayalı tahminidir ve kalibre modelin verdiği 117 m³/sa'lik günlük ortalama farkla aynı mertebededir. Karşılaştırma oran yerine debi üzerinden yapılmalıdır; gece kaçağının o saatteki debiye oranı (≈%59), talebin düşük olması nedeniyle günlük ortalama orandan (%39) doğal olarak yüksektir. Modelde gece basıncının yükselmesiyle emitter debisi artarak 05.00'te yaklaşık 123 m³/sa'e (≈198 − 75) ulaşmakta; modelin bu saatte ölçümü yaklaşık 16 m³/sa (%9) aşması bu davranışın sonucudur. Aradaki fark, izinli gece tüketimindeki belirsizlik ve tek bir üniform emitter katsayısı kullanımıyla açıklanabilir düzeydedir.

Bulunan fark; fizikî kaçakları, idarî kayıpları ve talep atama hatalarını birlikte içeren toplam bir tahmindir; emitter yalnızca basınca bağlı fizikî kaçağı temsil ettiğinden bu bileşenler ayrıştırılmamıştır. İSKİ'nin İstanbul geneli için açıkladığı su kaybı oranı 2024 yılı sonunda yaklaşık %18,63 [8], ülke genelindeki oran ise %30–40 bandındadır [9]. Çalışma alanı için bulunan oran şehir ortalamasının üzerinde olmakla birlikte, basınç yönetimi bulunmayan ve boru yaşı yüksek bir bölge için olağan dışı değildir.

3.3 Modelin Tahmin Ettiği Basınç Dağılımı

Debi verisiyle kalibre edilen modelin tahmin ettiği basınç dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Bu sonuçlar saha basınç ölçümüyle doğrulanmamış model tahminleridir. Basınç, yaklaşık 117 m kotundaki yüksek bölge düğümlerinde 0,74 bara kadar düşmekte, yaklaşık 18 m kotundaki alçak bölge düğümlerinde ise 10,67 bara ulaşmaktadır. Bu geniş aralık yapısaldır: yaklaşık 102 m kot farkına sahip şebeke tek bir 140 m kotlu kaynaktan beslenmekte, basınç kademelendirmesi ve basınç düşürücü vana bulunmadığından kaynak piyezometre seviyesi tüm kotlara doğrudan yansımaktadır. Ülkemizde kabul edilen işletme basıncı sınırları yaklaşık 30–80 mSS (≈ 3–8 bar) olup bu sınırlara uyulamaması hâlinde şebekenin basınç bölgelerine ayrılması önerilmektedir [10]; şebeke bu aralığın her iki ucunun da dışına çıkmaktadır. Bu durum, bölgedeki topoğrafik değişkenliğin doğrudan sonucudur. Kabul edilen işletme basıncı bandının genişliği 50 m iken şebekedeki kot farkı yaklaşık 102 m'dir. Dolayısıyla tek bir piyezometre seviyesi, yük kayıpları ihmal edilse dahi tüm noktalarda bu bandın içinde kalınmasını sağlayamaz. Statik koşulda 140 m'lik kaynak seviyesi, yaklaşık 60 m kotunun altındaki noktalarda 80 m sınırının aşılmasına, 110 m kotunun üstündeki düğümlerde ise 30 m sınırının altına düşülmesine yol açmaktadır. Bu nedenle bölgede etkin bir basınç yönetimi, şebekenin en az üç basınç bölgesine

ayrılmasını gerektirmektedir. Alçak kotlu bölgelerde basınç düşürücü vanalar hem aşırı basıncı hem de basınca bağlı kaçağı azaltacak; yüksek kotlu ve yeni yapılaşmanın yoğunlaştığı bölgelerde ise yeterli servis basıncı ancak terfi ile sağlanabilecektir.



Şekil 4. Debi verisiyle kalibre edilen modelin tahmin ettiği şebeke basınç dağılımı

4. Sonuçlar

Ayazağa şebekesinin kalibre genişletilmiş periyotlu hidrolik modeli, belirleme katsayısı R^2 = 0,9465 ve MAPE %3,96 ile saha debi verisiyle yüksek uyum göstermiştir. Model hatası ±%5–10 kabul bandının altında kalmıştır.

Talep paterni (biçim) ile emitter katsayısı (büyüklük) bileşenlerini ayıran iki katmanlı kalibrasyon kurgusu, modellemenin başarısını arttırmıştır. Talep paterni parametreleri biçim ölçütlerini (r, R^2) etkilerken, emitter katsayısı yalnızca büyüklük temelli hata ölçütlerini (MAE, MAPE) etkilemiştir.

Sayaçlı tüketim 184 m³/sa, kalibre sistem giriş debisi ise 301 m³/sa'dir; aradaki yaklaşık %39'luk fark, bileşenlerine ayrıştırılmamış gelir getirmeyen suya karşılık gelmekte ve bağımsız minimum gece debisi analiziyle aynı mertebede bulunmaktadır.

Model tahminlerine göre basınç, yüksek kotlarda 0,74 bara düşerken alçak kotlarda 10,67 bara ulaşmakta ve şebeke, kabul edilen 3–8 bar aralığının dışında bölgeler içermektedir; bu tahminler saha basınç ölçümüyle doğrulanmalıdır.

Su kaybı ile basınç sorunları birbirinden bağımsız değildir; alçak kotlardaki aşırı basınç, basınca bağlı kaçağı doğrudan beslemektedir. Basınç bölgelerine ayırma ve basınç düşürücü vana uygulaması, arıza riskini ve kayıpların bir bölümünü eşzamanlı azaltacak ortak çözümdür. Yaklaşık 102 m'lik kot farkı ve 50 m'lik işletme basıncı bandı dikkate alındığında şebekenin en az üç basınç bölgesine ayrılması gerekmektedir.

Kalibre model, şebekenin görülemeyen sorunlarını ortaya koyan ve iyileştirme önceliklerini belirleyen sayısal bir tanı aracıdır. Güncel SCADA verisiyle beslenerek kalıcı bir karar destek aracına dönüştürülmesi ve DMA temelli kayıp izleme çalışmalarına altlık oluşturması önerilmektedir.

Başlıca sınırlamalar; şebeke geneline tek bir pürüzlülük ve tek bir emitter katsayısı atanması, kalibrasyonun tek besleme noktasının debi verisiyle yürütülmesi, basınç sonuçlarının saha ölçümüyle doğrulanmaması ve kaybın bileşenlerine ayrıştırılmamış olmasıdır. Bu sınırlamalar, saha basınç

ölçümleri ve daha çok noktadan debi verisiyle giderilebilir. Ayrıca gelecekte basınç düşürücü vana ve terfi merkezlerinin konumlarının belirlenmesi ile bunların basınç dağılımı ve su kaybı üzerindeki etkilerinin kalibre model üzerinde senaryo analizleriyle değerlendirilmesi, şebekenin daha verimli ve güvenli işletilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E. (2003). Advanced Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press, 800p, Waterbury.

[2] T.C. Resmî Gazete (2014). İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği. Sayı: 28994, 8 Mayıs 2014, Ankara.

[3] Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-00/057, 200p, Cincinnati.

[4] Bentley Systems (2023). OpenFlows WaterGEMS CONNECT Edition User's Guide. Bentley Systems Inc., Exton.

[5] Van Zyl, J. E., Clayton, C. R. I. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 160(2), 109-114.

[6] American Water Works Association (2012). M32 Computer Modeling of Water Distribution Systems, 3. baskı. AWWA, 192p, Denver.

[7] Lambert, A. O., Hirner, W. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. International Water Association, The Blue Pages, Londra.

[8] İSKİ (2025). İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi 2024 Yılı Faaliyet Raporu, İstanbul.

[9] Türkiye İstatistik Kurumu (2024). Su ve Atıksu İstatistikleri, 2022. TÜİK, Ankara.

[10] İller Bankası A.Ş. (t.y.). İçmesuyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname. İlbank, Ankara.

Pompajlı İletim Hatlarında Kolon Ayrılmasına Karşı Koruma Yapılarının Karşılaştırmalı İncelenmesi

İsmail DURĞUT*
ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı, Ankara, Türkiye, 0000-0003-3556-7202
durgutismail@yahoo.com

Zafer BOZKUŞ
ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı, Ankara, Türkiye, 0000-0001-6863-3531
bozkus@metu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* kolon ayrılması, hidrolik geçici rejim, hava kazanı, tek yönlü denge bacası, hava vanası.

1. Amaç

Pompa istasyonlarında meydana gelen ani enerji kesintileri, pompa basma yüksekliği ve debinin kısa sürede azalmasına neden olarak basınç dalgalarının boru hattı boyunca yayılmasına yol açmaktadır. Yerel mutlak basıncın suyun buhar basıncına düşmesi halinde buhar boşlukları oluşmakta, sıvı kolonu sürekliliğini kaybetmekte ve ayrılan kolonların yeniden birleşmesi sırasında yüksek basınç darbeleri meydana gelebilmektedir. Kolon ayrılması olarak tanımlanan bu süreç; boru burkulması veya yırtılması, bağlantı elemanlarında hasar, titreşim ve işletme güvenilirliğinin azalması gibi ciddi sonuçlar doğurabilmektedir [1–3].

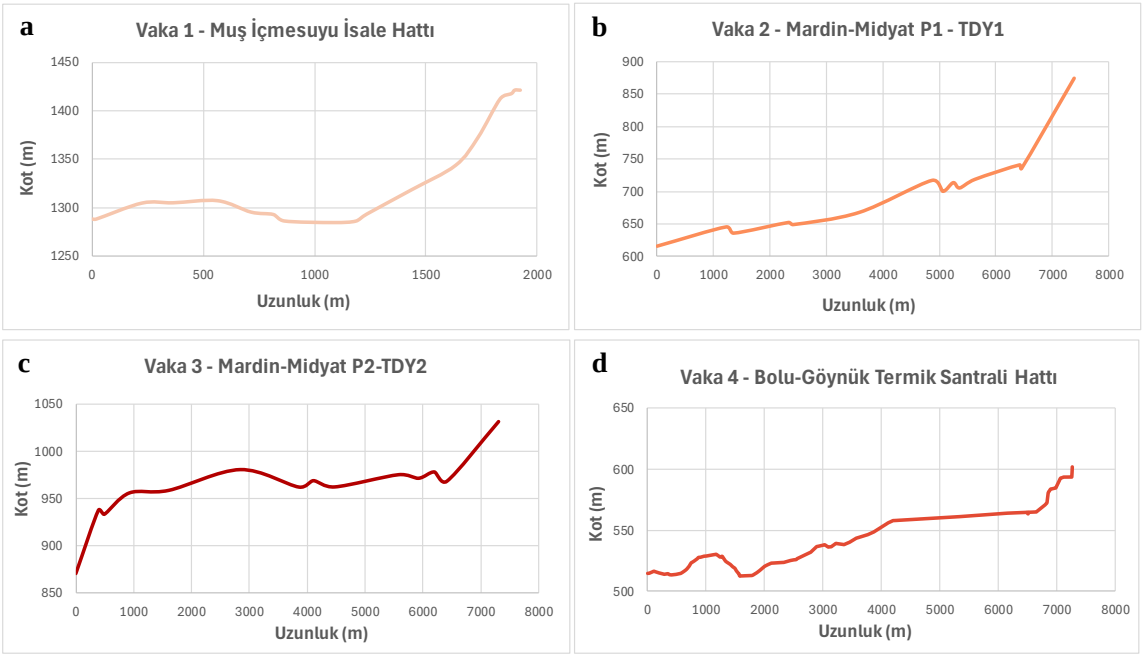
Bu çalışmanın amacı, farklı geometrik ve işletme özelliklerine sahip dört pompajlı iletim hattında pompa duruşu sonrasında gelişen kolon ayrılması davranışını belirlemek; hava kazanı, tek yönlü denge bacası ve çift etkili hava vanası çözümlerini hidrolik performans, uygulanabilirlik ve ön yatırım maliyeti bakımından karşılaştırmaktır. Pompaj istasyonlarında kolon ayrılmasının oluşumu ve bu olaya karşı geliştirilen pratik korunma yaklaşımları daha önceki çalışmalarda da incelenmiştir [4,5]. Çalışmanın temel katkısı, aynı koruma yaklaşımının her hat profilinde benzer sonuç vermediğini gerçek proje verileri üzerinden göstermesi ve koruma yapısı seçiminin sistem özelinde geçici rejim analiziyle yapılması gerektiğini nicel bulgularla ortaya koymasıdır.

2. Materyal ve Yöntem

İncelenen sistemler; Muş İçmesuyu İsale Hattı (Vaka 1), Mardin–Midyat P1–TDY1 Pompajlı İletim Hattı (Vaka 2), Mardin–Midyat P2–TDY2 Pompajlı İletim Hattı (Vaka 3) ve Bolu–Göynük Termik Santrali Pompajlı İletim Hattıdır (Vaka 4). Hatların uzunlukları yaklaşık 1,9–7,4 km, çapları 550–1220 mm ve işletme debileri 230–1680 L/s arasında değişmektedir. Böylece kısa ve dik yükselen bir profil ile uzun, yükselen ve dalgalı profiller aynı değerlendirme çerçevesinde ele alınmıştır. İncelenen pompajlı iletim hatlarının boyuna profilleri Şekil 1'de toplu olarak sunulmuştur. Hatların uzunluk, yükselti farkı ve profil geometrisi bakımından birbirinden farklı olması, korumasız durumdaki geçici rejim davranışlarının ve gerekli koruma yapılarının karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Çizgi renklerinin koyuluğu, korumasız sistemlerin geçici rejim analizlerinden elde edilen minimum ve maksimum basınçlar ile buhar boşluğu oluşumu dikkate alınarak belirlenen göreli risk düzeyini göstermekte; renk koyulaştıkça risk düzeyi artmaktadır.

Geçici rejim hesapları, basınçlı boru sistemlerinde su darbesi, enerji kesintisi sonucunda pompaların ani olarak devre dışı kalması, vana hareketleri, buhar boşluğu oluşumu ve koruma yapılarının hidrolik performansının incelenmesine olanak sağlayan Bentley OpenFlows HAMMER programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [6]. Program, boru hattındaki tek boyutlu ve zamana bağlı akımı tanımlayan süreklilik ve momentum denklemlerini Karakteristikler Yöntemi ile çözerek her hesap düğümünde debi ve hidrolik yükün zamanla değişimini belirlemektedir. Analizlerde öncelikle sistemin kararlı durum başlangıç koşulları hesaplanmış, ardından pompaların ani durmasıyla oluşan basınç dalgalarının boru hattı boyunca yayılması ve yansıması modellenmiştir. Böylece hat boyunca oluşan minimum ve maksimum basınçlar ile buhar boşluğu hacimleri belirlenmiş; hava kazanı, tek yönlü denge bacası ve hava vanası gibi koruma elemanlarının sistemin geçici rejim davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Her sistem için boru geometrisi, kotlar, çaplar, malzeme özellikleri, dalga hızı, sınır koşulları, pompa karakteristikleri,

volan atalet ve çekvalf davranışı tanımlanmıştır. Önce kararlı durum çözümü elde edilmiş; ardından çalışan pompaların eş zamanlı enerji kesintisiyle durması modellenmiştir. Korumasız durumda minimum ve maksimum hidrolik yük çizgileri, buhar basıncı sınırına ulaşan kesimler, buhar boşluklarının oluşma ve sönme zamanları ile en büyük boşluk hacimleri belirlenmiştir. Modelde buhar basıncı sınırı yaklaşık −10 mss gösterge basıncı olarak kabul edilmiştir. Suyun 20 °C'deki yaklaşık 2,34 kPa (0,24 mss) mutlak buhar basıncı ile 10,33 mss atmosfer basıncı yüksekliği dikkate alındığında, buhar basıncının gösterge basıncı cinsinden karşılığı yaklaşık −10,09 mss olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle sayısal analizlerde basıncın yaklaşık −10 mss sınırına ulaşması, ilgili kesitte sıvı kolonunun sürekliliğini kaybederek buhar boşluğu oluşmaya başladığını gösteren modelleme ölçütü olarak değerlendirilmiştir. Gerçek sistemlerde ise buhar boşluğu oluşumunun başlangıcı; su sıcaklığı, yerel atmosfer basıncı, rakım ve çözünmüş gaz miktarı gibi koşullara bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 1. İncelenen pompajlı iletim hatlarının boyuna profilleri: (a) Vaka 1, (b) Vaka 2, (c) Vaka 3 ve (d) Vaka 4

Kritik bölgeler belirlendikten sonra koruma alternatifleri ayrı senaryolar halinde modele eklenmiştir. Hava kazanlarında başlangıç hava hacmi parametrik olarak değiştirilmiş, sıkışmış hava davranışı $P \cdot V^k$ = sabit politropik bağıntısıyla ve k = 1,2 kabulüyle temsil edilmiştir. Pratik tank hacmi, hesaplanan en büyük geçici hava hacminin %10 emniyet payıyla büyütülmesiyle $V_{tank} = 1{,}10 \cdot V_{hava,maks}$ bağıntısından seçilmiştir. Tek yönlü denge bacaları yalnızca düşük basınç sırasında hatta su verecek çekvalfli bağlantılarla; hava vanaları ise atmosfer altı basınçta hatta hava girişi sağlayacak şekilde modellenmiştir. Alternatifler; kolon ayrılmasını önleme, minimum ve maksimum basınçları sınırlandırma, gerekli cihaz sayısı ve konumları ile cihaz ve yardımcı ekipmanlara dayalı ön yatırım maliyetleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Mevcut boru et kalınlıkları korunmuş; boru, kazı, taşıma, montaj ve inşaat maliyetleri ekonomik karşılaştırmaya dahil edilmemiştir.

3. Değerlendirme

Korumasız analizler, dört sistemin tamamında minimum basıncın yer yer buhar basıncı sınırına ulaştığını, ancak kolon ayrılmasının şiddeti ve mekânsal dağılımının hat profiline bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Vaka 1'de kritik buhar boşluğu yaklaşık 4,2 L ile 1,9 km civarında yerel kalırken, Vaka 2'de yaklaşık 13,1 L'lik boşluk 6,4–7,4 km arasındaki yükselen kesimde oluşmuştur. Vaka 3'te yaklaşık 2,8–2,9 km'de 1700 L'ye ulaşan baskın boşluğa hat boyunca daha küçük boşluklar eşlik etmiş ve bu sistem en şiddetli kolon ayrılması davranışını göstermiştir. Vaka 4'te yaklaşık 1,2 ve 4,2 km civarında 400–420 L düzeyinde birden fazla boşluk belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yalnızca maksimum kot farkının değil; hat uzunluğu, profil dalgalanması, akış hızı, pompa duruş karakteristiği ve dalga yayılımının birlikte belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 1. Vaka çalışmalarında kolon ayrılması ve koruma alternatiflerinin karşılaştırılması

Vaka	Korumasız en büyük buhar hacmi	Seçilen hava kazanı	Diğer etkili çözüm	Temel değerlendirme
1	≈4,2 L	7,5 m³ başlangıç havası; 15 m³ tank	2 tek yönlü denge bacası veya 5 hava vanası	Tüm alternatifler kolon ayrılmasını önlemiş olup; tek yönlü denge bacası en düşük maliyetli seçenek olarak belirlenmiştir.
2	≈13,1 L	30 m³ başlangıç havası; 41,5 m³ tank	9 tek yönlü denge bacası	Her iki çözüm etkili olmakla beraber; denge bacaları daha düşük ön yatırım maliyeti vermektedir.
3	≈1700 L	20 m³ başlangıç havası; 30 m³ tank	16 tek yönlü denge bacası	Hava kazanı daha kapsamlı basınç kontrolü sağlamış olup ve yaklaşık %49 daha düşük maliyetlidir.
4	≈400–420 L	7,0 m³ başlangıç havası; 13 m³ tank	18 tek yönlü denge bacası	Hava kazanı hem pozitif hem de negatif basıncı kabul edilebilir seviyede tutmuş olup yaklaşık %76 daha düşük maliyetlidir.

Hava kazanı, sıkışmış havanın enerji depolama ve geri verme özelliği sayesinde hem negatif hem pozitif geçici basınçları birlikte kontrol eden en kapsamlı çözüm olmuştur. Vaka 1'de 7,5 m³ başlangıç hava hacmine sahip 15 m³ tank maksimum basınç yüksekliğini yaklaşık 245–250 mss'ye indirerek pozitif minimum basınç sağlamıştır. Vaka 2'de 41,5 m³'lük tank maksimum hat basıncını yaklaşık 310–320 mss düzeyine düşürmüştür. En kritik sistem olan Vaka 3'te 10 m³ başlangıç hava hacmi kavitasyonu önleyen seçenek olmakla birlikte, 20 m³ başlangıç havasına sahip 30 m³ tank maksimum basıncı yaklaşık 210–220 mss'ye indirerek daha düzgün bir sönümleme sağlamıştır. Vaka 4'te 2 m³ başlangıç hava hacmi hidrolik bakımdan yeterli olmasına karşın, 7 m³ başlangıç havasına sahip 13 m³ tank ile maksimum basınç yaklaşık 140–150 mss'ye düşürülmüş ve hat boyunca pozitif basınç korunmuştur.

Tek yönlü denge bacaları, düşük basınç sırasında hatta su sağlayarak buhar boşluğu oluşumunu önlemiştir. Bununla birlikte performansları yerleşim konumuna güçlü biçimde bağlıdır ve düşük basınç bölgesi yaygınlaştıkça gerekli yapı sayısı artmıştır. Vaka 1'de iki, Vaka 2'de dokuz, Vaka 3'te on altı ve Vaka 4'te on sekiz adet tek yönlü denge bacası gerekmiştir. Vaka 1'de kullanılan iki tek yönlü denge bacasının her biri 0,5 m çapında ve 1,5 m yüksekliğindedir. Vaka 2'de dokuz tek yönlü denge bacasının tamamı 0,5 m çapında ve 1,5 m yüksekliğinde seçilmiştir. Vaka 3'te ise 14 adet 0,5 m çapında ve 1,5 m yüksekliğinde, bir adet 2,0 m çapında ve 2,0 m yüksekliğinde ve bir adet 1,0 m çapında ve 1,5 m yüksekliğinde olmak üzere toplam 16 tek yönlü denge bacası kullanılmıştır. Vaka 4'te toplam 18 tek yönlü denge bacasının 16 adedi 0,5 m çapında ve 1,5 m yüksekliğinde, bir adedi 1,0 m çapında ve 2,0 m yüksekliğinde, bir adedi ise 0,5 m çapında ve 2,5 m yüksekliğinde boyutlandırılmıştır. Bu çalışmada tek yönlü denge bacalarının konumları ve sayıları belirlenirken, minimum piyezometre çizgisi (HGL)'nin mümkün olduğunca boru profilinin altına düşmemesi ve profile yakın tutulması hedeflenmiştir. Bu nedenle nispeten korumacı bir yerleşim yaklaşımı benimsenmiştir. Bununla birlikte, suyun buhar basıncına karşı yaklaşık −10 mss'ye kadar mevcut basınç marjı dikkate alındığında, minimum basıncın kontrollü şekilde daha düşük değerlere inmesine izin veren bir tasarım yaklaşımıyla daha az sayıda tek yönlü denge bacasıyla da kolon ayrılmasının önlenmesi mümkün olabilir. Bu durum özellikle uzun hatlarda gerekli tek yönlü denge bacası sayısını ve dolayısıyla ilk yatırım maliyetini bir miktar azaltabilir. Hava vanaları Vaka 1'de beş kritik noktada yerel atmosfer altı basınçları sınırlandırarak kolon ayrılmasını

önlemiş; ancak uzun ve karmaşık profilli diğer vakalarda yaygın koruma için pratik bir seçenek olarak değerlendirilmemiştir. Ayrıca hava vanalarının temel işlevi negatif basıncı sınırlandırmak olduğundan, pozitif basınç darbelerini hava kazanı kadar bütüncül biçimde kontrol etmemektedir.

Ön yatırım maliyeti karşılaştırmasında Vaka 1 için tek yönlü denge bacaları 7.745 ABD doları ile en ekonomik seçenek olmuştur. Vaka 2'de 34.862 ABD doları tutarındaki tek yönlü denge bacası alternatifi hava kazanından daha düşük maliyet vermiştir. Buna karşılık düşük basınç bölgelerinin geniş alana yayıldığı Vaka 3 ve Vaka 4'te çok sayıda dağıtılmış tek yönlü denge bacası gereksinimi nedeniyle hava kazanı sırasıyla 37.416 ABD doları ve 17.237 ABD doları ile yaklaşık %49 ve %76 maliyet avantajı sağlamıştır. Dolayısıyla merkezi hava kazanı çözümünün ekonomik üstünlüğü, gerekli dağıtılmış yapı sayısı arttıkça belirginleşmektedir.

4. Sonuçlar

Dört gerçek pompajlı iletim hattı üzerinde gerçekleştirilen analizlerden aşağıdaki temel sonuçlar elde edilmiştir:

- Ani pompa duruşu, hat geometrisi ve işletme koşullarına bağlı olarak yerel veya yaygın kolon ayrılmasına neden olabilmektedir; bu nedenle yalnızca kararlı durum basınçlarının yeterli olması geçici rejim güvenliğini garanti etmemektedir.
- Hava kazanları hem düşük hem yüksek basınçları kontrol ederek en tutarlı genel hidrolik performansı sağlamıştır. Ancak yetersiz başlangıç hava hacmi kavitasyonu tamamen ortadan kaldırmayabileceğinden parametrik boyutlandırma gereklidir.
- Tek yönlü denge bacaları düşük basınç probleminin belirli noktalarda yoğunlaştığı hatlarda etkili ve ekonomik olabilmektedir. Kritik bölgenin hat boyunca yayılması durumunda gerekli yapı sayısı ve maliyet önemli ölçüde artmaktadır.
- Hava vanaları yerel negatif basınç kontrolünde ekonomik bir seçenek olmakla birlikte, uzun ve karmaşık profillerde çok sayıda vana gerektirebilmekte ve pozitif basınç darbelerini doğrudan sınırlandırmamaktadır.
- Evrensel olarak en iyi tek bir koruma yapısı bulunmamaktadır. Nihai seçim; hat profili, pompa duruş karakteristiği, buhar boşluğu dağılımı, minimum ve maksimum basınçlar, cihaz sayısı, uygulanabilirlik ve ekonomik fizibilite birlikte değerlendirilerek sistem özelinde yapılmalıdır.

5. Kaynaklar

[1] Wylie, E. B., Streeter, V. L., Suo, L. (1993). Fluid Transients in Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

[2] Bergant, A., Simpson, A. R., Tijsseling, A. S. (2006). Water hammer with column separation: A historical review. Journal of Fluids and Structures, 22(2), 135–171.

[3] Chaudhry, M. H. (2014). Applied Hydraulic Transients, 3rd Edition. Springer, New York.

[4] Yang, K. L. (2001). Practical method to prevent liquid-column separation. Journal of Hydraulic Engineering, 127(7), 620–623.

[5] Sadafi, M. H., Riasi, A., Nourbakhsh, A. (2012). The study of column separation in pumping stations. Applied Mechanics and Materials, 110–116, 1725–1731.

[6] Bentley Systems, (2025). OpenFlows HAMMER (Version 24.000.02.20). Bentley Systems, Incorporated, Exton, PA, USA.

Su Dağıtım Sistemlerinin Hidrolik Modellemesi: Kağıthane–Nurtepe Mahallesi İçme Suyu Şebekesi Uygulaması

Umut TANIR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
tanir21@itu.edu.tr

Erhan IŞIL
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
isil20@itu.edu.tr

Muhammed Saltuk FARSAK
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
farsak2121@itu.edu.tr

Mehmet Emre BOLAT
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
bolatm21@itu.edu.tr

Ulaş AKTAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
aktasu21@itu.edu.tr

İbrahim ÖZARSLAN*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469
ozarslan17@itu.edu.tr

Ufuk BAL
İSKİ, Avrupa Su Kayıpları ve Basınç Yönetimi Şube Müdürlüğü, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye
ubal@iski.gov.tr

Mehmet Melih KOŞUCU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye/İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
0000-0001-5907-6964
kosucu@itu.edu.tr

Erdal KESGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye, 0000-0002-9441-5359
kesgine@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: içme suyu şebekesi, hidrolik modelleme, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), WaterGEMS, SCADA, kalibrasyon

1. Amaç

Su dağıtım şebekeleri, kentsel altyapının kesintisiz ve güvenli işletilmesi gereken temel bileşenlerindendir. Artan su talebi ve yoğunlaşan yapılaşma; basınç, debi, hız ve yük kaybı gibi hidrolik büyüklüklerin sayısal modelleme yöntemleriyle sistematik biçimde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır [1, 2]. Bu çalışmanın amacı, İstanbul ili Kağıthane ilçesine bağlı Nurtepe Mahallesi içme suyu dağıtım şebekesine ait mevcut verilerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında düzenlenerek Bentley WaterGEMS yazılımına aktarılması ve saha koşullarını temsil eden, hidrolik analize elverişli bir sayısal model altyapısının kurulmasıdır.

Çalışmanın katkısı iki yönlüdür: (i) CBS tabanlı altyapı verilerinin hidrolik modele veri kaybı olmaksızın aktarılmasına yönelik tekrarlanabilir bir iş akışının tanımlanması ve (ii) gerçek SCADA ölçümleriyle

kalibre edilmiş, mahalle ölçeğinde bir uygulama örneğinin ortaya konulmasıdır. Çalışma bu yönleriyle su dağıtım sistemlerinin hidrolik modellemesi literatürüne katkı sağlamaktadır [1].

2. Materyal ve Yöntem

Verilerin hazırlanması QGIS programının kullanılmasıyla sağlanmıştır. İlk adımda boru hatları ve düğüm noktalarına ait koordinat referans sistemi (CRS) incelenmiş, tüm katmanların ortak bir metrik projeksiyonda yer alması sağlanmıştır. Metrik projeksiyon tercihi, boru uzunluklarının doğru hesaplanması ve geometriden kaynaklanan hataların yük kaybı analizlerine taşınmaması bakımından belirleyicidir. İkinci adımda öznitelik tabloları standartlaştırılmış; borularda çap, malzeme ve pürüzlülük katsayısı, düğüm noktalarında ise kot ve talep değerleri elde edilmiştir. Ardından boru–düğüm bağlantı sürekliliği kopukluk ve çakışma açısından denetlenmiş, şebeke elemanları ESRI Shapefile (.shp) biçiminde dışa aktarılmıştır. Şebekeye ait altyapı ve abone verileri İSKİ veri tabanından temin edilmiştir [3]. Çalışma alanına ait içme suyu dağıtım şebekesinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Nurtepe Mahallesi içme suyu dağıtım şebekesinin şematik görünümü

Hazırlanan katmanlar, WaterGEMS [4] ModelBuilder modülü aracılığıyla modele aktarılmış; çizgisel veriler "Pipe", noktasal veriler ise "Junction" elemanı olarak tanımlanmıştır. Alan eşleştirmesinde çap "Diameter", malzeme "Material" ve kot "Elevation" alanlarıyla ilişkilendirilmiş; mekânsal tolerans ayarları yardımıyla boru uçlarının düğüm noktalarına doğru bağlanması sağlanarak bağlantısız düğüm ve açıkta kalan boru oluşumu en aza indirilmiştir. Aktarım sonrasında Validate ve Network Navigator araçlarıyla topolojik bütünlük denetlenmiş; bağlantısız düğüm, açık uçlu boru, eksik çap ve tanımsız kot gibi hatalar taranmıştır. Model hem makro ölçekte (Kağıthane–Cendere) hem de sokak ölçeğinde incelenmiş ve hidrolik analiz, kütle ve enerji korunumuna dayanan Küresel Gradyan Algoritmasıyla icra edilmiştir. [2, 5]. Talep desenlerinin gerçekçi tanımlanabilmesi amacıyla Nurtepe Mahallesine ait Aralık 2024 dönemine ilişkin saatlik SCADA debi kayıtları modele girdi olarak kullanılmıştır.

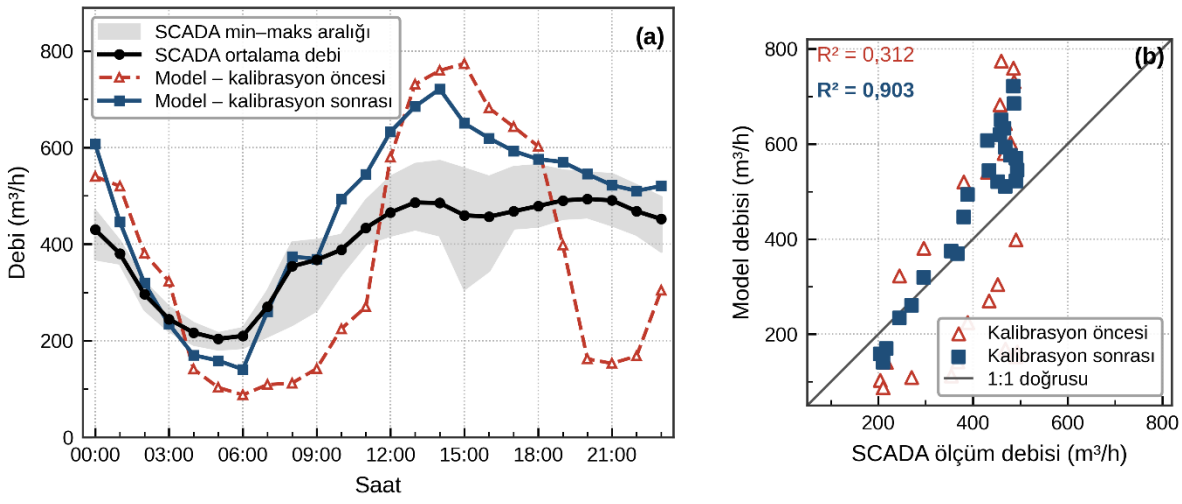
3. Bulgular ve Değerlendirme

SCADA kayıtlarına göre günlük ortalama debi 395,5 m³/h olarak belirlenmiştir. Debi en düşük değerine gece saatlerinde (05:00'te 203,8 m³/h), en yüksek değerine ise akşam saatlerinde (20:00'de 493,6 m³/h) ulaşmaktadır. Buna karşılık gelen 1,25'lik pik saat çarpanı, akşam tüketiminin günlük ortalamanın yaklaşık %25 üzerinde seyrettiğini göstermektedir. Saatlik ortalama, minimum ve maksimum debiler ile saatlik çarpanlar ve kalibrasyon öncesi/sonrası model debileri Tablo 1'de ve Şekil 2'de sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında ortaya konan saatlik tüketim profili, modelde zamana bağlı talep desenlerinin tanımlanmasına ve genişletilmiş periyot simülasyonlarının (EPS) daha hassas bir şekilde yürütülmesine imkan vermiştir. Model doğrulamasında kritik bir uyarıya rastlanmaması ise CBS ortamından aktarılan verilerin süreklilik taşıyan ve hidrolik çözüme elverişli bir topolojiye dönüştürüldüğünü göstermektedir. Kalibrasyonun model–ölçüm uyumu üzerindeki etkisi Şekil 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Nurtepe Mahallesi saatlik SCADA debi değerlerinin kalibrasyon öncesi ve sonrası model debileriyle karşılaştırılması

Saat	SCADA Ortalama Debi (m³/h)	Min. (m³/h)	Maks. (m³/h)	Çarpan	Kalibrasyon Öncesi Model Debisi (m³/h)	Kalibrasyon Sonrası Model Debisi (m³/h)
00:00	430,2	369,3	469,0	1,09	540,20	607,20
01:00	380,5	360,5	406,0	0,96	520,10	446,30
02:00	296,1	265,0	320,6	0,75	380,80	319,60
03:00	244,7	220,0	269,4	0,62	322,70	234,10
04:00	216,6	192,3	236,1	0,55	140,90	170,00
05:00	203,8	182,4	215,4	0,52	103,10	158,70
06:00	209,9	185,9	225,7	0,53	87,60	140,60
07:00	270,4	209,7	302,8	0,68	108,90	260,30
08:00	354,0	233,5	403,2	0,90	112,10	374,50
09:00	367,3	263,5	408,5	0,93	142,10	369,20
10:00	388,4	338,2	419,1	0,98	224,40	493,60
11:00	433,8	401,1	490,5	1,10	270,10	544,60
12:00	465,6	418,5	539,6	1,18	580,40	632,70
13:00	486,4	431,4	565,8	1,23	731,20	685,20
14:00	485,2	418,9	572,0	1,23	759,70	721,30
15:00	459,7	307,6	556,1	1,16	774,20	650,40
16:00	456,9	345,5	539,6	1,16	682,00	619,60
17:00	468,0	433,3	559,5	1,18	643,20	592,80
18:00	479,0	437,2	563,5	1,21	602,70	576,10
19:00	490,5	453,3	552,4	1,24	398,50	570,20
20:00	493,6	456,1	547,9	1,25	162,30	545,20
21:00	490,6	439,6	545,0	1,24	152,90	522,10
22:00	468,1	420,2	521,8	1,18	168,20	510,40
23:00	452,1	385,1	497,1	1,14	304,20	520,50



Şekil 2. Kalibrasyon öncesi ve sonrası model debilerinin SCADA ölçümleriyle karşılaştırılması: (a) saatlik debi profilleri ve SCADA min–maks bandı, (b) model–ölçüm saçılımı ve belirlilik katsayıları

Şekil 2a, saatlik model debilerini SCADA ortalama debisi ve min–maks bandıyla birlikte vermektedir. Kalibrasyon öncesindeki model, saha ölçümünü yakalayamamakta; 04:00–11:00 ile 19:00–23:00 aralıklarında ölçüm bandının belirgin biçimde altında, 00:00–03:00 ile 12:00–18:00 aralıklarında ise üzerinde seyretmektedir. Kalibrasyon sonrasında model sonuçları ise, ölçüm eğrisinin genel biçimini izler duruma gelmiş, belirleme katsayısı (R^2) 0,3118 değerinden 0,9028 değerine yükselmiştir (Şekil 2b).

Bununla birlikte 1:1 doğrusunun üzerinde yer almayan noktaların bulunması, kalibre modelin hassasiyetinin daha da arttırılabileceğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

– Nurtepe Mahallesi içme suyu şebekesine ait CBS tabanlı veriler WaterGEMS yazılımına aktarılarak, mevcut altyapı koşullarını temsil eden kararlı bir sayısal hidrolik model kurulmuştur.

– QGIS yazılımında yürütülen koordinat, öznitelik ve topoloji denetimleri model geometrisinin doğruluğunu arttırmış; WaterGEMS programı ile yapılan tetkik neticesinde şebekenin hidrolik analizlere uygunluğu ortaya konmuştur.

– SCADA kaynaklı saatlik debi profili, talep desenlerinin gerçekçi tanımlanmasına imkan tanımış; kalibrasyon, model–ölçüm uyumunu R^2 açısından 0,31 düzeyinden 0,90 düzeyine yükseltmiştir (Şekil 2).

– Elde edilen model; debi, basınç, hız ve yük kaybı analizleri ile talep senaryoları ve ileride yürütülecek optimizasyon çalışmaları için kullanılabilir bir altyapı sunmaktadır. Talep dağıtımının abone bazında iyileştirilmesi ve kayıp–kaçak bileşeninin modele dâhil edilmesi, kalan sapmanın azaltılmasında öncelikli adımlar olarak öngörülmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E. (2003). Advanced Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press, Waterbury.

[2] Mays, L. W. (2000). Water Distribution Systems Handbook. McGraw-Hill, New York.

[3] İSKİ. (2026). İstanbul ili Kağıthane ilçesi içme suyu altyapı ve abone bilgi sistemi veritabanı. İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, İstanbul.

[4] Bentley Systems. (2021). OpenFlows WaterGEMS product data sheet. Bentley Systems.

[5] Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 users manual. U.S. Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division.

Su Dağıtım Sistemlerinin Hidrolik Modellenmesi ve Kalibrasyonu: Paşaköy DMA

Mustafa ÖZFİDAN*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye, 0009-0004-4462-7566
ozfidan21@itu.edu.tr

Yasin Onur BAYRAKTAR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
bayraktary18@itu.edu.tr

Yunus Emre ÜNAL
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
unalyu19@itu.edu.tr

Aykan ÜNSEVER
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
unsever20@itu.edu.tr

Ender ACAR
İSKİ, Asya Su Kayıpları ve Basınç Yönetimi Şube Müdürlüğü, Eyüpsultan, İstanbul, Türkiye
acare@iski.gov.tr

Mehmet Melih KOŞUCU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye/İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
0000-0001-5907-6964
kosucu@itu.edu.tr

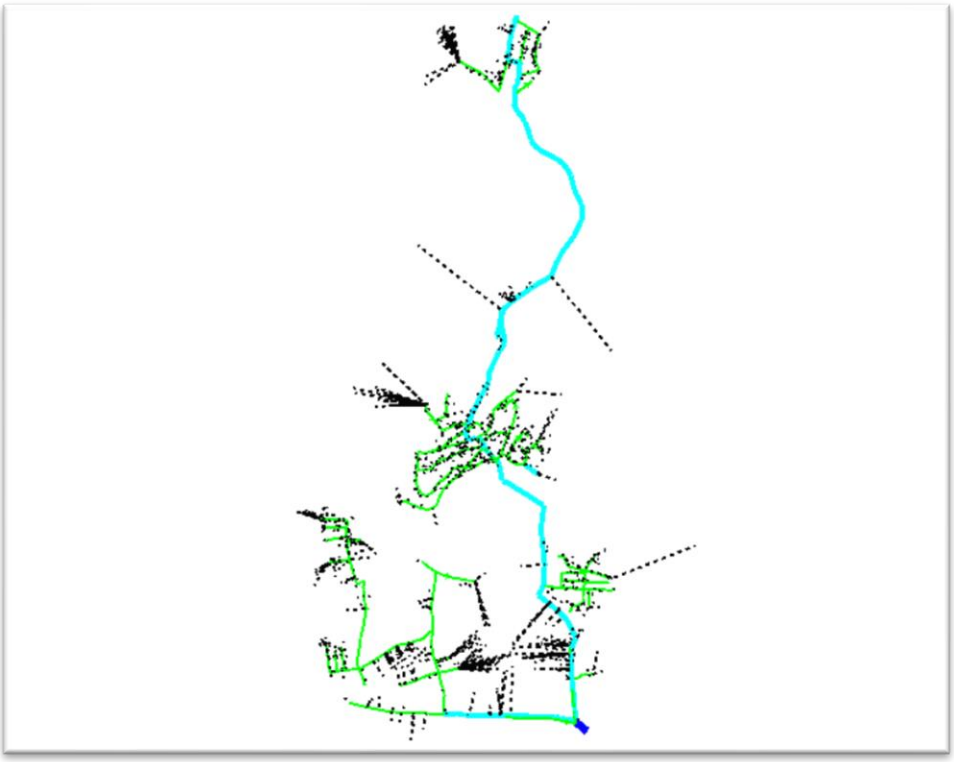
Erdal KESGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye-0000-0002-9441-5359
kesgine@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: hidrolik modelleme, Watergems, DMA, Scada kalibrasyonu, Darwin Calibrator

1. Amaç

Su dağıtım şebekeleri, kentsel altyapının en kritik bileşenlerinden biridir ve tüketicilere yeterli basınç ve hijyenik koşullarda kesintisiz su iletimini sağlar. Modern su dağıtım yönetiminde, şebekelerin hidrolik olarak izole edilmiş alt bölgelere, yani Bölgesel Ölçüm Alanlarına (DMA) ayrılması; kaçak kontrolü, basınç yönetimi ve işletme performansının izlenmesi açısından yaygın olarak benimsenen bir yaklaşımdır [1]. DMA ölçeğinde geliştirilen hidrolik modellerin güvenilirliği ise doğrudan saha verileriyle kalibre edilmiş olmalarına bağlıdır.

Bu çalışmada, İstanbul'un Sancaktepe ilçesindeki Paşaköy Mahallesi içme suyu dağıtım şebekesi tek bir DMA (Şekil 1) olarak ele alınmış ve Bentley WaterGEMS yazılımı [2] ile hidrolik modeli oluşturulmuştur. Model; İSKİ SCADA sisteminden elde edilen sürekli DMA giriş debisi ölçümleri ve DMA girişinde kaydedilen 24 saatlik saha ölçümleri kullanılarak WaterGEMS'in Darwin Calibrator modülü aracılığıyla kalibre edilmiştir. Çalışmanın amacı, kalibrasyon öncesi ve sonrası model çıktılarını saha ölçümleriyle karşılaştırarak SCADA tabanlı DMA kalibrasyonunun başarımını ve sınırlarını ortaya koymaktır.



Şekil 1. Paşaköy mahallesi içme suyu dağıtım şebekesi

2. Materyal ve Yöntem

Su dağıtım şebekelerinin hidrolik modellenmesi, kütlenin ve enerjinin korunumu ilkeleri dikkate alınarak şebeke borularındaki akım koşullarının matematiksel olarak temsil edilmesidir [3]. Şebekenin borular, düğümler, vanalar ve depolar gibi fiziksel bileşenleri [4], coğrafi bilgi sistemi (CBS) verileri kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve mevcut durumun mümkün olduğunca gerçekçi biçimde analiz edilmesi hedeflenmiştir.

2.1 Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma alanı, İstanbul'un Anadolu yakasında, Sancaktepe ilçesinin doğu sınırında yer alan ve 2010'lu yılların başında köyden mahalleye dönüşen Paşaköy Mahallesi'dir (Tablo 1). Toplam 2557,42 hektarlık alana yayılan mahallenin nüfusu, TÜİK [5] verilerine göre 1769 kişidir. Arazi kotları +68,00 m ile +234,00 m arasında değişmekte olup 166 m'lik kot farkı, basınç yönetimi açısından şebekeyi kritik kılmaktadır. Mahallenin su dağıtım şebekesi, Ömerli Barajı'ndan beslenen, tek bir giriş noktasına sahip ve debisi sürekli ölçülen tek bir DMA olarak tanımlanmıştır. Modelin girdileri olan boru hattı, düğüm noktası ve 912 aboneye ait tüketim kayıtları İSKİ'den ESRI Shapefile (.shp) formatında temin edilmiştir.

Tablo 1. Paşaköy DMA'nın temel özellikleri

Parametre	Değer
Toplam alan	2557,42 ha
Nüfus (TÜİK, 2025)	1769
Kot aralığı	+68,00 – +234,00 m
Toplam boru uzunluğu	23300 m
Boru malzemesi / çapı	Sünek dökme demir, DN100–DN250
Abone sayısı	912
Su kaynağı	Ömerli Barajı (İSKİ)

2.2 Hidrolik Model Kurulumu

Şebeke topolojisi, WaterGEMS'in ModelBuilder aracı ile boru, düğüm ve abone katmanlarının hidrolik bileşenlere eşlenmesi yoluyla modele aktarılmış; 912 abonenin tamamı LoadBuilder modülünün "En Yakın Düğüm" algoritmasıyla otomatik olarak en yakın düğümlere bağlanmıştır. Düğüm kotları, İSKİ'den temin edilen onaylı kot listesinden doğrudan aktarılmıştır.

WaterGEMS'in arka planda çalıştırdığı EPANET hesaplama motoru [6], süreklilik ve enerjinin korunumu ilkelerini [7] Todini ve Pilati'nin gradyan tabanlı Newton-Raphson algoritmasıyla [8] eşzamanlı çözmekte; bu yaklaşım, şebekelerin hidrolik analizinde klasik Hardy-Cross yönteminin [9] yerini almıştır. Sürtünme kayıplarının hesabında Hazen-Williams eşitliği kullanılmaktadır [10] (Eşitlik 1):

$$h_L = \frac{10.67\ Q^{1.852}\ L}{C^{1.852}\ D^{4.87}} \tag{1}$$

Burada h_L sürtünme kaybını (m), Q debiyi (m³/s), L boru uzunluğunu (m), D iç çapı (m) ve C katsayısı Hazen-Williams pürüzlülük değerini ifade etmektedir; alternatif olarak Darcy-Weisbach/Colebrook-White yaklaşımı da kullanılabilir [11]. Modelin ilk kurulumunda, sünek dökme demir borular için literatürde önerilen C = 130 değeri [12] tüm hatlara atanmıştır.

Zamana bağlı tüketim davranışını yansıtmak amacıyla 24 saatlik bir Genişletilmiş Periyot Simülasyonu (EPS) kurgulanmış; Pattern Manager aracılığıyla abone tipine özgü (resmi daire, mesken, sanayi-ticari vb.) saatlik talep örüntüleri tanımlanmış ve 1 saatlik zaman adımlarıyla 24 saatlik simülasyon gerçekleştirilmiştir.

2.3 Kalibrasyon

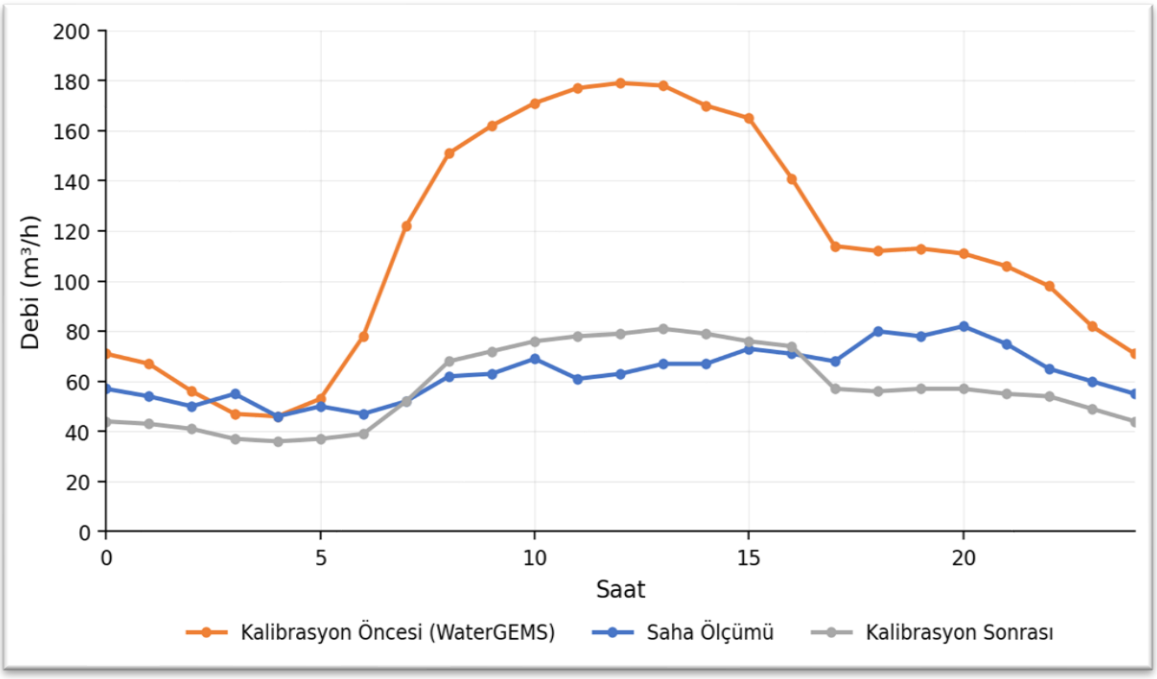
Kalibre edilmiş bir hidrolik model oluşturmak, bilimden çok bir sanata benzetilir [13]. Bu çalışmada model doğrulaması, WaterGEMS'in genetik algoritma tabanlı optimizasyon modülü olan Darwin Calibrator [14] ile yapılmıştır. Kalibrasyon sürecinde, yalnızca DMA giriş noktasında İSKİ SCADA sisteminden [15] elde edilen 24 saatlik debi ölçümleri "Field Data Snapshots" olarak sisteme tanımlanmıştır; şebeke içinde basınç ölçüm noktası bulunmadığından kalibrasyon yalnızca debi verisiyle yapılmıştır. Kalibrasyon faaliyeti hem düğüm taleplerinin çarpanları hem de boru Hazen-Williams C katsayıları için yürütülmüştür. Darwin Calibrator, düğüm talep çarpanları ve boru pürüzlülükleri arasında binlerce kombinasyonu değerlendirerek model çıktıları ile saha ölçümleri arasındaki farkı en aza indiren çözümü sunmuştur. Bulunan çözümün fitness (uygunluk) değeri 0,063 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 24 saatlik sürenin tamamında simüle edilmiş ve gözlenmiş debiler arasındaki ağırlıklı farkı temsil eden ve genetik algoritmanın en aza indirmeye çalıştığı normalize hata skorudur. Kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde AWWA M32 [16] ve EPA [17] kaynaklı tipik mühendislik tolerans kriterleri referans alınmıştır. Model kalibrasyonunda, kalibrasyon işleminde kullanılmayan bağımsız bir veri setiyle ayrıca doğrulama yapılmamıştır.

3. Değerlendirme

Kalibrasyon öncesi simülasyon sonuçlarının model çıktısının saha ölçümlerinden sistematik ve belirgin biçimde daha yüksek değerler aldığı Şekil 2'de görülmektedir. Kalibre edilmemiş modelin ürettiği maksimum debi, öğle saatlerinde (12:00) 179 m³/h olarak hesaplanırken, sahada ölçülen maksimum debi akşam saatinde (20:00) 82 m³/h düzeyinde kalmıştır (Şekil 2, Tablo 2). Bu yaklaşık iki kat fazlalık, modele atanan referans talep örüntülerinin ve baz taleplerin DMA'nın gerçek tüketim paternini tam olarak karşılayamadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Kalibrasyon öncesi ve sonrası temel debi parametrelerinin karşılaştırılması

Parametre	Kalibrasyon Öncesi	Kalibrasyon Sonrası	Saha Ölçümü
Maksimum debi (m³/h)	179	80	82
Maksimum debi saati	12:00	13:00	20:00
24 saatlik RMSE (m³/h)	65,07	13,09	
RMSE / ortalama debi (%)	104	21	
Korelasyon katsayısı (r)	0,522	0,579	



Şekil 2. Saha ölçümü, kalibrasyon öncesi ve kalibrasyon sonrası model çıktılarının 24 saatlik karşılaştırması

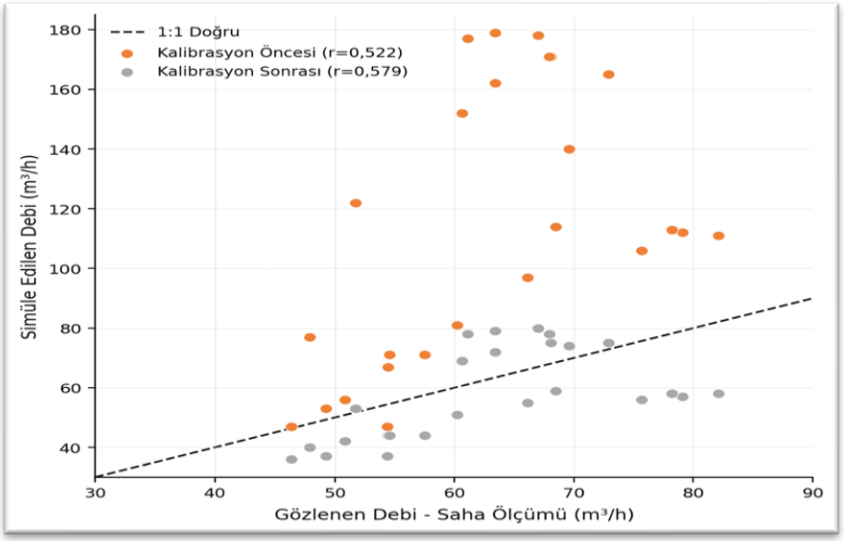
Darwin Calibrator ile bulunan çözümde, düğüm taleplerine uygulanan genel çarpan 0,324 olarak hesaplanmıştır. Bu, baz taleplerin yaklaşık %68 oranında azaltıldığı anlamına gelmektedir. Buna karşılık, her bir borunun Hazen-Williams *C* katsayılarına uygulanan çarpan 1,0 olarak bulunmuş, yani tüm borularda *C* değeri başlangıçtaki 130 değerinde kalmıştır. Bu sonuç, yalnızca DMA girişindeki toplam debi bilgisiyle beslenen bir kalibrasyon faaliyetinin, boru pürüzlülüğü gibi şebeke boyunca dağıtık bir parametreyi anlamlı biçimde belirleyemediğini; dolayısıyla kalibrasyonun fiilen yalnızca talep tarafında gerçekleştiğini göstermektedir. Şebeke içinde basınç ölçümü bulunmaması nedeniyle tam olarak çok parametreli (talep + pürüzlülük) bir uyum sağlanamamış, böylece kalibrasyon debi bazlı ve kısmi kalmıştır.

Kalibrasyonun etkisi, saha ölçümleriyle model çıktıları arasındaki 24 saatlik RMSE karşılaştırmasında açıkça görülmektedir: kalibrasyon öncesinde 65,07 m³/h olan RMSE, kalibrasyon sonrasında 13,09 m³/h'a düşerek yaklaşık %80 oranında iyileşmiştir (Tablo 2). Kalibre edilmiş maksimum debi (80 m³/h) ile saha ölçümündeki maksimum değer (82 m³/h) arasındaki fark yalnızca %2,4 olup bu, AWWA M32/UKWIR kaynaklı DMA toplam giriş debisi için önerilen ±%5–10 tolerans aralığı [16] içindedir. Buna karşılık 13,09 m³/h'lik RMSE'nin ortalama günlük debiye (~63 m³/h) oranı (~%21) bu tolerans aralığının hâlâ belirgin biçimde üzerindedir. Saatlik hata dağılımında en düşük değerler öğleden sonranın düşük tüketimli saatlerinde (15:00 ve 16:00'da sırasıyla 2 ve 5 m³/h), en yüksek değerler ise akşam maksimum saatlerinde (18:00–21:00 arasında 19–24 m³/h) görülmektedir.

Model ile saha ölçümleri arasındaki Pearson korelasyon katsayısı, kalibrasyon öncesinde 0,522 iken kalibrasyon sonrasında yalnızca 0,579'a yükselmiştir (R^2 sırasıyla 0,273 ve 0,335). Bu sınırlı iyileşme ile, modelin ürettiği debi değerleri ölçüm sonuçlarına yaklaşmıştır (Şekil 3).

Hesaplamalarda kullanılan 24 saatlik ham veri seti ile Maks/Min/Ortalama/RMSE/Korelasyon özet istatistikleri, saydamlık amacıyla Tablo 3'te sunulmuştur.

Kalibrasyon neticesinde hidrolik modelin hassasiyet ve doğruluğunun arttırılmasına rağmen Şekil 2'de de görüldüğü gibi, kalibre edilmiş model ile saha ölçümleri arasında zaman ekseninde belirgin bir uyumsuzluk bulunmaktadır. Bu durum, Darwin Calibrator'ın yalnızca talep çarpanının büyüklüğünü optimize ettiğini, örüntünün zamansal şeklini değiştirmediğini göstermektedir.



Şekil 3. Kalibrasyon öncesi ve sonrası simüle edilen debilerin gözlenen (saha) debiye karşı korelasyon grafiği.

Tablo 3. Paşaköy DMA'sında 24 saatlik saha ölçümü, model çıktıları ve kalibrasyon farklarının karşılaştırılması

Saat	Saha Ölçümü	Program Çıktısı	Kalibrasyon Sonucu	Kalibrasyonsuz Fark	Kalibrasyonlu Fark
00:00	57,54	71	44	13,46	13,54
01:00	54,47	67	44	12,53	10,47
02:00	50,83	56	42	5,17	8,83
03:00	54,39	47	37	7,39	17,39
04:00	46,39	47	36	0,61	10,39
05:00	49,27	53	37	3,73	12,27
06:00	47,90	77	40	29,10	7,90
07:00	51,72	122	53	70,28	1,28
08:00	60,66	152	69	91,34	8,34
09:00	63,39	162	72	98,61	8,61
10:00	68,09	171	75	102,91	6,91
11:00	61,12	177	78	115,88	16,88
12:00	63,38	179	79	115,62	15,62
13:00	66,99	178	80	111,01	13,01
14:00	67,96	171	78	103,04	10,04
15:00	72,88	165	75	92,12	2,12
16:00	69,58	140	74	70,42	4,42
17:00	68,50	114	59	45,50	9,50
18:00	79,06	112	57	32,94	22,06
19:00	78,19	113	58	34,81	20,19
20:00	82,09	111	58	28,91	24,09
21:00	75,68	106	56	30,32	19,68
22:00	66,11	97	55	30,89	11,11
23:00	60,23	81	51	20,77	9,23
24:00	54,55	71	44	16,45	10,55
Maks.				115,88	24,09
Min.				0,61	1,28
Ortalama				51,3524	11,7772
RMSE				65,065	13,088
Korelasyon	–	–	–	0,522	0,579

4. Sonuçlar

Paşaköy DMA'sının hidrolik modellenmesi ve SCADA tabanlı kalibrasyonu sürecinden elde edilen temel bulgular ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- İlk kurulumda tüm borulara atanan tekdüze Hazen-Williams *C* = 130 değeri ve standart referans talep örüntüleri, Paşaköy DMA'sının gerçek tüketim davranışını temsil etmekte yetersiz kalmış; model çıktısı saha ölçümlerinin yaklaşık iki katı bir maksimum debi üretmiştir.
- Kalibrasyon yalnızca DMA girişindeki debi ölçümleriyle yürütülmüş; şebeke içi basınç verisi bulunmadığından Darwin Calibrator boru pürüzlülüğünü anlamlı biçimde değiştirememiş (Hazen-Williams *C* çarpanı = 1,0) ve kalibrasyon fiilen yalnızca talep çarpanı (0,324) üzerinden gerçekleşmiştir. Bu nedenle tam olarak çok parametreli bir kalibrasyon faaliyeti yürütülememiştir.
- Çalışmanın bir sınırı olarak, model kalibrasyonunda kullanılan 24 saatlik saha verisinin dışında, kalibrasyona dahil edilmemiş bağımsız bir veri seti ya da farklı bir zaman dilimi ile doğrulama gerçekleştirilememiştir. Bu durum, modelin kalibrasyon verisi dışındaki koşullarda sergilediği performansın henüz değerlendirilmediği anlamına gelmektedir. Gelecekte farklı zaman dilimlerine veya saha koşullarına ait bağımsız veri setleriyle yürütülecek doğrulama çalışmaları, sonuçların genellenebilirliğini güçlendirecektir.
- Kalibre edilmiş model ile maksimum debi büyüklüğü değerinde (80 m³/h – 82 m³/h, %2,4 fark) kayda değer bir uyum sağlanmıştır. Buna karşılık 24 saatlik RMSE'nin ortalama debiye oranı (%21), DMA toplam giriş debisi için önerilen ±%5–10 tolerans aralığının üzerinde kalmıştır.
- Kalibre edilmiş model; yıllık su kaybı ile minimum gece debisi (MNF) analizleri ve basınç yönetimi senaryoları gibi uygulamalarda kullanılabilir. Ancak maksimum debi değeri modelde akşam yerine öğle saatinde ortaya çıktığından, saatlik talep değerlerinin belirlenmesinde temkinli olunmalıdır.
- Gelecek çalışmalarda; şebeke içine yerleştirilecek basınç ölçerlerle desteklenmiş çok parametreli (talep + pürüzlülük + basınca bağlı kaçak) bir kalibrasyonun ve talep örüntülerinin doğrudan saha verisinden türetilmesinin, modelin saatlik doğruluğunu arttıracağı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Savić, D. A., Banyard, J. K. (Eds.). (2011). Water Distribution Systems. ICE Publishing, London.

[2] Bentley Systems. (2024). WaterGEMS CONNECT Edition Kullanıcı Kılavuzu [Bilgisayar yazılımı dokümantasyonu]. Bentley Systems, Incorporated.

[3] Arabacı, E., Dursun, Ş. (2019). İçme suyu altyapı sistemlerinde hidrolik modelleme: Konya örneği. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 2(4), 177–185.

[4] Tanyimboh, T., Key, M. (2011). Distribution network elements. Savić, D. A., Banyard, J. K. (Ed.), Water Distribution Systems içinde. ICE Publishing, London.

[5] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2025). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) Sonuçları, 2025. Türkiye İstatistik Kurumu. https://data.tuik.gov.tr

[6] Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 users manual (Rapor No. EPA/600/R-00/057). United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

[7] Savić, D. A., Casey, R., Kapelan, Z. (2011). Basic hydraulic principles. Savić, D. A., Banyard, J. K. (Ed.), Water Distribution Systems içinde. ICE Publishing, London.

[8] Todini, E., Pilati, S. (1988). A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. Coulbeck, B., Orr, C.-H. (Ed.), Computer Applications in Water Supply: Vol. 1 içinde (s. 1–20). John Wiley and Sons.

[9] Cross, H. (1936). Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors (University of Illinois Bulletin, No. 286). University of Illinois Engineering Experiment Station.

[10] Hazen, A., Williams, G. S. (1902). Hydraulic Tables. John Wiley and Sons, New York.

[11] Colebrook, C. F., White, C. M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 161(906), 367–381.

[12] Yüksel, Y. (2021). Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik (6. Baskı). Beta Basım Yayım, İstanbul.

[13] Zimoch, I., Bartkiewicz, E. (2018). Process of hydraulic models calibration. E3S Web of Conferences, 59, Article 00007.

[14] Walski, T. M., Chase, D. V., Savić, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E. (2003). Advanced Water Distribution Modeling and Management (1. Baskı). Bentley Institute Press, Exton.

[15] Boyer, S. A. (2009). SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition (4. Baskı). International Society of Automation, Research Triangle Park.

[16] American Water Works Association (AWWA). (2017). M32: Computer Modeling of Water Distribution Systems (4. Baskı). American Water Works Association, Denver.

[17] United States Environmental Protection Agency. (2005). Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management — A Reference Guide for Utilities (Rapor No. EPA/600/R-05/110). Office of Research and Development.

Geleneksel Pik Katsayılarının Yüksek Frekanslı SCADA Verileriyle Karşılaştırılması: Rize Su Dağıtım Şebekesi Örneği

Emine ÖNDER*
emine.onder@std.yildiz.edu.tr

Berna AYAT AYDOĞAN
bayat@yildiz.edu.tr

Anahtar Kelimeler: pik katsayısı, SCADA, su dağıtım şebekesi, su tüketimi, hidrolik tasarım

1. Amaç

Su dağıtım şebekelerinin hidrolik tasarımı, boru çaplarının, pompa istasyonlarının ve arıtma tesislerinin kapasitelerinin belirlenmesinde “Pik Katsayısı” kavramına dayanmaktadır. Literatürde ve geleneksel mühendislik şartnamelerinde, bu katsayılar genellikle nüfusa bağlı ampirik ve deterministik formüllerle (Babbitt, Harmon, vb.) hesaplanmaktadır.

Son yıllarda akıllı su sayaçları ve Yönetsel Kontrol ve SCADA sistemlerinin yaygınlaşması, su talebinin yüksek frekanslı (15 dakikalık veya yarım saatlik) verilerle izlenmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişme, geleneksel nüfus temelli yöntemlerin gerçek tüketim davranışını ne ölçüde temsil ettiğinin yeniden değerlendirilmesini mümkün kılmıştır.

Güncel çalışmalar, Babbitt ve Harmon gibi formüllerin modern şebekelerde pik talebi birçok durumda gerçek değerin üzerinde tahmin ettiğini göstermektedir. Bu formüller, su kullanımının olasılıksal ve stokastik yapısını yeterince dikkate almamakta ve temel olarak deterministik nüfus verilerine dayanmaktadır. Bunun sonucunda şebekelerin gereğinden büyük tasarlanması; yüksek ilk yatırım ve enerji maliyetlerinin yanı sıra, borulardaki suyun bekleme süresinin artmasına ve su kalitesinin olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir.

Yüksek çözünürlüklü akıllı sayaç ve SCADA verileri, su kullanımındaki gerçek zamanlı değişkenliği ortaya koymaktadır. Gurung ve ark. (2014), yüksek çözünürlüklü tüketim verilerinden oluşturulan talep profillerinin geleneksel tasarım eğrilerine göre daha düşük ve gerçekçi pik değerler ürettiğini göstermiştir. McKenna ve ark. (2014), yüksek frekanslı verilerin talep desenlerinin sınıflandırılması, kaçak tespiti, talep tahmini ve şebeke işletmesinin iyileştirilmesindeki önemini vurgulamıştır. Del Giudice ve ark. (2020) ise pik katsayısının yalnızca nüfusa değil, kullanıcı sayısına, mekânsal ölçeğe ve tüketim davranışlarının stokastik yapısına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Oliveira ve ark. (2020) da ampirik eşitliklerden elde edilen katsayıların gerçek tüketim davranışını her zaman temsil etmediğini belirtmiştir. Daha yakın tarihli Stanczyk ve ark. (2025) çalışması ise yüksek frekanslı su tüketim verilerinin zaman serisi analizleriyle anomalilerin ve operasyonel değişimlerin güvenilir biçimde belirlenebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, gerçek zamanlı SCADA ve akıllı sayaç verilerine dayalı yaklaşımların öneminin giderek arttığını ve geleneksel pik katsayılarının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu literatür boşluğu doğrultusunda çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin bol yağış alan ancak topografik zorluklar nedeniyle pompajda yüksek enerji gerektiren Rize ilindeki su dağıtım şebekelerinin pik katsayılarını, yüksek frekanslı gerçek veriler üzerinden yeniden değerlendirmektir.
Bu kapsamda çalışmanın hedefleri şunlardır:

Gerçek Pik Katsayılarının Belirlenmesi: Rize Dağsu, Çorapçılar, Hamzabey (Hastane) ve Pilavdağı depolarının çıkışından elde edilen 16 yıllık (2010-2026) yarım saatlik SCADA verileri kullanılarak, şebekelerin gerçek Maksimum Günlük ve Maksimum Saatlik pik katsayılarının Rolling MAD ayrıştırması gibi veri bilimi yaklaşımlarıyla belirlenmesi.

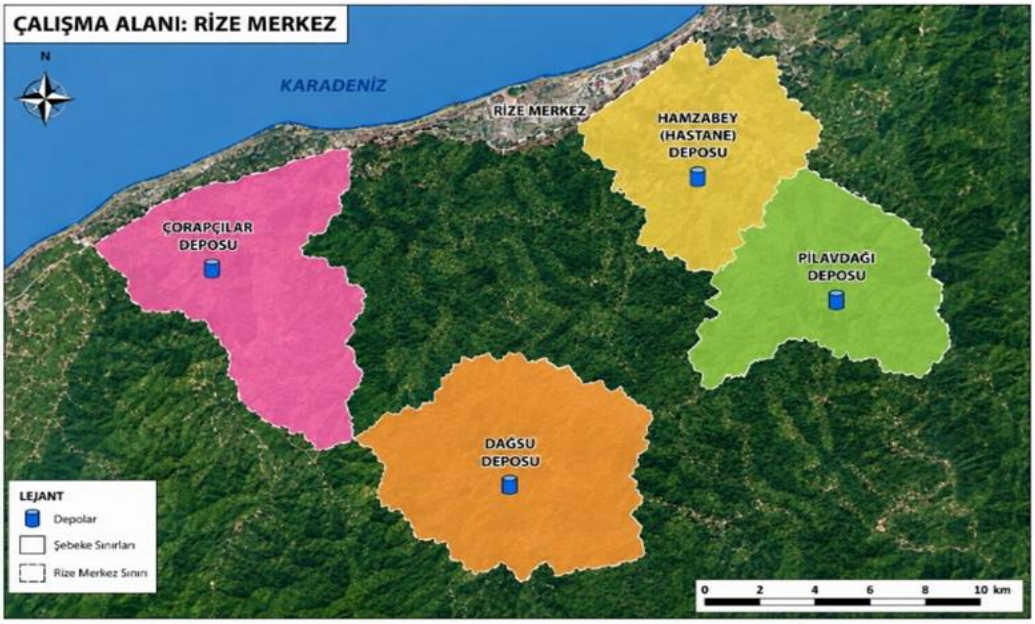
Klasik Yöntemlerle Karşılaştırma: Elde edilen gerçek pik katsayılarının İLBANK standartları ile Babbitt ve Harmon gibi ampirik formüllerden elde edilen teorik katsayılarla istatistiksel olarak karşılaştırılması.
Bu çalışma, klasik mühendislik tasarım kriterlerinin güncel ve yüksek çözünürlüklü SCADA verileriyle sorgulanması açısından literatüre ampirik bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Yöntem

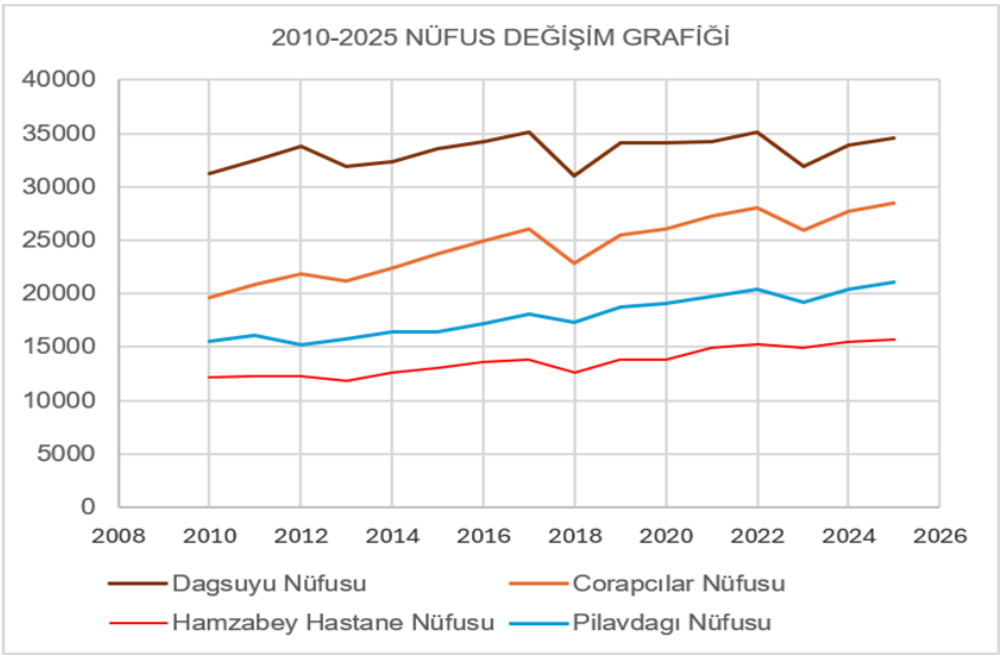
2.1 Materyal

Bu çalışmada, Rize Belediyesi'ne ait önemli su temin noktaları olan Dağsu, Çorapçılar, Hamzabey (Hastane) ve Pilavdağı depolarından şebekeye verilen içme suyu çıkış verileri kullanılmıştır. Veri seti, SCADA sistemi aracılığıyla 30 dakikalık frekanslarla toplanmış olup 2010–2026 yılları arasını kapsayan çok yıllık ve yüksek çözünürlüklü bir zaman serisidir.

Nüfusa dayalı pik katsayısı hesaplama yöntemleriyle karşılaştırma yapabilmek amacıyla öncelikle depoların beslediği mahalleler belirlenmiş, ardından TÜİK'ten alınan mahalle bazlı nüfus verileri düzenlenerek her şebekenin nüfusu hesaplanmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı



Şekil 2. Şebekelere ait nüfus değişimleri

Çalışma alanlarının nüfus değişimleri 2010–2025 yılları arasındaki veriler üzerinden incelenmiş ve uzun dönemli nüfus eğilimleri değerlendirilmiştir. Artış eğilimi gösteren şebekelerde güncel hizmet nüfusunu temsil etmek amacıyla 2025 yılı nüfusu esas alınmıştır. Buna göre; Dağsu şebekesi 34.527 kişi, Çorapçılar 28.459 kişi, Hamzabey 15.735 kişi ve Pilavdağı 21.053 kişi olarak belirlenmiştir.

2.2 Materyal

2.2.1 Pik Katsayıları Temel İlişkisi

Maksimum Günlük Pik Katsayısı (P_1): Yıl içerisindeki en yüksek su tüketiminin gerçekleştiği günün debisinin, yıllık ortalama günlük debiye oranıdır.

Maksimum Saatlik Pik Katsayısı (P_2): En yüksek tüketimin olduğu gündeki maksimum saatlik debinin, o günkü ortalama saatlik debiye oranıdır.

Toplam Pik Katsayısı (P_{toplam}): Şebeke tasarım debisinin belirlenmesinde kullanılan bileşik katsayıdır:
P: Projeye esas toplam kişi sayısı (Nüfus)
N: Bin kişi cinsinden nüfus ($N = P/1000$)

$$p_{toplam} = p_1 \cdot p_2 \tag{1}$$

2.2.2 Geleneksel/Ampirik Pik Katsayısı Formülleri

Literatürde yer alan klasik ampirik formüller çoğunlukla beslenen nüfus (P) veya bin kişi cinsinden nüfus (N) parametresine bağlı deterministik denklemlerdir:

- Babbitt formülü (1928) [4]

Geleneksel ampirik yaklaşımların ilk örneklerinden biri olup şebekelerdeki pik dalgalanmayı doğrudan projeye esas toplam nüfus parametresine bağlar. Nüfus arttıkça eşzamanlı tüketim oranının düşeceği varsayımına dayanır.

$$p_{toplam} = 20 \cdot P^{-0,2} \tag{2}$$

- Harmon formülü (1918) [4]

Özellikle Kuzey Amerika altyapı literatüründe yaygın kabul görmüş, nüfusun kareköküyle orantılı rasyonel bir ampirik denklemdir. Bin kişi cinsinden nüfus (N) parametresini temel alan rasyonel ampirik denklemdir:

$$p_{toplam} = \frac{18 + \sqrt{N}}{4 + \sqrt{N}} \tag{3}$$

- Baines (Gifft / Baines) formülü (1945) [4]

Üstel nüfus fonksiyonuna dayanan ve büyük ölçekli şebekelerde kullanılan ampirik formüldür:

$$p_{toplam} = \frac{5}{N^{0,167}} \tag{4}$$

- İller bankası (İLBANK) yöntemi [6]

Türkiye'deki içme suyu şebeke tasarımlarında kabul edilen standart deterministik yaklaşımdır. Maksimum günlük ve maksimum saatlik pik katsayıları sabit kabul edilir:

$$p_{toplam} = p_1 \cdot p_2 = 1,50 \times 1,50 = 2,25 \tag{5}$$

$$p_1 = 1,50$$
$$p_2 = 1,50$$

- Ten States Standards [7]

Kuzey Amerika standartlarında küçük ve orta ölçekli şebekeler için önerilen varsayılan tasarım katsayısıdır:

$$p_{toplam} = 2,50 \tag{6}$$

- AWWA standartları [8]

Amerikan Su İşleri Birliği tarafından dağıtım şebekelerinde güvenli tarafta kalmak amacıyla tavsiye edilen tasarım katsayısıdır:

$$p_{toplam} = 3{,}00 \tag{7}$$

3.Değerlendirme

3.1 Gerçek Pik Katsayılarının Hesaplanması

Dört şebekenin anomalilerden arındırılmış zaman serileri kullanılarak gerçek insani tüketim sınırları ve pik katsayıları belirlenmiştir.

Hamzabey (Hastane) şebekesinde maksimum günlük pik katsayısı (P_1) 19 Haziran 2022 tarihinde 1,663, maksimum saatlik pik katsayısı (P_2) ise 4 Eylül 2018 saat 23:00'te 2,467 olarak hesaplanmış ve toplam pik katsayısı (P_{toplam}) 4,104 bulunmuştur. Dağsu'da (P_1) değeri 8 Ocak 2021 tarihinde 2,748, (P_2) değeri 18 Ağustos 2017 saat 21:00'de 1,637 ve (P_{toplam}) 4,498 olarak belirlenmiştir. Çorapçılar şebekesinde ($P1$), 16 Mayıs 2024 tarihinde 4,161 ile en yüksek değerine ulaşırken, (P_2) 20 Haziran 2024 saat 10:00'da 1,171 ve (P_{toplam}) 4,873 olarak hesaplanmıştır. Pilavdağı'nda ise (P_1) değeri 8 Ocak 2026 tarihinde 1,712, (P_2) değeri 3 Mart 2025 saat 22:00'de 1,931 ve (P_{toplam}) 3,307 olarak elde edilmiştir.

3.2 Mevsimsel Etkilerin Analizi

Su tüketim alışkanlıkları, iklimsel şartlar ve turizm/tarım gibi sosyo-ekonomik dinamikler pik su talebini doğrudan etkilemektedir. Rize'nin yaz aylarında çay hasadı nedeniyle aldığı göç ve artan sıcaklıklar göz önüne alındığında, temizlenmiş veriler üzerinden dört mevsim için ayrı ayrı pik katsayısı analizi yapılmış ve şu bulgular elde edilmiştir.

Tablo 1. Şebekelerin mevsimsel pik tüketim katsayısı analizi sonuçları

Şebeke	Mevsim	P_1	P_2	P_{toplam}
Hamzabey (Hastane)	İlkbahar	1,55	1,91	2,96
	Yaz	1,66	1,76	2,92
	Sonbahar	1,62	2,47	3,98
	Kış	1,39	1,65	2,30
Dağsu	İlkbahar	1,95	1,22	2,38
	Yaz	1,99	1,64	3,26
	Sonbahar	2,03	1,15	2,32
	Kış	2,75	1,09	2,99
Çorapçılar	İlkbahar	4,16	1,01	4,20
	Yaz	4,03	1,17	4,72
	Sonbahar	4,00	1,35	5,40
	Kış	3,95	1,52	5,98
Pilavdağı	İlkbahar	1,49	1,93	2,88
	Yaz	1,40	1,59	2,23
	Sonbahar	1,69	1,56	2,63
	Kış	1,71	1,77	3,04

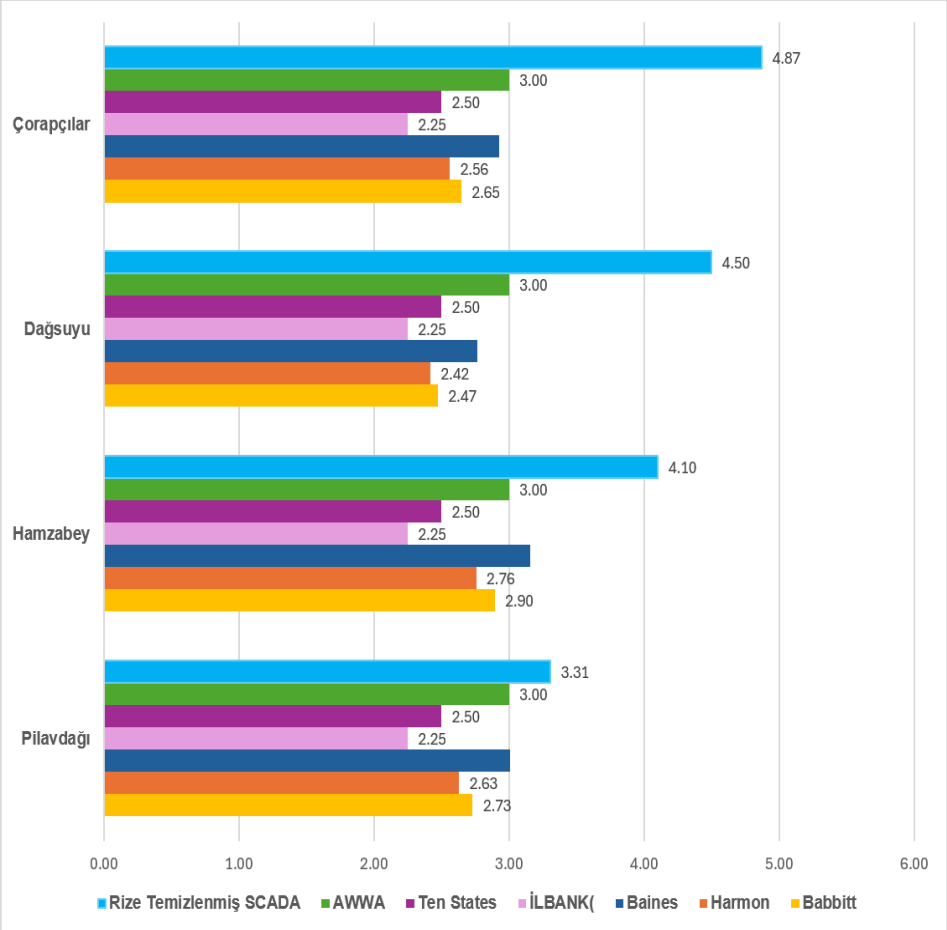
Anomalilerden arındırılmış veriler üzerinden değerlendirildiğinde, şebekelerin mevsimsel pik katsayılarında belirgin farklılıklar görülmektedir. Hamzabey'de günlük pik katsayısı (P_1) yaz mevsiminde 1,663 ile en yüksek değerine ulaşırken, saatlik pik katsayısı (P_2) sonbaharda 2,467 ve toplam pik katsayısı (P_{toplam}) 3,984 olarak gerçekleşmiştir. Dağsu'da (P_1) kış mevsiminde 2,748 ile en yüksek seviyeye çıkarken, (P_{toplam}) yaz mevsiminde 3,255 değerine ulaşmıştır. Çorapçılar'da (P_1) yıl boyunca yüksek seyretmiş, (P_{toplam}) ise kış mevsiminde 5,982 ile diğer şebekelerin üzerinde gerçekleşmiştir. Pilavdağı'nda (P_1) kışın 1,712, (P_2) ilkbaharda 1,931 ve (P_{toplam}) yine kışın 3,035 olarak belirlenmiştir. Genel olarak Çorapçılar yüksek pik katsayılarıyla diğer şebekelerden ayrılırken, Hamzabey, Dağsu ve Pilavdağı'nda mevsimsel değişimler daha sınırlı düzeyde kalmıştır.

3.3 Geleneksel formüllerle karşılaştırma

Bu çalışmanın en çarpıcı bulgusu, Rize gibi zorlu bir topoğrafyaya sahip şehir için elde edilen gerçek SCADA sonuçlarının klasik mühendislik standartlarıyla karşılaştırılmasıdır. Literatürdeki standart ampirik formüllerin ürettiği katsayılar hesaplanmış ve Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Su dağıtım şebekelerin pik katsayılarının geleneksel yöntemlerle karşılaştırması

Şebeke	Babbitt	Harmon	Baines	İLBANK	Ten States	AWWA
Dagsu	2,47	2,42	2,77	2,25	2,50	3,00
Çorapçılar	2,57	2,50	2,86	2,25	2,50	3,00
Hamzabey	2,90	2,76	3,16	2,25	2,50	3,00
Pilavdağı	2,73	2,63	3,01	2,25	2,50	3,00



Şekil 3. Yüksek çözünürlüklü SCADA verisinden elde edilen pik katsayısının geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Rize ilinde farklı nüfus büyüklüklerine sahip Dağsu, Çorapçılar, Hamzabey (Hastane) ve Pilavdağı şebekelerine ait yüksek çözünürlüklü SCADA verileri incelenmiştir. Yarım saatlik zaman serilerinin Rolling MAD yöntemiyle anomalilerden arındırılması sonrasında, şebekelerin gerçek su tüketim davranışları ile pik tüketim katsayıları belirlenmiş; elde edilen sonuçlar Babbitt, Harmon, Baines, İLBANK, Ten States Standards ve AWWA gibi geleneksel yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır.

Analizler, su tüketim alışkanlıklarının iklimsel faktörler, coğrafi özellikler ve bölgesel nüfus hareketliliğine (örneğin çay hasadı dönemleri ve turizm hareketleri) bağlı olarak yıl içinde ciddi değişimler gösterdiğini

kanıtlamıştır. Hamzabey şebekesinde toplam pik katsayısı (P_{toplam}) sonbahar mevsiminde 3,98 ile zirve yaparken, maksimum günlük pik (P_1) yaz aylarında 1,66 olarak gerçekleşmiştir. Dağsu şebekesinde (P_1) kış mevsiminde 2,75 ile en yüksek seviyesine ulaşırken, toplam pik katsayısı (P_{toplam}) yazın 3,26 olmuştur. Pilavdağı deposunda ise kış mevsimi (P_1) (1,71) ve (P_{toplam}) (3,04) açısından en yüksek değerlerin görüldüğü dönem olmuştur. Diğer üç depoya kıyasla yıl boyunca çok daha yüksek pik katsayıları sergileyen Çorapçılar şebekesinde ise, özellikle kış mevsiminde toplam pik katsayısının 5,98 gibi yüksek bir değere ulaşması, standart ampirik formüllerin (İLBANK: 2,25; Babbitt: 2,57) öngördüğü sınırların oldukça üzerine çıkıldığını göstermektedir.

Yüksek çözünürlüklü SCADA verileri ile geleneksel formüller arasında ortaya çıkan bu belirgin uyumsuzluğun altında çeşitli yapısal ve çevresel nedenler yatmaktadır. Öncelikle Babbitt, Harmon ve Baines gibi klasik formüller, nüfus arttıkça eşzamanlı tüketimin düşeceği varsayımına dayanan deterministik yaklaşımlar üzerine kuruludur ve hane halkı tüketim alışkanlıklarının olasılıksal yapısını yeterince dikkate almamaktadır. Buna ek olarak, Rize'nin bol yağış alan ancak engebeli ve dik topoğrafyası sebebiyle yerel basınç yönetiminde yaşanan zorluklar, şebekelerdeki anlık fiziki kayıp-kaçak oranlarını artırarak (özellikle kırsal-kentsel geçiş akslarında) pik katsayılarını standart beklentilerin çok üzerine taşımaktadır. Sabit formüller ayrıca, hastane gibi özel donatı alanlarının (Hamzabey) mekânsal ölçeğini ve yaz döneminde çay hasadı için kırsala doğru gerçekleşen mevsimsel göç gibi sosyo-ekonomik dinamikleri yansıtamayan tek tip bir parametreye indirgenmiştir. Yüksek çözünürlüklü SCADA verileri, geleneksel nüfus temelli modellerin gözden kaçırdığı bu anlık tüketim anomalilerini ve yerel yüklenmeleri net bir şekilde yakalamaktadır.

Sonuç olarak; geleneksel formüllerin ürettiği sabit katsayılar, şebekelerin gerçek operasyonel koşullarında görülen mevsimsel pik dalgalanmalarını tam olarak temsil edememektedir. Klasik yöntemlerin bazı durumlarda gerçek pikleri alt sınırlarda bırakması sistem güvenliğini tehlikeye atarken, bazı dönemlerde ise aşırı boyutlandırmaya yol açarak yüksek yatırım ve enerji maliyetlerine neden olmaktadır. Elde edilen bulgular, su dağıtım şebekelerinin hidrolik tasarımında ve pompa optimizasyonunda yalnızca nüfusa dayalı statik ampirik formüller yerine; yerel iklimsel, topoğrafik ve mevsimsel dinamikleri hesaba katan yüksek frekanslı SCADA verilerine dayalı veri odaklı yaklaşımların benimsenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, hem altyapı yatırımlarında ekonomik verimliliği artıracak hem de boru hatlarındaki su bekleme sürelerini optimize ederek içme suyu kalitesinin korunmasına katkı sağlayacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Gurung, T. R., Stewart, R. A., Sharma, A. K., & Beal, C. D. (2014). Smart meters for enhanced water supply network modelling and infrastructure planning. Resources, Conservation and Recycling, 90, 34–50.

[2] McKenna, S. A., Fusco, F., & Eck, B. J. (2014). Water demand pattern classification from smart meter data. Procedia Engineering, 70, 1121–1130.

[3] Del Giudice, G., Di Cristo, C., & Padulano, R. (2020). Spatial Aggregation Effect on Water Demand Peak Factor. Water, 12(7), 2019.

[4] Oliveira, K. P., Sodek, D. B., Fais, L. M. C. F., Dalfré Filho, J. G., & Martim, A. L. S. S. (2020). Water consumption peak demand factor: Effectiveness analysis with different approaches. REGET, 24(Special Issue).

[5] Stanczyk, J., Ramm, K., & Licznar, P. (2025). Assessing the operating condition of a domestic distribution system based on the power spectra of high-frequency water consumption signals. Water Research, 278, 123320.

[6] İller Bankası (İLBANK): İller Bankası A.Ş. İçme Suyu Tesisleri Etüt, Proje ve Şartnameleri / Tasarım Esasları.

[7] Ten States Standards: Recommended Standards for Water Works (Great Lakes—Upper Mississippi River Board of State and Provincial Public Health and Environmental Managers).

[8] AWWA: American Water Works Association - Manual M31: Distribution System Requirements for Fire Protection / Water Distribution Operator Training Handbook.

Kuraklık İndislerinin Karşılaştırılmasında Korelasyon ve Uyum Ölçütlerinin Farklı Zaman Ölçeklerinde Değerlendirilmesi: Bergama İstasyonu Örneği

Emre KORKMAZ*
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale
emrekorkmaz4545@gmail.com

Fevziye Ayça SARAÇOĞLU
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çanakkale
Orcid No: 0000-0002-9626-7652,
favarol@comu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* meteorolojik kuraklık, spi, spei, rdi, zaman ölçeği

1. Amaç

Meteorolojik kuraklık, uzun süreli ve sürekli yağış eksiklikleri ile karakterize edilen aşırı meteorolojik bir olaydır [1]. Kuraklığın nicel değerlendirilmesinde kullanılan indisler, farklı matematiksel yapılara ve meteorolojik girdilere sahip olduğundan aynı koşullarda farklı indis değerleri ve kuraklık sınıfları üretebilmektedir [2].

Kuraklık indislerinin karşılaştırılmasında Pearson korelasyonu yaygın olarak kullanılmakla birlikte, yüksek korelasyon kuraklık sınıflarındaki uyumu her zaman yansıtmamaktadır [3]. Vergni vd. [3], yüksek korelasyonlara rağmen Cohen's Kappa ile belirlenen sınıf uyumunun daha düşük kalabildiğini göstermiştir. Pandya ve Gontia [4] da Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), Reconnaissance Drought Index (RDI) ve Rainfall Anomaly Index (RAI) indislerini 1, 3 ve 6 aylık ölçeklerde karşılaştırarak Kappa katsayılarının indis çiftlerine göre farklılaşabildiğini ortaya koymuştur. Türkiye genelinde SPI, SPEI ve RDI indislerinin zaman ölçeği ve bölgeye göre farklı kuraklık şiddeti örüntüleri gösterebildiği belirlenmiştir [2]. Gümüş [5], SPI ile SPEI arasındaki korelasyonun bölge ve zaman ölçeğine göre değiştiğini ve zaman ölçeği arttıkça genel olarak yükseldiğini göstermiştir. Yakın tarihli bir çalışmada ise SPI–RDI ve SPEI–RDI çiftlerinde Cohen's Kappa uyumunun daha uzun zaman ölçeklerinde genel olarak arttığı, SPI–SPEI uyumunun görece daha kararlı kaldığı görülmüştür [6]. Bu bulgular, sayısal ilişki ile kuraklık sınıfı uyumunun farklı bilgiler sağladığını göstermektedir [3, 4, 6].

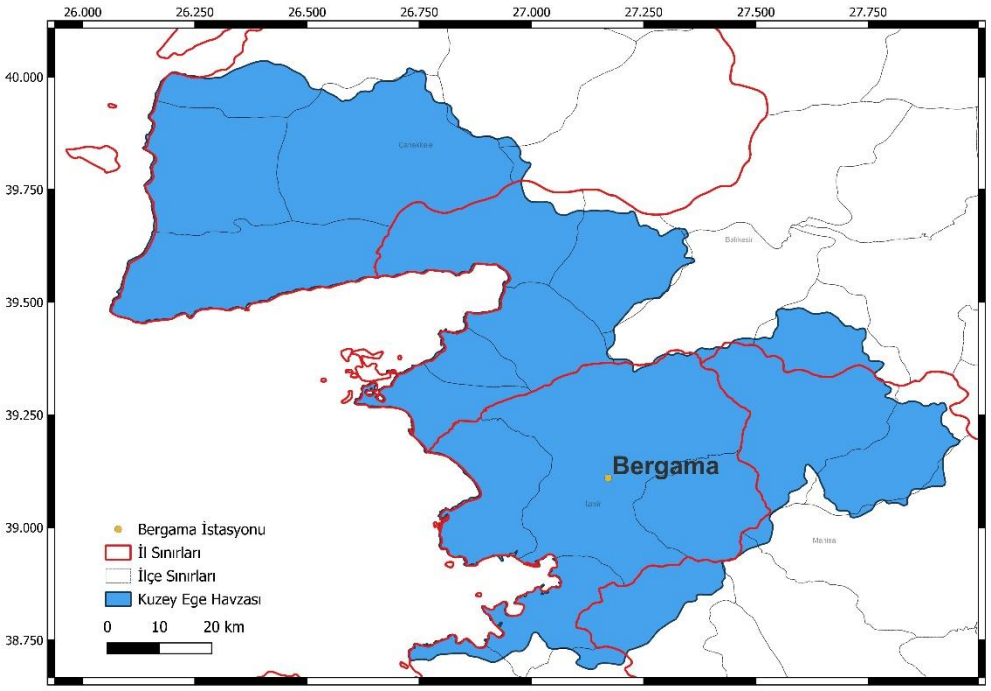
Bu çalışmada SPI, SPEI ve RDI, Bergama istasyonunda 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde karşılaştırılmıştır. İndis değerleri arasındaki sayısal ilişki Pearson korelasyon katsayısı, kurak ayların örtüşmesi Jaccard benzerlik katsayısı ve kuraklık sınıflarındaki uyum doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa katsayısı ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın özgün yönü, sayısal ilişki, kurak dönem örtüşmesi ve sınıflandırma uyumunun farklı zaman ölçeklerinde aynı çerçevede birlikte değerlendirilmesidir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veriler

Çalışma, Kuzey Ege Havzası'nda yer alan Bergama meteoroloji istasyonu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kuzey Ege Havzası'nda su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminde havzanın su potansiyeli, kuraklık koşulları ve farklı sektörel su ihtiyaçlarının birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır [7]. Kuzey Ege Havzası ve Bergama meteoroloji istasyonunun konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çalışmanın ana analiz dönemi 1975-2023 olarak belirlenmiştir. Analizlerde Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verileri kullanılmıştır. Veri serileri eksik gözlem ve süreklilik açısından kontrol edilmiş, eksik gözlemler çoklu atama (Multiple Imputation) yöntemi kullanılarak tamamlanmıştır.



Şekil 1. Kuzey Ege Havzası ve çalışmada kullanılan Bergama İstasyonu

2.2 Kuraklık İndislerinin Hesaplanması

Kuraklığın değerlendirilmesinde SPI [8], SPEI [9] ve RDI [10] olmak üzere üç kuraklık indisi kullanılmış ve indisler 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde hesaplanmıştır. Elde edilen indis değerleri, standartlaştırılmış kuraklık indislerinde kullanılan eşik değerleri esas alınarak Tablo 1'de verilen ortak kuraklık sınıflarına dönüştürülmüştür [11]. SPEI hesaplamaları, Beguería ve Vicente-Serrano tarafından geliştirilen SPEI Calculator [12] kullanılarak aylık yağış, ortalama sıcaklık ve istasyon konum bilgileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. RDI hesaplamalarında DrinC [13], SPI hesaplamalarında ise RDIT yazılımından yararlanılmıştır. SPEI ve RDI hesaplamaları için gerekli potansiyel evapotranspirasyon değerleri Thornthwaite yöntemi [14] ile belirlenmiştir.

Tablo 1. Kuraklık Sınıfları ve İndislerin Eşik Değerleri [11, 15]

Kuraklık Sınıflandırması	İndis Değeri
Normal	-0,49 ile 0,49
Hafif Kuraklık	− 0,50 ile − 0,99
Orta Kuraklık	− 1,00 ile − 1,49
Şiddetli Kuraklık	− 1,50 ile − 1,99
Aşırı Kuraklık	≤ − 2,00

2.3 İndisler Arası Uyumun Değerlendirilmesi

İndisler arasındaki sayısal ilişki ve uyum; Pearson korelasyon katsayısı, Jaccard benzerlik katsayısı ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa kullanılarak değerlendirilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı, iki indis serisi arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirlemek amacıyla Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır [16]:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{t=1}^{n}(y_t - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Burada x_t ve y_t, karşılaştırılan iki kuraklık indisine ait değerleri; $\overline{x}$ ve $\overline{y}$, ilgili serilerin ortalamalarını; *n* ise ortak gözlem sayısını ifade etmektedir.
Kurak ayların iki indis arasındaki örtüşmesi Jaccard benzerlik katsayısı ile değerlendirilmiş ve katsayı Eşitlik (2) ile hesaplanmıştır [17].

$$J(A,B)=\frac{|A\cap B|}{|A\cup B|} \quad (2)$$

Burada *A* ve *B*, karşılaştırılan iki indis tarafından kurak belirlenen ay kümelerini; $|A \cap B|$, ortak kurak ayların; $|A \cup B|$ ise en az bir indis tarafından kurak belirlenen ayların sayısını ifade etmektedir. Jaccard analizinde kurak olmayan aylar 0; hafif, orta, şiddetli ve aşırı kurak aylar 1 olarak kodlanmış, her iki indis tarafından da kurak olmayan aylar Jaccard benzerlik hesabına katkıda bulunmamıştır.

Kuraklık sınıflarındaki uyum, sınıflar arasındaki uzaklığı da dikkate alan doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa katsayısı ile değerlendirilmiştir [18,19]. Ağırlıklı Kappa, Eşitlik (3) ile hesaplanmıştır [18]:

$$\kappa_w = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{k-1}\sum_{j=0}^{k-1} v_{ij}p_{oij}}{\sum_{i=0}^{k-1}\sum_{j=0}^{k-1} v_{ij}p_{eij}} \quad (3)$$

Burada p_{oij}, iki indis tarafından sırasıyla i ve j sınıflarına atanan gözlemlerin gözlenen oranını; p_{eij}, aynı sınıf kombinasyonunun tesadüfen beklenen oranını; v_{ij}, i ve j sınıfları arasındaki uyuşmazlık ağırlığını; k ise toplam sınıf sayısını ifade etmektedir. Beklenen oran, Eşitlik (4) ile belirlenmiştir.

$$p_{eij} = p_{i\cdot}\, p_j \quad (4)$$

Doğrusal ağırlıklandırmada uyuşmazlık ağırlıkları, sınıflar arasındaki mutlak uzaklığa göre Eşitlik (5) ile tanımlanmıştır [18, 19]:

$$v_{ij} = |i - j| \quad (5)$$

Bu çalışmada $k = 5$ olup, normal ve ıslak koşulları temsil eden kurak olmayan aylar 0; hafif, orta, şiddetli ve aşırı kurak aylar ise sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 olarak kodlanmıştır.

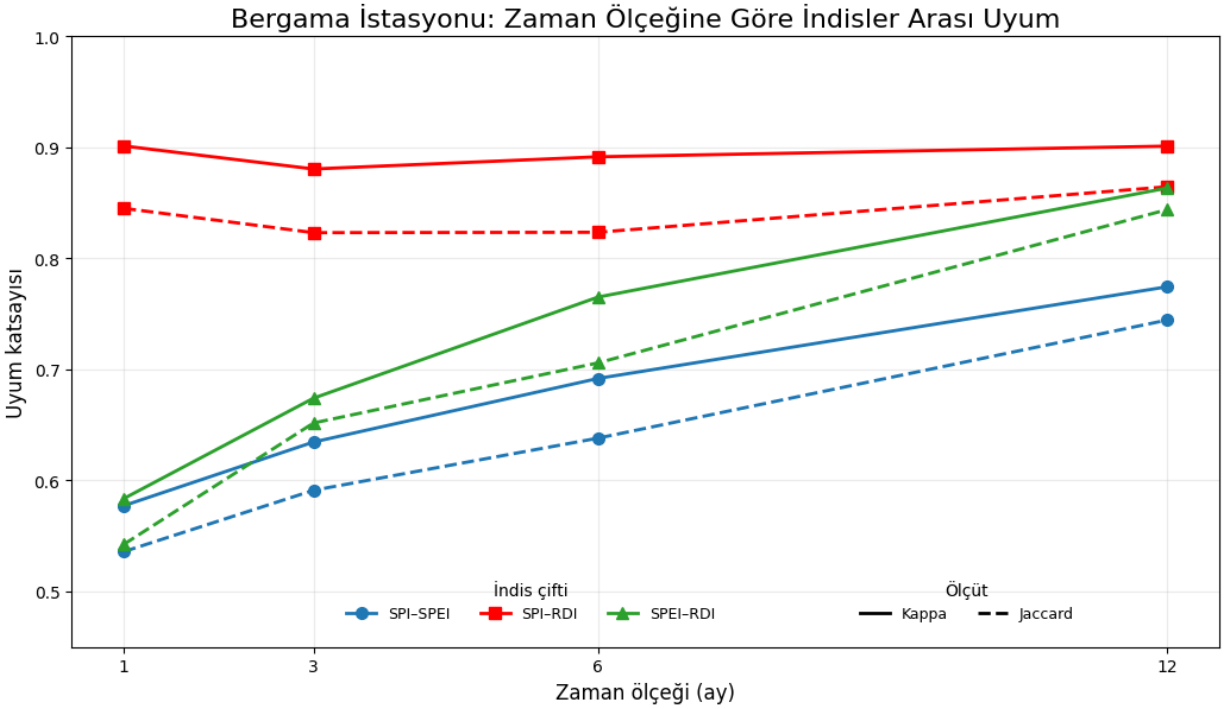
Analizler Bergama istasyonu için 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde, her üç indise ait sayısal indis değerlerinin mevcut olduğu tüm aylar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her zaman ölçeğinde SPI–SPEI, SPI–RDI ve SPEI–RDI olmak üzere üç indis çifti karşılaştırılmıştır. İndisler arasındaki ilişkinin ve uyumun zaman ölçeğine bağlı değişimi, bu indis çiftleri için hesaplanan Pearson korelasyon, Jaccard benzerlik ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa katsayılarının karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir.

3. Değerlendirme

Bu istasyonda ve incelenen zaman ölçeklerinde kuraklık indisleri arasındaki sayısal ilişkinin zaman ölçeğinin artmasıyla genel olarak güçlendiği belirlenmiştir. Pearson korelasyon katsayıları 1, 3, 6 ve 12 aylık ölçeklerde SPI–SPEI için sırasıyla 0,852, 0,867, 0,906 ve 0,949; SPI–RDI için 0,949, 0,966, 0,985 ve 0,989; SPEI–RDI için ise 0,849, 0,875, 0,934 ve 0,977 olarak hesaplanmıştır. Jaccard ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa sonuçlarında SPI–RDI çiftinin tüm zaman ölçeklerinde yüksek uyum gösterdiği, SPI–SPEI ve SPEI–RDI çiftlerinde ise uyumun zaman ölçeği arttıkça belirgin biçimde yükseldiği görülmüştür. Özellikle 1 aylık ölçekte SPI–SPEI ve SPEI–RDI çiftlerinde yüksek Pearson korelasyonuna rağmen daha düşük Jaccard ve Kappa değerlerinin elde edilmesi, yüksek sayısal ilişkinin aynı ayların kurak olarak belirlenmesini veya aynı kuraklık sınıfına atanmasını garanti etmediğini göstermektedir. Benzer şekilde, önceki çalışmalarda da kuraklık indisleri arasında yüksek korelasyon bulunmasına karşın kuraklık sınıfları bakımından Kappa uyumunun daha düşük kalabildiği bildirilmiştir [3,4]. İndis çiftlerine ait Jaccard benzerlik ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa katsayılarının zaman ölçeğine göre değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.

Jaccard ve Kappa sonuçları, indis çiftleri arasındaki uyumun zaman ölçeğine bağlı olarak farklılaştığını göstermiştir. SPI–SPEI çiftinde Jaccard 1 aylık ölçekte 0,536'dan 12 aylık ölçekte 0,744'e, Kappa ise 0,577'den 0,774'e yükselmiştir. SPEI–RDI çiftinde aynı değerler sırasıyla 0,542'den 0,844'e ve 0,584'ten

0,863'e yükselirken, SPI–RDI çifti tüm zaman ölçeklerinde yüksek ve görece kararlı bir uyum göstermiştir. Bu sonuçlar, zaman ölçeği ile birlikte değişimin özellikle SPI–SPEI ve SPEI–RDI çiftlerinde daha belirgin olduğunu göstermektedir. Farklı kuraklık indisleri arasındaki ilişkinin zaman ölçeğine bağlı olarak değişebildiği daha önceki çalışmalarda da gösterilmiş; Türkiye genelinde SPI ve SPEI karşılaştırmalarında özellikle kısa zaman ölçeklerinde farklılıkların daha belirgin olabildiği bildirilmiştir [5].



Şekil 2. Bergama istasyonunda SPI–SPEI, SPI–RDI ve SPEI–RDI çiftlerine ait Jaccard benzerlik ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa katsayılarının zaman ölçeğine göre değişimi

4. Sonuçlar

Çalışma sonuçları, Bergama istasyonunda incelenen üç kuraklık indisi (SPI, SPEI ve RDI) arasındaki sayısal ilişkinin zaman ölçeği arttıkça genel olarak güçlendiğini göstermiştir. Bununla birlikte, özellikle 1 aylık ölçekte SPI–SPEI ve SPEI–RDI çiftlerinde yüksek Pearson korelasyonlarına karşılık daha düşük Jaccard ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa değerlerinin elde edilmesi, yüksek sayısal ilişkinin aynı ayların kurak olarak belirlenmesini veya aynı kuraklık sınıfına atanmasını tek başına açıklamadığını ortaya koymuştur. SPI–RDI çiftinin 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinin tamamında yüksek ve görece kararlı bir uyum gösterdiği belirlenmiştir. Buna karşılık SPI–SPEI ve SPEI–RDI çiftlerinde Jaccard ve Kappa değerleri zaman ölçeğinin artmasıyla yükselmiştir. Bu sonuç, indisler arasındaki uyumun yalnızca kullanılan kuraklık indisine değil, seçilen zaman ölçeğine göre de değişebildiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, kuraklık indisleri arasındaki yüksek korelasyonun kurak ayların örtüşmesini ve kuraklık sınıflandırmasındaki uyumu tek başına açıklamadığını göstermiştir. Özellikle kısa zaman ölçeklerinde ortaya çıkan bu farklılıklar, indislerin karşılaştırılmasında yalnızca korelasyon katsayılarına dayalı değerlendirmelerin sınırlı kalabileceğine işaret etmektedir. Benzer şekilde, farklı kuraklık indislerinin karşılaştırıldığı önceki çalışmalarda da [3,4] yüksek korelasyon değerlerine rağmen kuraklık sınıfları arasındaki uyumun daha düşük olabildiği bildirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen Jaccard ve doğrusal ağırlıklı Cohen's Kappa sonuçları da kurak ayların ve kuraklık sınıflarının belirlenmesindeki uyumun zaman ölçeğine bağlı olarak değişebildiğini göstermiştir. Bergama İstasyonunda SPI-RDI çifti farklı zaman ölçeklerinde daha yüksek ve görece kararlı bir uyum sergilerken, SPI-SPEI ve SPEI-RDI çiftlerinde uyumun zaman ölçeğinin artmasıyla belirgin biçimde yükseldiği görülmüştür. Bu bulgular, kuraklık indislerinin karşılaştırılmasında sayısal ilişkinin yanı sıra kurak ayların örtüşmesi ve

sınıflandırma uyumunun da birlikte değerlendirilmesinin daha kapsamlı bir değerlendirme sağlayabileceğine işaret etmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar Bergama istasyonu ile sınırlı olup, farklı meteorolojik koşullara sahip istasyonlarda yapılacak benzer karşılaştırmaların bu bulguların kapsamının ve geçerliliğinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Hauser, M., Gudmundsson, L., Orth, R., Jézéquel, A., Haustein, K., Vautard, R., van Oldenborgh, G. J., Wilcox, L., Seneviratne, S. I. (2017). Methods and Model Dependency of Extreme Event Attribution: The 2015 European Drought. Earth's Future, 5(10), 1034–1043. DOI: 10.1002/2017EF000612.

[2] Yaman Öz, F., Özelkan, E., Tatlı, H. (2024). Comparative analysis of SPI, SPEI, and RDI indices for assessing spatio-temporal variation of drought in Türkiye. Earth Science Informatics, 17, 4473–4505.

[3] Vergni, L., Todisco, F., Di Lena, B. (2021). Evaluation of the Similarity Between Drought Indices by Correlation Analysis and Cohen's Kappa Test in a Mediterranean Area. Natural Hazards, 108, 2187–2209. DOI: 10.1007/s11069-021-04775-w.

[4] Pandya, P. A., Gontia, N. K. (2025). Correlation vs. Kappa Statistic: A New Perspective on Comparing Meteorological Drought Indices. Theoretical and Applied Climatology, 156, Article 19. DOI: 10.1007/s00704-024-05291-0.

[5] Gumus, V. (2023). Evaluating the Effect of the SPI and SPEI Methods on Drought Monitoring over Turkey. Journal of Hydrology, 626, 130386. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130386.

[6] Aryal, S., Dastour, H., Farjad, B., Achari, G., Gupta, A., Hassan, Q. K. (2025). Enhancing Drought Monitoring in Southern Alberta: A Comparative Evaluation of Drought Indices for Regional Applicability. Results in Engineering, 27, 106403. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106403.

[7] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (2025). Kuzey Ege Havzası Su Tahsis Planı ve Eylem Planı. Ankara.

[8] McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17–22 January 1993, Anaheim, California, 179–184.

[9] Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 23(7), 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

[10] Tsakiris, G., Pangalou, D., Vangelis, H. (2007). Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management, 21(5), 821–833. DOI: 10.1007/s11269-006-9105-4.

[11] Zhang, B., Zhao, X., Jin, J., Wu, P. (2015). Development and Evaluation of a Physically Based Multiscalar Drought Index: The Standardized Moisture Anomaly Index. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(22), 11575–11588. DOI: 10.1002/2015JD023772.

[12] Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M. (2009). SPEI Calculator. DIGITAL.CSIC, Spanish National Research Council (CSIC), Madrid, Spain. DOI: 10.20350/DIGITALCSIC/8997.

[13] Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G. (2015). DrinC: A Software for Drought Analysis Based on Drought Indices. Earth Science Informatics, 8(3), 697–709. DOI: 10.1007/s12145-014-0178-y.

[14] Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, 38(1), 55–94. DOI: 10.2307/210739.

[15] Tigkas, D. (2008). Drought Characterisation and Monitoring in Regions of Greece. European Water, 23/24, 29–39.

[16] Pearson, K. (1896). Mathematical Contributions to the Theory of Evolution. III. Regression, Heredity, and Panmixia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 187, 253–318. DOI: 10.1098/rsta.1896.0007.

[17] Jaccard, P. (1901). Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques régions voisines. Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, 37(140), 241–272. DOI: 10.5169/seals-266440.

[18] Cohen, J. (1968). Weighted Kappa: Nominal Scale Agreement with Provision for Scaled Disagreement or Partial Credit. Psychological Bulletin, 70(4), 213–220. DOI: 10.1037/h0026256.

[19] Cicchetti, D. V., Allison, T. (1971). A New Procedure for Assessing Reliability of Scoring EEG Sleep Recordings. American Journal of EEG Technology, 11(3), 101–110. DOI: 10.1080/00029238.1971.11080840.

İklim Değişikliğinin Akım Rejimine Etkilerinin Olasılıksal Değerlendirilmesi: İznik Gölü Havzası Örneği

Anıl ÇALIŞKAN TEZEL*
Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Kampüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü 16059 Nilüfer/Bursa, 0000-0002-5746-9286
anilcal@gmail.com

Adem AKPINAR
Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Kampüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü 16059 Nilüfer/Bursa, 0000-0002-9042-6851
ademakpinar@uludag.edu.tr

Aslı BOR
Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Environmental Engineering 7491 Trondheim/Norway, 0000-0002-1679-5130
asli.b.turkben@ntnu.no
İzmir Ekonomi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 35330 Balçova/İzmir, 0000-0002-1679-5130
asli.turkben@ieu.edu.tr

Şebnem ELÇİ
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü 35430 Gülbahçe Kampüsü/İzmir, 0000-0002-9306-1042
sebnemelci@iyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler: İznik Gölü Havzası, SWAT+ modeli, iklim değişikliği, Bayesyen model ortalaması

1. Amaç

İklim değişikliği, sıcaklık ve yağış rejimlerinde meydana getirdiği değişiklikler nedeniyle su kaynakları üzerinde önemli etkiler oluşturmakta ve gelecekteki su miktarı ile su kalitesinin güvenilir şekilde tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, iklim değişikliğinin hidrolojik etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılan farklı iklim senaryolarından kaynaklanan belirsizliklerin de nicel olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle farklı iklim modelleri kullanılarak elde edilen akım projeksiyonları arasında önemli farklılıklar bulunabilmekte ve bu durum su kaynakları planlamasında karar verme süreçlerini doğrudan etkilemektedir.

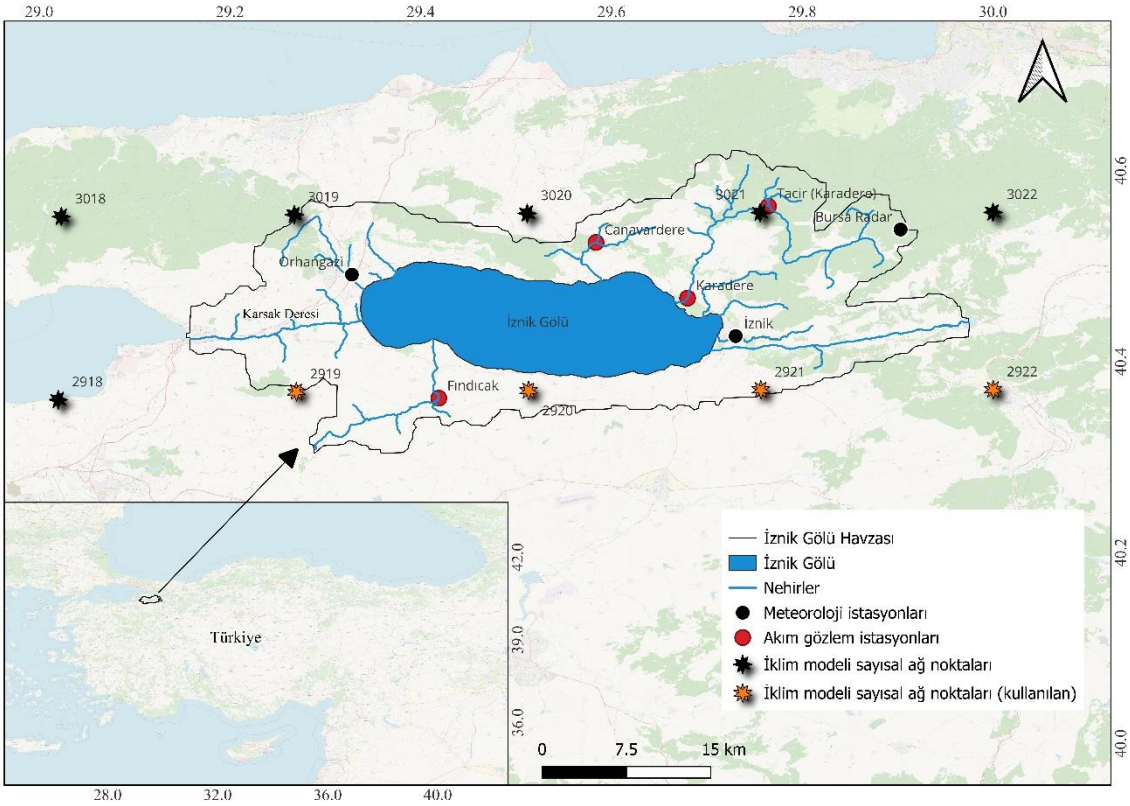
Bu çalışmanın amacı, İznik Gölü Havzası için SWAT+ hidrolojik modeli kullanılarak elde edilen iklim değişikliği kaynaklı akım projeksiyonlarını Bayesyen Model Ortalaması (Bayesian Model Averaging, BMA) yöntemi ile olasılıksal olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda farklı iklim modeli, emisyon senaryosu, potansiyel evapotranspirasyon yöntemi ve arazi kullanım senaryoları kullanılarak gerçekleştirilen modelleme sonuçları BMA yaklaşımı ile bir araya getirilmiş, ölçülmüş yağış verilerini daha iyi temsil eden modellere daha yüksek ağırlık verilerek maksimum akım (Q_{max}) ve ortalama akım (Q_{ort}) değişimlerinin olasılık dağılımları elde edilmiştir. Böylece, iklim değişikliğinin akım üzerindeki olası etkileri yalnızca tek bir model sonucuna bağlı kalmaksızın, farklı model çıktılarının güvenilirlikleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Hidrolojik Model

Çalışma alanı olarak, Marmara Bölgesi'nin en önemli tatlı su kaynaklarından biri olan İznik Gölü Havzası seçilmiştir (Şekil 1). Yaklaşık 1400 km² yüzölçümüne sahip havza, İznik Gölü'nü besleyen Karadere, Fındıcak, Olukdere ve Kırandere gibi önemli akarsuları içermektedir. Türkiye'nin beşinci, Marmara Bölgesi'nin ise en büyük doğal tatlı su gölü olan İznik Gölü, içme suyu, tarımsal sulama, balıkçılık ve ekosistem açısından stratejik öneme sahiptir [1, 2]. Bununla birlikte, son yıllarda iklim değişikliği, artan su kullanımı ve insan faaliyetleri nedeniyle göl seviyesinde meydana gelen düşüşler ve su kalitesine ilişkin sorunlar, havzadaki su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini daha da önemli hale getirmiştir. Bu

nedenle, İznik Gölü Havzası, iklim değişikliğinin hidrolojik etkilerinin araştırılması açısından önemli bir çalışma alanıdır.



Şekil 1. Çalışma alanı [3]

Havzanın hidrolojik davranışını temsil etmek amacıyla SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) hidrolojik modeli kullanılmıştır [4,5]. Model; sayısal yükseklik verisi, toprak, arazi kullanım/arazi örtüsü ve günlük olarak ölçülmüş meteorolojik veriler kullanılarak kurulmuş, günlük olarak ölçülmüş akım gözlemlerinin aylık ortalaması yardımıyla kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Modelin kalibrasyon ve doğrulama çalışmalarında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından işletilen Karadere (D02A031) ve Fındıcak (E02A016) akım gözlem istasyonlarına ait akım verileri kullanılmıştır. Aynı istasyonlar, iklim değişikliğinin akım rejimi üzerindeki olası etkilerinin değerlendirilmesinde referans dönem akım verilerinin elde edilmesi amacıyla da kullanılmıştır. SWAT+ modelinin meteorolojik girdilerini oluşturmak amacıyla günlük yağış, maksimum ve minimum sıcaklık ile bağıl nem verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen İznik Meteoroloji İstasyonu verilerinden elde edilmiştir. Rüzgâr hızı ve solar radyasyon verileri ise NASA POWER veri tabanından sağlanmıştır. Simülasyonlar, 2007–2021 dönemini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiş; 2007–2009 yılları ısınma (warm-up), 2010–2016 yılları kalibrasyon ve 2017–2021 yılları doğrulama dönemi olarak belirlenmiştir. Model performansının değerlendirilmesinde Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE), Kling–Gupta Verimlilik Katsayısı (KGE), Determinasyon Katsayısı (R^2) ve Sapma Yüzdesi (PBIAS) istatistiklerinden yararlanılmıştır. NSE, KGE, R2 ve PBIAS hesaplamaları sırasıyla Eşitlik 1, 2, 3 ve 4 ile gösterilmiştir.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (1)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} - 1\right)^2 - \left(\frac{\mu_m}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - \overline{Q_o}) * (Q_m^t - \overline{Q_m})]^2}{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - \overline{Q_o})^2 * \sum_{t=1}^{T}(Q_m^t - \overline{Q_m})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t - Q_m^t)x100}{\sum_{t=1}^{T}(Q_o^t)}\right] \quad (4)$$

Burada Q_o^t, Q_m^t ölçülmüş ve modellenen akım değerlerini ve $\overline{Q_o}$, $\overline{Q_m}$ ölçülen ve modellenen akım değerlerinin belirli bir zaman aralığındaki (Δt) ortalama değerini, r ölçülen ve modellenen akım verileri için Pearson korelasyon katsayısını, σ standart sapma ve μ ortalama değeri ifade etmektedir.

2.2 İklim Projeksiyon Verisi

İklim projeksiyonları için Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından RegCM4.3.4 bölgesel iklim modeli kullanılarak dinamik ölçek küçültme yöntemiyle üretilen üç küresel iklim modeline (HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M) ait toplam 10 sayısal ağ noktası değerlendirilmiştir [6]. Her bir iklim modeli ve sayısal ağ noktası için iyimser ve kötümser olmak üzere RCP4.5 ve RCP8.5 emisyon senaryosu verisi mevcuttur. İklim projeksiyon verileri günlük yağış, minimum ve maksimum sıcaklık olmak üzere 2015-2099 dönemini kapsamaktadır. İklim modeli seçiminde, projeksiyon verileri ile İznik Meteoroloji İstasyonuna ait gözlenen veriler NSE, KGE, R^2 ve PBIAS istatistikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tarihsel gözlemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda en uyumlu 4 sayısal ağ noktası seçilmiş ve bu veriler SWAT+ modeline girdi olarak kullanılarak yakın (2030–2045) ve uzak gelecek (2083–2098) dönemleri için akım projeksiyonları elde edilmiştir.

2.3 Bayesyen Model Ortalaması Yöntemi

Bu çalışmada, iklim değişikliği kaynaklı akım projeksiyonlarının olasılıksal olarak değerlendirilmesi amacıyla BMA yöntemi kullanılmıştır. BMA analizinde, 2 farklı potansiyel evapotranspirasyon (PET) hesaplama yöntemi (Penman–Monteith ve Hargreaves), 2 arazi kullanım senaryosu, 2 emisyon senaryosu ve 4 farklı projeksiyon verisi kombinasyonlarından elde edilen toplam 32 hidrolojik model çalıştırması yapılmıştır. Bu yöntem, farklı iklim verilerinden elde edilen akım çıktılarını tek bir tahmine dönüştürürken her modele eşit önem vermek yerine, geçmiş gözlemleri temsil etme başarısına göre farklı ağırlıklar atanmasına dayanan olasılıksal bir yöntemdir. Böylece, gözlemsel verileri daha iyi temsil eden modeller nihai tahmin üzerinde daha fazla etkiye sahip olmakta, daha düşük performans gösteren modellerin etkisi ise azaltılmaktadır. Bu yönüyle BMA, iklim değişikliği çalışmalarında farklı projeksiyon verilerinden kaynaklanan belirsizliklerin daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

İklim modellerinin ağırlıkları, referans dönemde gözlenen yağış verilerini temsil etme performanslarına göre belirlenmiştir. Daha sonra, bu ağırlıklandırılmış simülasyon sonuçları kullanılarak maksimum akım (Q_{max}) ve ortalama akım (Q_{ort}) değişimlerine ilişkin artalan (posterior) olasılık dağılımları elde edilmiştir. Artalan dağılımlar, BMA ile hesaplanan ağırlıklı ortalama (μ) ve standart sapma (σ) değerleri kullanılarak normal dağılım yaklaşımı ile temsil edilmiş ve gelecekteki akım değişimlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonları oluşturulmuştur. Bu sayede, farklı iklim modellerinden elde edilen akım projeksiyonları tek bir olasılıksal çerçevede değerlendirilerek gelecekteki akım değişimlerinin hem büyüklüğü hem de gerçekleşme olasılığı ortaya konulmuştur. Eşitlik 5'te y, Q_{max} veya Q_{ort} akım büyüklüklerini; m_k simülasyonlarda kullanılan k'ncı iklim modeli sayısal ağ noktasını; D ise model performansının değerlendirilmesinde kullanılan gözlenmiş yağış zaman serisini ifade etmektedir. Buna göre, gözlenmiş yağış verisi (D) dikkate alındığında, y değişkenine ait olasılık dağılımı aşağıdaki eşitlikle tanımlanmaktadır:

$$p(y\backslash D) = \sum_{k=1}^{K} p(m_k\backslash D)\, p(y\backslash m_k) \quad (5)$$

Burada $p(m_k\backslash D)$, k'ncı iklim modeli sayısal ağ noktasına ait ağırlığı, başka bir ifadeyle gözlenen yağış verilerini temsil etme başarısına bağlı olarak hesaplanan artalan olasılığını (ağırlığını) ifade etmektedir. $p(y\backslash m_k)$ ise ilgili iklim modeli kullanılarak elde edilen Q_{max} veya Q_{ort} değişimlerine ait artalan olasılık dağılımını göstermektedir. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kabul edilen yaklaşım doğrultusunda $p(y\backslash m_k)$ dağılımının normal dağılıma uyduğu varsayılmıştır [7, 8]. Artalan dağılımın ortalama ve standart sapma değerleri BMA ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 6 ve 7).

$$\mu = \sum_{k=1}^{K} \omega_k\, c_k \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^{K} \omega_k (c_k - \mu)^2 \quad (7)$$

Burada μ ve σ^2 sırasıyla artalan dağılımın ortalama ve varyansını, ω_k k'ncı modele ait BMA ağırlığını, c_k Q_{max} veya Q_{ort}'daki göreli değişimi, K ise BMA analizinde kullanılan toplam simülasyon sayısını ifade etmektedir.

3. Değerlendirme

SWAT+ modeli, Karadere ve Fındıcak akım gözlem istasyonlarına ait akım verileri kullanılarak kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama sonuçları, modelin her iki istasyonda da akım rejiminin zamansal değişimini genel olarak başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Karadere istasyonunda model özellikle yüksek akımları kısmen düşük tahmin etme eğilimi gösterirken, Fındıcak istasyonunda akımın zamansal değişimi daha başarılı şekilde temsil edilmiştir. Bununla birlikte, doğrulama döneminde de model performansının benzer düzeyde devam etmesi, SWAT+ modelinin iklim değişikliği analizlerinde kullanılabilecek güvenilir bir hidrolojik model olduğunu göstermektedir. Modelin performans ölçütlerine ilişkin sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. SWAT+ model performans sonuçları [3]

	Karadere		Fındıcak	
Metrik	Kalibrasyon	Doğrulama	Kalibrasyon	Doğrulama
NSE	0,50	0,50	0,60	0,44
KGE	0,45	0,60	0,54	0,52
R^2	0,57	0,50	0,64	0,44
PBIAS (%)	22	9	8	-5

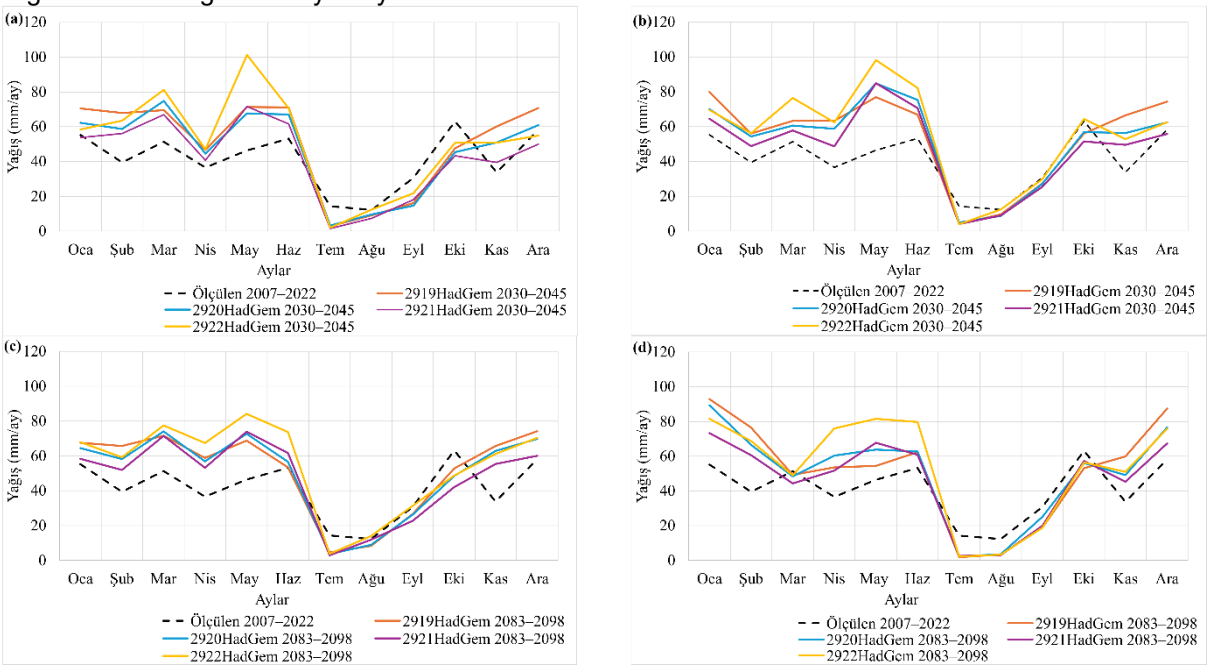
İklim modeli seçiminde, İznik Meteoroloji İstasyonuna ait gözlenen meteorolojik veriler ile dinamik ölçek küçültme yöntemiyle elde edilen iklim projeksiyonları karşılaştırılmıştır. Sıcaklık değişkenlerinin tüm modellerde benzer ve yüksek performans göstermesi nedeniyle model seçiminde ayırt edici ölçüt olarak yağış verileri dikkate alınmıştır. Değerlendirme sonucunda, gözlenen yağış verilerini en başarılı şekilde temsil eden 4 sayısal ağ noktasının HadGEM2-ES iklim modeline ait olduğu belirlenmiştir. Şekil 1'de gösterilmiş olan bu sayısal ağ noktaları (2019, 2020, 2021, 2022), hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryolarında yüksek R^2 ve KGE değerleri göstermiş, ayrıca İznik Meteoroloji İstasyonuna yakın konumda bulunmaları nedeniyle çalışma alanını temsil etme açısından da uygun bulunmuştur ve iklim değişikliğinin etkileri analizlerinde kullanılmıştır.

İklim projeksiyonları, çalışma alanında gelecekte sıcaklıkların tüm senaryolarda artacağını, yağış rejiminde ise belirgin mevsimsel değişiklikler meydana geleceğini göstermektedir (Şekil 2 ve 3). Projeksiyonlara göre kış ve ilkbahar aylarında yağışların genel olarak artması, yaz aylarında ise azalması beklenmektedir. Artan sıcaklıklar ve yağış rejimindeki mevsimsel değişimler havzanın akım rejimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, gelecekteki olası akım değişimlerinin değerlendirilmesinde hem yağış hem de sıcaklık projeksiyonlarının birlikte ele alınması önem taşımaktadır.

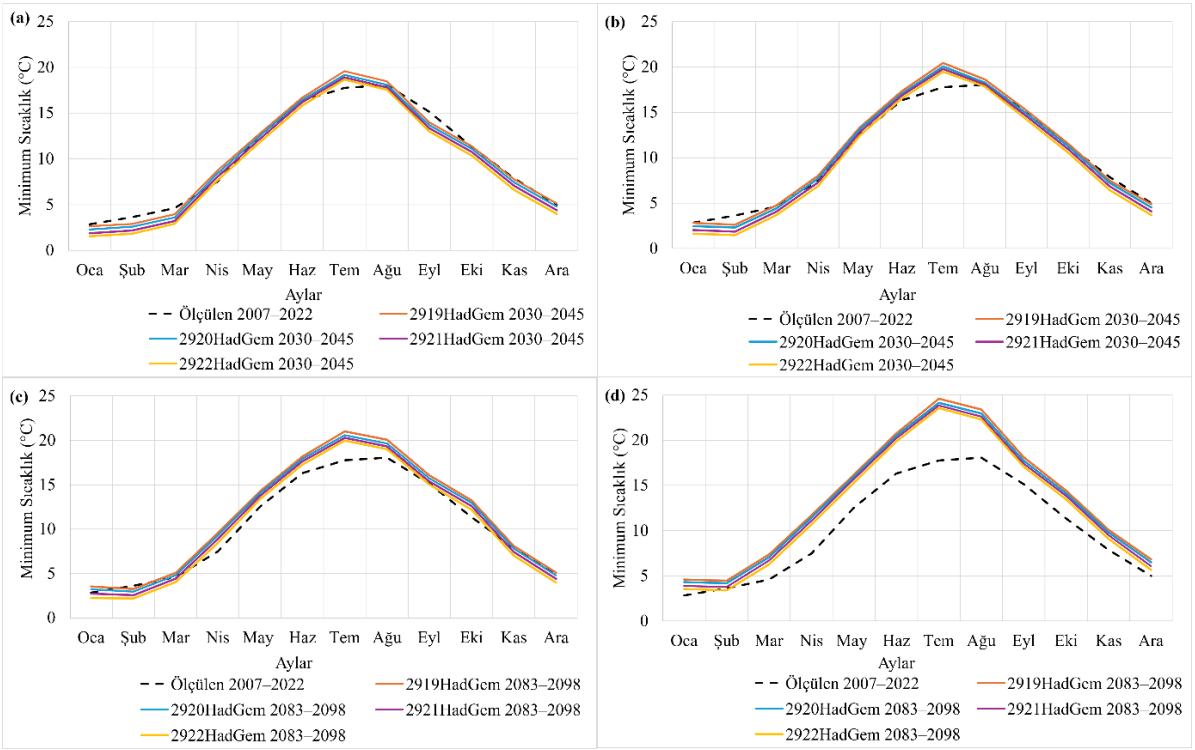
Bayesyen Model Ortalaması ile elde edilen olasılık dağılımları, iklim değişikliğinin İznik Gölü Havzası'ndaki akım rejimi üzerindeki etkilerinin alt havzalar arasında farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Karadere alt havzasında maksimum akım (Q_{max}) değerlerinin artma olasılığı tüm senaryolarda %85'in üzerinde hesaplanmış olup, gelecekte taşkın karakterindeki akımların artmasının yüksek olasılıkla beklendiğini göstermektedir. Buna karşılık, Fındıcak alt havzasında maksimum akımlardaki değişim daha düşük olasılıklarla gerçekleşmekte, bazı senaryolarda ise azalma olasılığı da ortaya çıkmaktadır. Bu durum, aynı havza içerisinde dahi iklim değişikliğine verilen hidrolojik tepkinin alt havza özelliklerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Ortalama akım (Q_{ort}) açısından değerlendirildiğinde ise her iki alt havzada da genel eğilim akımların artacağı yönündedir. Karadere ve Fındıcak alt havzalarında ortalama akımın artış olasılığı senaryolara bağlı olarak yaklaşık %52,8 ile %93,1 arasında değişmektedir. Bununla birlikte, olasılık dağılımlarının genişliği, özellikle emisyon senaryosu ve projeksiyon dönemine bağlı olarak belirsizliğin devam ettiğini

göstermektedir. Ortalama akımlardaki değişimin maksimum akımlara göre daha düşük belirsizlik göstermesi, gelecekte su potansiyelindeki değişimlerin taşkın karakterindeki değişimlere kıyasla daha öngörülebilir olduğunu ortaya koymaktadır.

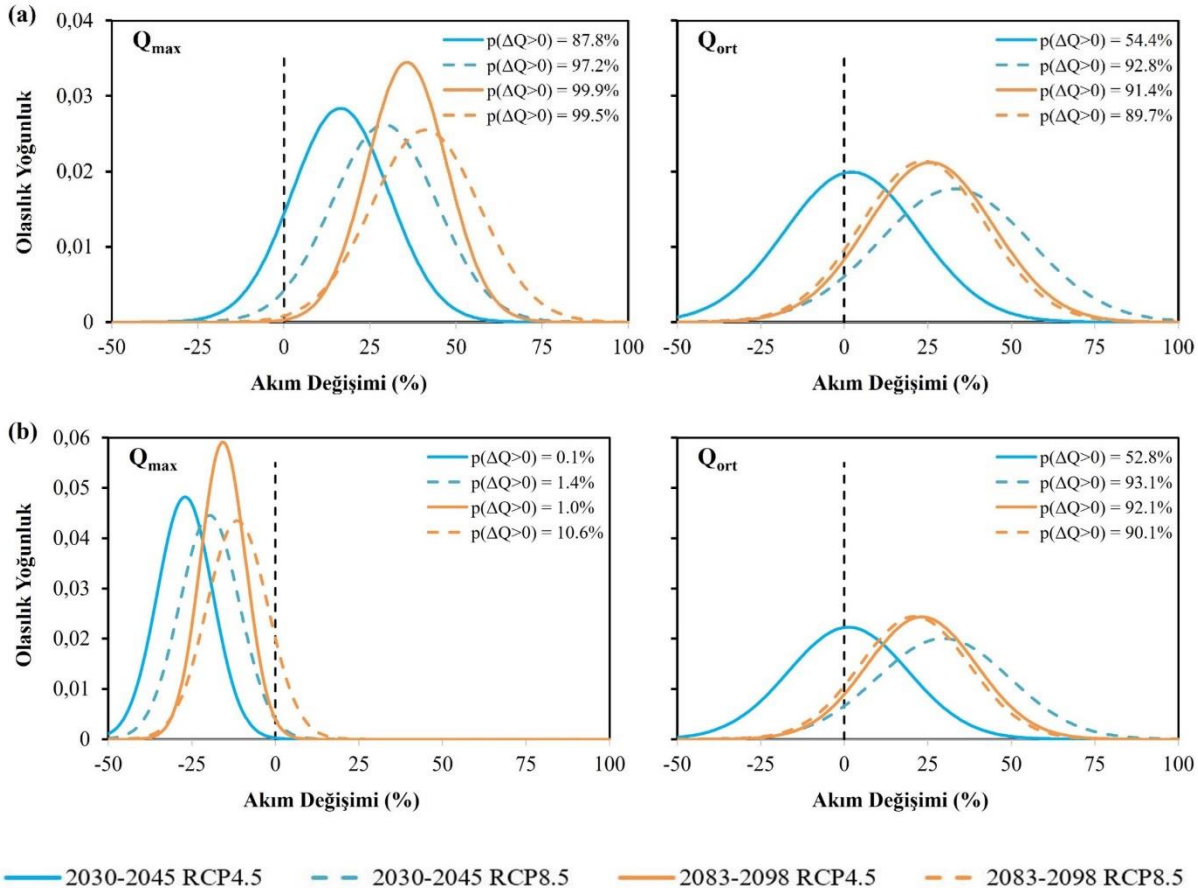


Şekil 2. Gözlenen aylık toplam yağış verisi ile iklim modeli projeksiyonlarına ait aylık toplam yağış verilerinin karşılaştırılması: (a) 2030–2045 dönemi RCP4.5 senaryosu, (b) 2030–2045 dönemi RCP8.5 senaryosu, (c) 2083–2098 dönemi RCP4.5 senaryosu ve (d) 2083–2098 dönemi RCP8.5 senaryosu [3]



Şekil 3. Gözlenen minimum sıcaklık verisi ile iklim modeli projeksiyonlarına ait minimum sıcaklık verilerinin karşılaştırılması: (a) 2030–2045 dönemi RCP4.5 senaryosu, (b) 2030–2045 dönemi RCP8.5 senaryosu, (c) 2083–2098 dönemi RCP4.5 senaryosu ve (d) 2083–2098 dönemi RCP8.5 senaryosu [3]

BMA sonuçları, tek bir iklim modeline dayalı değerlendirmelerin gelecekteki hidrolojik değişimleri tam olarak yansıtmayabileceğini göstermektedir. Farklı iklim projeksiyon verilerini performanslarına göre ağırlıklandıran BMA yaklaşımı, akım projeksiyonlarının olasılıksal olarak değerlendirilmesine imkân sağlayarak gelecekte beklenen hidrolojik değişimlerin güvenilirliğini artırmaktadır. Bu yaklaşımın özellikle su kaynakları planlaması, taşkın risk yönetimi ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesinde karar vericilere önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 4. Akım indislerine (Q_{max}, Q_{ort}) ait değişimlerin gelecekteki olasılık dağılımları: (a) Karadere, (b) Fındıcak

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, İznik Gölü Havzası'nda iklim değişikliğinin akım rejimi üzerindeki etkileri Bayesyen Model Ortalaması (BMA) yöntemi kullanılarak olasılıksal olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Karadere alt havzasında Qmax değerlerinin artış olasılığı tüm senaryolarda %85'in üzerinde hesaplanmıştır. Buna karşılık Fındıcak alt havzasında Qmax değişimlerinin olasılığı daha düşük olup, bazı senaryolarda azalma olasılığı da belirlenmiştir. Bu durum, aynı havza içerisinde alt havzaların iklim değişikliğine farklı hidrolojik tepkiler verebildiğini göstermektedir.

- Qort projeksiyonları her iki alt havzada da genel olarak artış eğilimi göstermektedir. Karadere ve Fındıcak alt havzalarında Qort artış olasılığı %52,8 ile %93,1 arasında değişmekte olup, değişimin büyüklüğü ve belirsizliği emisyon senaryosu ile projeksiyon dönemine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

- BMA ile elde edilen sonuçlar, tek bir iklim projeksiyon verisine dayalı değerlendirmelerin yerine, farklı iklim modellerinin performanslarını dikkate alan daha güvenilir projeksiyonlar sunmaktadır.

Böylece gelecekte beklenen akım değişimlerinin yalnızca büyüklüğü değil, gerçekleşme olasılıkları da ortaya konulabilmektedir.

- Elde edilen bulgular, Bayesyen Model Ortalaması yönteminin iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım su kaynakları planlaması, taşkın risk yönetimi ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesinde karar vericilere daha güvenilir bilgiler sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin sağlanmasındaki katkılarından dolayı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne (DSİ) teşekkür ederiz. İklim projeksiyon verilerini temin ederek bu çalışmanın gerçekleştirilmesine önemli katkı sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ayrıca teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

[1] Garipağaoğlu, N., Uzun, M. (2019). The effects of natural environment conditions, changes and possible risks on watershed management and planning in basin of Iznik Lake. Eastern Geographical Rewiew, 24(42), 1-15.

[2] Viehberg, F. A., Ülgen, U. B., Damcı, E., Franz, S. O., Ön, S. A., Roeser, P. A., ... & Melles, M. (2012). Seasonal hydrochemical changes and spatial sedimentological variations in Lake Iznik (NW Turkey). Quaternary International, 274, 102-111.

[3] Tezel, A. Ç., Akpınar, A., Bor, A., Elçi, Ş. (2026). Uncertainty Assessment of the Impacts of Climate Change on Streamflow in the Iznik Lake Watershed, Türkiye. Water, 18(2), 187.

[4] George, C. (2015). Preparing global DEM data for QSWAT (Version 2). Texas A&M University. https://swat.tamu.edu/media/114677/dem-preparationv2.pdf.

[5] Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S.L. 2012. Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation. Version 2012 TR-439. Texas Water Resources Institute, College Station, 1-650.

[6] Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Değişikliği Projeksiyonları ve İklim Değişikliği, TR2015-CC, 2015, Ankara.

[7] Chen, C., Gan, R., Feng, D., Yang, F., Zuo, Q. (2022). Quantifying the contribution of SWAT modeling and CMIP6 inputting to streamflow prediction uncertainty under climate change. Journal of Cleaner Production, 364, 132675.

[8] Tezel, A. Ç. (2026). Arazi kullanımı ve iklim değişikliğinin İznik Gölü havzasında akım ve hidrolojik döngüye etkileri. Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.

İkim Değişikliğinin İç Anadolu Bölgesi'nde Evapotranspirasyon, Kuraklık ve Su Bütçesi Dinamikleri Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi

Muhammet AZLAK*
Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, https://orcid.org/0000-0002-5941-2371
m_azlak89@hotmail.com

Levent ŞAYLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, https://orcid.org/0000-0003-3233-0277
saylan@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* iklim değişikliği, evapotranspirasyon, kuraklık, su bütçesi, su yönetimi

1. Amaç

İklim değişikliği, hidrolojik döngünün temel bileşenlerinde meydana getirdiği değişimler nedeniyle su kaynaklarının miktarı ve sürekliliği üzerinde önemli baskılar oluşturmaktadır [1]. Sıcaklık artışları, yağış rejimindeki değişimler ve atmosferik talebin yükselmesi; özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde evapotranspirasyonun ve su açığının artmasına, buna bağlı olarak kuraklık koşullarının daha belirgin hale gelmesine neden olabilmektedir [2]. Bu değişimler, yüzey ve yeraltı su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından iklim değişikliğinin su bütçesi üzerindeki etkilerinin nicel olarak ortaya konulmasını gerekli kılmaktadır.

İç Anadolu Bölgesi, düşük ve mevsimsel değişkenlik gösteren yağış koşulları ile karasal iklim özellikleri nedeniyle su kaynakları ve tarımsal üretim açısından iklim değişikliğine duyarlı bölgelerden biridir. Bölgenin Türkiye açısından önemli bir tarımsal üretim alanı olması, su talebi ile su kaynaklarının gelecekteki durumu arasındaki ilişkinin daha önemli hale gelmesine neden olmaktadır [3].

Bu çalışmanın amacı, iklim değişikliğinin İç Anadolu Bölgesi'nde evapotranspirasyon ve kuraklık dinamikleri üzerindeki olası etkilerini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, iklim değişikliği projeksiyonları kullanılarak farklı gelecek dönemlerinde evapotranspirasyon miktarlarındaki değişim ile kuraklık koşullarının gelişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçların bölgenin su kaynakları yönetimi açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, özellikle artan evapotranspirasyon ve kuraklık eğiliminin birlikte değerlendirilmesi yoluyla, iklim değişikliği altında su talebi ve su temini arasındaki dengenin gelecekte nasıl değişebileceğine ilişkin bir değerlendirme sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veri Seti

Çalışma alanı, İç Anadolu Bölgesi içerisinde Konya ili ve çevresini de kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Bölgeyi temsil etmek ve analizlerin gerçekleştirilebilmesi için yeterli uzunlukta ve süreklilikte veri bulunan 14 meteoroloji istasyonu seçilmiştir. İstasyonlara ait günlük meteorolojik gözlem verileri; sıcaklık, yağış, bağıl nem, rüzgar, güneşlenme ve radyasyon gibi değişkenleri kapsamaktadır.

İklim değişikliği projeksiyonu olarak Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından üretilen 10×10 km çözünürlüklü bölgesel iklim modeli verileri kullanılmıştır. Söz konusu veriler RegCM4.3 bölgesel iklim modeli ile üretilmiş; başlangıç ve sınır koşulları ise HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR küresel dünya sistemi modellerinden elde edilmiştir. Gelecek dönem projeksiyonları RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında değerlendirilmiştir. Referans dönem 1980-2000, gelecek dönem ise 2025-2098 olarak kabul edilmiştir. Gelecek dönem; yakın gelecek (2025-2049), orta gelecek (2050-2074) ve uzak gelecek (2075-2098) olmak üzere üç döneme ayrılmıştır.

Model verilerinin istasyon gözlemleriyle karşılaştırılması sonucunda referans dönem için gerekli kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiş ve analizlerde kalibre edilmiş model zaman serileri kullanılmıştır.

2.2 Evapotranspirasyon ve Kuraklık Analizleri

İklim değişikliğinin atmosferik su talebi üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla evapotranspirasyon (ET) hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından önerilen Penman-Monteith yöntemi ile birlikte literatürde yaygın olarak kullanılan beş farklı evapotranspirasyon yöntemi kullanılmıştır (Tablo 1) [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Böylece tek bir yöntemden kaynaklanabilecek belirsizliğin azaltılması ve gelecek dönemde ET değişiminin farklı hesaplama yaklaşımları altında ortaya konulması amaçlanmıştır.

Tablo 1. Evapotranspirasyon hesaplama yöntemleri

Yöntem	Eşitlik	Temel Yaklaşım
Penman-Monteith (PM) [4]	$ET_o = \frac{0{,}408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{ort}+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	Radyasyon, sıcaklık, nem ve rüzgar
Jensen-Haise (JH) [5]	$ET_o = C_T \frac{(T_{avg} - T_x)R_s}{\lambda}$	Radyasyon ve sıcaklık
Hargreaves-Samani (HS) [6]	$ET_o = 0{,}023 \times 0{,}408\ R_a \left(\frac{T_{mak} + T_{min}}{2} + 17{,}8\right)(T_{mak} - T_{min})^{0{,}5}$	Sıcaklık ve radyasyon
Priestley-Taylor (PT) [7]	$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda}$	Radyasyon ve enerji dengesi
Jones-Ritchie (JR) [8]	$ET_o = \alpha_1 [3{,}87x10^{-3}\ R_s (0{,}6\ T_{mak} + 0{,}4\ T_{min} + 29)]$	Radyasyon ve sıcaklık
Irmak (IR) [9]	$ET_o = -0{,}611 + 0{,}149\ R_s + 0{,}079\ T_a$	Radyasyon ve sıcaklık

Eşitliklerde kullanılan ET_o, referans evapotranspirasyon (mm/gün); R_n, net radyasyon (MJ/m^{2}gün); G, toprak ısı akısı (MJ/m^{2}gün); γ, psikrometrik katsayı (kPa/°C); T_{ort}, günlük ortalama hava sıcaklığı (°C); u^2, 2 m yükseklikte ölçülmüş rüzgar hızı (m/sn); e_s ve e_a sırasıyla doymuş buhar basıncı ve gerçek buhar basıncı (kPa); Δ, doymuş buhar basıncı eğrisinin (sıcaklıkla) eğimi (kPa/°C); C_T, sıcaklık sabiti (0,025 °C); T_x, sabit (-3); λ, gizli ısı akısı (MJ/kg); R_s, günlük toplam güneş radyasyonu (MJ/m^{2}gün); R_a, atmosfer dışı radyasyon (MJ/m^{2}gün); α, kalibrasyon sabiti (bu çalışma için 1,26 alınmıştır); ve α_1, $T_{mak} \leq 5$°C ise $\alpha_1 = 0{,}1 \exp[0{,}18 \times (T_{mak} + 20)]$, $5 < T_{mak} < 35$°C ise $\alpha_1 = 1{,}1$, ve $T_{mak} \geq 35$°C ise $\alpha_1 = 1{,}1 + 0{,}05\ (T_{mak} - 35)$ olacak şekilde sıcaklığa göre değişen sabittir. ET'yi tahmin etmek için yapılan tüm gerekli verilerin hesaplamalarında FAO-56'da 3. Bölümde verilen eşitlikler ve aşamalar izlenmiştir [4].

Kuraklık değerlendirmesinde ise standart yağış indeksi (SPI) [10], standart yağış ve evapotranspirasyon indeksi (SPEI) [11] ve normalin yüzdesi indeksi (NYI) kullanılmıştır. SPI yalnızca yağış değişkenini dikkate alırken, SPEI yağışın yanı sıra sıcaklığa bağlı evapotranspirasyon değişimini de dikkate almakta ve böylece sıcaklık artışının kuraklık üzerindeki etkisinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmada SPI ve SPEI için 3, 6, 12 ve 24 aylık zaman ölçekleri kullanılmıştır. Referans dönem olan 1980-2000 yılına göre kurak dönemlerin yüzdesi ve gelecek dönemlerdeki kurak dönemlerin yüzdesi belirlenmiş ve referans döneme göre gelecekte kurak dönem yüzdelerindeki artış ortaya konulmuştur.

Kuraklık analizlerinin yanı sıra yağış ve evapotranspirasyon (Penman-Monteith) arasındaki farkı gösteren su bütçesi açığı (SBA) indeksi de değerlendirilmiştir (Eşitlik 1). Böylece yalnızca meteorolojik kuraklığın değil, atmosferik su dengesindeki değişimin su açığı üzerindeki olası etkisinin de ortaya konulması hedeflenmiştir.

$$SBA = P - ET_{PM} \quad (1)$$

3. Değerlendirme

Çalışma sonuçları, iklim değişikliği altında İç Anadolu Bölgesi'nde evapotranspirasyonun genel olarak artış eğilimi göstereceğine işaret etmektedir. Kullanılan farklı ET yöntemleri, iklim modelleri ve senaryolar birlikte değerlendirildiğinde, gelecek dönemlerde atmosferik su talebinin referans döneme

kıyasla yükselmesi beklenmektedir. Bu artışın özellikle uzak gelecekte belirginleşmesi, sıcaklık artışının ve buna bağlı atmosferik talep değişiminin bölgesel su bütçesi üzerinde önemli bir baskı oluşturabileceğini göstermektedir.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, İç Anadolu Bölgesi'nde ET miktarının yüzyılın sonuna kadar RCP4.5 senaryosunda %11'e kadar, RCP8.5 senaryosunda ise %20'ye kadar artabileceği belirlenmiştir. Bu sonuç, özellikle sulama ve su tahsisi açısından değerlendirildiğinde, aynı miktarda yağışın gerçekleştiği varsayılsa dahi atmosferik su talebindeki artış nedeniyle mevcut su kaynakları üzerindeki baskının artabileceğini göstermektedir.

Kuraklık analizlerinde ise yakın, orta ve uzak gelecek dönemleri arasında farklı bir değişim eğilimi ortaya çıkmıştır. 2025-2049 döneminde genel olarak referans döneme göre kurak koşullarda azalma eğilimi belirlenirken, 2050-2074 döneminde kuraklık koşullarının referans döneme yakın değerlerde gerçekleşeceği değerlendirilmiştir. Buna karşılık 2075-2098 döneminde kuraklık koşullarında belirgin bir artış ortaya çıkmıştır. Özellikle 2075 yılı ve sonrasında kurak dönem yüzdesinin kullanılan model ve senaryolara bağlı olarak %15 ve üzerinde artabileceği belirlenmiştir.

Evapotranspirasyonun artması ile kuraklığın özellikle uzak gelecekte belirginleşmesi birlikte değerlendirildiğinde, bölgedeki su kaynakları açısından çift yönlü bir baskının oluşması beklenmektedir. Bir taraftan sıcaklık artışı ve buna bağlı olarak ET miktarının artması, diğer taraftan yağış miktarındaki genel azalma ve kurak dönemlerin uzaması, su kaynakları üzerindeki talep-bulunabilirlik dengesini olumsuz yönde etkileyebilecektir.

Su bütçesi açığı analizinde referans dönem için yaklaşık 693 mm olarak hesaplanan SBA değerinin, tüm istasyonlar, modeller ve senaryoların ortalaması dikkate alındığında gelecek dönemde yaklaşık %21 oranında artacağı belirlenmiştir. Bu bulgu, ET artışının yalnızca tarımsal su ihtiyacı açısından değil, genel anlamda bölgesel su yönetimi açısından da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu kapsamda çalışma sonuçları, iklim değişikliği altında İç Anadolu Bölgesi'nde su kaynakları yönetiminin yalnızca mevcut su miktarının korunmasına odaklanmasının yeterli olmayacağını; aynı zamanda ET'deki değişimin ve kuraklık dinamiklerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle uzun dönemli su tahsisi, sulama planlaması, kuraklık yönetimi ve su talebinin yönetilmesine yönelik stratejilerde ET ve kuraklık projeksiyonlarının birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında İç Anadolu Bölgesi için gerçekleştirilen analizler sonucunda, iklim değişikliğinin bölgesel su bütçesi üzerinde önemli değişimlere neden olabileceği ortaya konulmuştur. Çalışmanın temel sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Gelecek dönemlerde evapotranspirasyon miktarlarının genel olarak artması beklenmektedir. ET artışının yüzyılın sonuna kadar RCP4.5 senaryosunda %11'e, RCP8.5 senaryosunda ise %20'ye kadar ulaşabileceği belirlenmiştir.
- Kuraklık koşullarında dönemsel bir değişim öngörülmektedir. Yakın gelecekte kuraklıkta genel bir azalma eğilimi görülürken, uzak gelecekte belirgin bir artış ortaya çıkmaktadır.
- 2075-2098 döneminde kuraklığın kullanılan model ve senaryolara göre %15 ve üzerinde artabileceği belirlenmiştir.
- Yıllık toplam yağış miktarında gelecek dönemlerde genel bir azalma eğilimi belirlenmiş, buna karşılık ardışık kurak gün sayısında artış öngörülmüştür.
- Referans dönemde yaklaşık 693 mm olan su bütçesi açığının, tüm istasyon, model ve senaryoların ortalaması dikkate alındığında yaklaşık %21 oranında artabileceği belirlenmiştir.
- Evapotranspirasyon artışı, yağış azalması ve kuraklık koşullarındaki değişim birlikte değerlendirildiğinde, özellikle yüzyılın ikinci yarısından itibaren bölgesel su kaynakları üzerinde artan bir baskı oluşması beklenmektedir.

Sonuç olarak, İç Anadolu Bölgesi'nde iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde evapotranspirasyon, kuraklık ve su bütçesi açığının birlikte ele alınması önem taşımaktadır. Elde edilen sonuçlar, özellikle kuraklık yönetim planları, su tahsis planları, sulama yönetimi ve uzun dönemli su kaynakları planlamalarında iklim değişikliği etkilerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle 2050 yılından sonra iklim değişikliği etkilerinin çok daha net hissedilecek olması ve 2075-2098 döneminde öngörülen kuraklık artışı ve ET yükselişi, bölgenin su güvenliği açısından uzun dönemli ve uyarlanabilir yönetim yaklaşımlarının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

5. Kaynaklar

[1] IPCC, (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. DOI:10.1017/9781009157896

[2] Vicente-Serrano S. M., McVicar T. R., Miralles D.G., Yang Y., Tomas-Burguera M. (2020). Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. WIREs Clim Change. 11:e632. https://doi.org/10.1002/wcc.632

[3] Azlak, M., Şaylan, L. (2024). Analysing the impact of climate change on evapotranspiration in a climate-sensitive region: Example of Central Anatolia (Türkiye). Soil and Water Research, 19(1), 64–76. DOI: 10.17221/107/2023-SWR

[4] Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, Rome, 56:17–29. ISBN: 92-5-104219-5

[5] Jensen, M. E., Haise, H. R. (1963). Estimation of evapotranspiration from solar radiation. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE 89:15-41. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287

[6] Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2):96-99. DOI: 10.13031/2013.26773

[7] Priestley, C. H. B., Taylor, R. J. (1972). On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100:81–92. DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

[8] Jones, J. W., Ritchie, J. T. (1990). Crop growth models. In: Hoffman G. J., Howel T. A., Solomon K. H. (Ed.). Management of Farm Irrigation Systems. The American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St. Joseph, Michigan, 9:63-89.

[9] Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. J Irrig Drain Eng, ASCE, 129(5):336-347. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(336).

[10] McKee, T. B., N. J. Doesken, Kleist, J., (1993). The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim, CA, 179-186.

[11] Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. J. Climate, 23, 1696-1718, https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

İklim Değişikliğinden Kaynaklanan Risklerin Meteorolojik ve Tarımsal Kuraklık Açısından İncelenmesi: Karacabey Örneği

Yağmur Sıla KILIÇ*
Devlet Su İşleri 1. Bölge Müdürlüğü, Yıldırım, Bursa, 0009-0003-7334-6715
yagmursilakilic@dsi.gov.tr

Levent ŞAYLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maslak, İstanbul, 0000-0003-3233-0277
saylan@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* iklim indisleri, ekstrem hava olayları, iklim değişimi, tarımsal meteoroloji, kuraklık.

1. Amaç

İklim değişikliği, dünya genelinde ve Türkiye'de aşırı hava olaylarının sıklığını artırarak sel, kuraklık ve artan buharlaşma gibi olayların zamansal ve bölgesel özelliklerinde önemli değişimlere neden olmaktadır. [1]. İklim değişikliğiyle artan aşırı iklim olaylarının sıklığı ve şiddeti, ekosistemlerin işleyişini ve uyum kapasitesini tehdit etmektedir. [2]. Bu da tarımsal üretimi arttırmak için yeni yöntemler bulunması gerekliliği anlamına gelmektedir.

Kuraklıklar genel olarak dört temel başlık altında sınıflandırılmaktadır. Meteorolojik kuraklık, belirli bir zaman ve bölge için normal koşulların altında gerçekleşen yağış miktarındaki azalmayı ifade etmektedir. Hidrolojik kuraklık, yüzey ve yeraltı sularında meydana gelen azalmalarla karakterize edilmektedir. Tarımsal kuraklık ise toprak nemindeki yetersizlik sonucunda bitkilerin su ihtiyacının karşılanamamasını ifade etmektedir. Sosyo-ekonomik kuraklık ise su kaynaklarındaki yetersizliğin toplum ve ekonomi üzerinde ortaya çıkan olumsuz sonuçları kapsamaktadır [3].

İklim değişikliğine bağlı olarak ortalama sıcaklık değerlerinde artış ve yağış rejimlerinde değişimlerin meydana gelmesi, aşırı hava olaylarının sıklık ve şiddetinde değişiklikler yaşanabileceğine işaret etmektedir. Artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimi sonucunda evapotranspirasyonun artması, kuraklık koşullarını şiddetlendirerek bitkilerin su ihtiyacını ve buna bağlı olarak tarımsal sulama gereksinimini artırabilecektir. Sıcaklık değerlerindeki artış, bitkilerin gelişim ve olgunlaşma süreçlerini hızlandırarak hasat süresini kısaltmakta ve aynı sezonda birden fazla ürün alınmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, kısa vadede tarımsal verimliliği artırıyor gibi görünse de uzun vadede artan sıcaklıklarla birlikte buharlaşmanın da artması ve su kaynaklarının yetersiz kalması, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde tarımsal üretim açısından ciddi olumsuzluklar yaşanabileceği anlamına gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı, iklim değişikliğinin farklı projeksiyonlarına göre Bursa ili Karacabey'de yoğun olarak yetiştirilen bir bitkinin (domatesin) gelişim dönemlerinde gelecekte meydana gelebilecek iklim ekstrem olaylarını sıcaklık ve yağış temelli indisler aracılığıyla belirlemek ve bu değişimlerin özellikle meteorolojik ve tarımsal kuraklık üzerine etkilerini üretim üzerindeki olası etkilerini değerlendirerek uygun uyum stratejileri geliştirmektir.

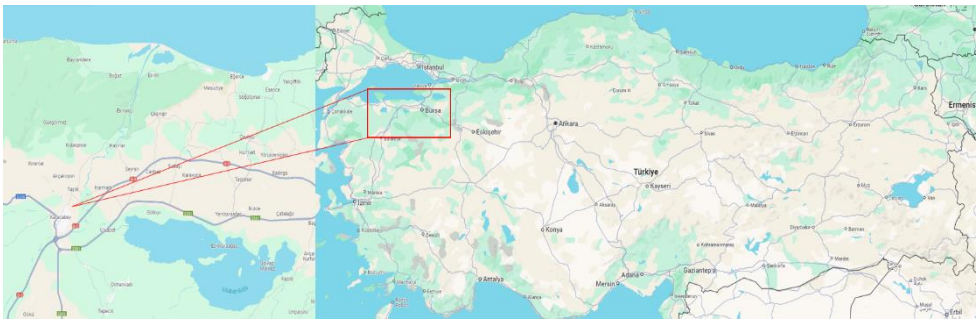
2. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanı olan Karacabey ilçesi, Marmara Bölgesi'nin güneyinde, Bursa iline bağlı olup yaklaşık 28,25°–28,45° Doğu boylamları ile 40,15°–40,30° Kuzey enlemleri arasında yer almaktadır [4]. İlçe, Bursa merkezinin 65 km doğusunda bulunmaktadır (Şekil 1). Bursa, Köppen iklim sınıflandırmasına göre kışları ılık, yazları sıcak ve kurak olan Csa (Akdeniz) iklim tipine sahiptir [5]. Karacabey Ovasının verimli toprakları ve zengin ekosistemi bulunmaktadır.

Bu çalışmada, MPI-ESM-MR küresel dolaşım modeli [6] ve iklim değişikliği ile ilgili RCP4.5 ile RCP8.5 senaryoları kullanılarak 1990–2100 dönemine ait günlük sıcaklık ve yağış verileri elde edilmiştir. ERA5 Reanaliz verileri [7] kullanılarak hata düzeltmesi yapılan veriler, ETCCDI iklim indisleri [8] aracılığıyla incelenmiştir. Görece iyimser ve kötümser senaryolar ile iklimin yakın, orta ve uzak gelecekteki değişimleri hesaplanmıştır ve geçmişteki dönem ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan

indislerin hesapları R üzerinden yapılmıştır. İndislerin dönemsel ortalama ve toplamları Microsoft Excel üzerinden hesaplanmıştır.

Domates bitkisinin gelişim dönemleri, yetiştirme koşullarına bağlı olarak aylara göre farklılık göstermekle birlikte genel olarak Karacabey'de nisan-eylül ayları arasında gerçekleşmektedir. Domates bitkisinde nisan ayında fide dikimi, mayıs ayında yaprak ve gövde gelişimi, haziran ayında çiçeklenme ve meyve tutumu gerçekleşir. Temmuz ayında meyve gelişimi ve ilk hasat, ağustosta olgunlaşma ve hasat, eylülde ise son hasat yapılır.



Şekil 1. Karacabey, Bursa ve Türkiye Haritası [9]

2.1 İklim Olaylarının Analizi

Bu araştırmada domates bitkisinin gelişme dönemindeki aşırı hava olaylarına ait indislerin zamansal değişimleri incelenmiştir. Tablo 1'de e görüldüğü üzere Karacabey'de geçmiş dönemde minimum ve maksimum sıcaklık ortalamaları 10.5 ile 18.9°C arasında değişmekteyken bu değerlerin uzak gelecekte RCP4.5 senaryosu için yaklaşık %14 ve %8, RCP8.5 senaryosu için ise yaklaşık olarak %20 ve %33 oranında artış beklenmektedir. RCP4.5 senaryosuna göre, yıllık toplam yağış değerlerinin ortalamasında halihazır döneme kıyasla uzak gelecekte yaklaşık %3 oranında artması muhtemeldir. Kötümser senaryoda ise (RCP8.5) yakın gelecekte yağışta bir miktar artış beklenirken, sonrasında yağışta geçmişe oranla %17 kadar düşüş tahmin edilmektedir.

Tablo 1. Karacabey için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre 1990-2015, 2025-2049, 2050-2074, 2075-2100 dönemlerinde yıllık toplam yağış, günlük maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin ortalamalarının değişimi

	Yıllık Toplam Yağış (mm)		Günlük Maksimum Sıcaklık (°C)		Günlük Minimum Sıcaklık (°C)	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1990-2015	551,1	551,1	18,9	18,9	10,5	10,5
2025-2049	558,2	570,0	19,9	19,9	11,3	11,4
2050-2074	548,1	524,7	20,3	21,2	11,8	12,6
2075-2100	568,5	459,3	20,4	22,8	12,0	14,0

İncelenen alanda bitki gelişme döneminde yağışın farklı senaryolara göre olası değişimi Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'de görüleceği üzere RCP4.5 senaryosu için çiçeklenmenin olduğu haziran ayında yakın gelecekte %12 artış, orta ve uzak gelecekte ise %8 ve %23 oranında azalış modellenmektedir. RCP8.5 senaryosu için durum daha karamsar görünmektedir. Kötümser senaryoya göre haziran ayı için aylık toplam yağış değerlerinde geçmişe oranla yakın, orta ve uzak gelecek dönemlerinde %26, %29 ve %43 azalma dikkat çekicidir.

Bunlara ilave olarak Tablo 3'te 10 mm ve üzerinde yağış gerçekleşmesi beklenen gün sayılarının Nisan-Eylül ayları arasındaki dönemsel ortalama değerleri yer almaktadır. Mayıs ayı için RCP4.5 senaryosuna göre R10mm indisinde gelecekte artış beklenmektedir. Bu durum gelişim döneminde yüksek sıcaklık ve yüksek miktarda yağışa maruz kalan bitki için mantar hastalığı riski yaratmaktadır, bu durum hastalık riskinin artması anlamına gelebilir.

Tablo 2. Karacabey için aylık toplam yağış indisinin aylık ortalamalarının geçmişten geleceğe (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (nisan- eylül) zamansal değişimi

	1990-2015		2025-2049		2050-2074		2075-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Nisan	41,8	41,8	44,9	47,6	46,0	39,3	48,8	30,6
Mayıs	54,2	54,2	48,6	44,5	51,4	39,3	52,0	33,1
Haziran	42,3	42,3	47,5	31,4	38,9	30,1	32,4	23,9
Temmuz	19,8	19,8	13,9	12,2	12,1	13,9	12,0	5,9
Ağustos	9,2	9,2	9,9	4,3	6,1	3,7	5,2	2,6
Eylül	13,6	13,6	15,2	22,2	17,8	15,2	19,1	15,8

Tablo 3. Karacabey için R10mm indisinin periyotlara göre toplamlarının geçmişten geleceğe (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (Nisan-Eylül) zamansal değişimi

	1990-2015		2025-2049		2050-2074		2075-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Nisan	33	33	40	35	41	34	39	23
Mayıs	39	39	38	33	42	32	50	26
Haziran	38	38	46	30	35	31	32	22
Temmuz	17	17	14	11	10	13	11	8
Ağustos	8	8	11	4	4	3	5	1
Eylül	16	16	17	21	15	16	17	12

Tablo 4'te domates gelişimi için önemli olan 10 °C baz sıcaklık kullanılarak hesaplanan büyüme derece gün (BDG) değerlerinin aylara göre ortalaması bulunmaktadır. Her iki senaryoda da BDG değerlerinin artmasıyla, özellikle nisan-mayıs aylarında bitki gelişiminin ve haziran ayında çiçeklenmenin desteklenmesi beklenmektedir. Gelecek dönemlerde sıcaklıkların artmasıyla birlikte bitkilerin BDG değerlerinin yükselmesi ve buna bağlı olarak gelişme aşamalarına daha erken ulaşmaları beklenmektedir. Sıcaklık artışının fenolojik gelişimi hızlandırmasının yanı sıra, evapotranspirasyonun artmasına yol açarak bitki su tüketimini de artıracağı öngörülmektedir. Bu durum, özellikle sıcaklık artışının belirgin olduğu dönemlerde, bitkilerin sulama suyu ihtiyaçlarının artmasına ve dolayısıyla tarımsal su yönetimi açısından ilave baskıların oluşmasına neden olabilecektir.

Tablo 4. Karacabey için 10°C baz sıcaklık için Büyüme Derece Gün İndisinin aylık toplam değerlerinin periyotlara göre ortalamalarının (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (Nisan- Eylül) değişimi

	1990-2015		2025-2049		2050-2074		2075-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Nisan	98,2	98,2	117,5	107,4	128,1	154,2	125,2	189,6
Mayıs	197,0	197,0	230,9	220,6	237,9	261,0	232,8	324,7
Haziran	312,1	312,1	334,6	341,5	355,0	402,0	361,5	453,4
Temmuz	403,0	403,0	463,4	458,3	470,4	524,8	478,3	584,0
Ağustos	447,3	447,3	479,3	506,8	489,5	546,4	512,1	603,6
Eylül	355,4	355,4	367,0	380,4	384,2	411,8	395,1	474,4

Türkiye'de yağış rejiminde meydana gelen değişimler ve bazı bölgelerde yağış miktarlarında gözlenen azalmalar, meteorolojik kuraklığın etkilerini daha belirgin hâle getirmektedir. Tarımsal kuraklık ise özellikle tarımsal üretimin sürdürülebilmesi amacıyla sulama suyuna duyulan ihtiyaç ve su kaynaklarının geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen yatırımlar nedeniyle ülkemiz açısından uzun süredir önem

taşıyan bir sorundur. Yağışların azalması ve buharlaşmaların artması, su bütçesinin iki bileşen arasındaki bu fark su açığının bir göstergesidir. Bu kapsamda bu çalışmada meteorolojik kuraklığın bir göstergelerinden biri olan Standart Yağış İndisi (SPI) ve evapotranspirasyonu da dikkate alması nedeniyle tarımsal kuraklık göstergesi olarak değerlendirebileceğimiz Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI) değerlerinin geçmiş ve gelecekteki durumu, özellikle fide dikimi ve bitkinin gelişim dönemlerinde gelecekte kuraklık riskinin artacağını göstermektedir. Kuraklık; fide gelişimi, çiçeklenme, meyve tutumu ve meyve kalitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açarak verim kayıplarına neden olabilir (Tablo 5-8). Ancak burada önemli olan bu kuraklıkların artması ile orta ve uzak özellikle gelecekte sulama suyu ihtiyacının artabilecek olmasıdır.

Tablo 5. Karacabey için SPI orta kurak (OK), şiddetli kurak ve aşırı kurak (ŞK) ayların 1990-2015 ve 2025-2049 dönemlerinde (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (Nisan- Eylül) değişimi

	1990-2015				2025-2049			
SPI	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK
Nisan	2	2	2	2	2	1	2	1
Mayıs	2	4	2	4	5	0	3	1
Haziran	1	4	1	4	2	1	2	1
Temmuz	1	3	1	3	3	1	2	1
Ağustos	1	3	1	3	4	1	3	1
Eylül	3	1	3	1	3	1	2	1

Tablo 6. Karacabey için SPI orta kurak (OK), şiddetli kurak ve aşırı kurak (ŞK) ayların 2050-2074 ve 2075-2100 dönemlerinde (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (Nisan- Eylül) değişimi

	2050-2074				2075-2100			
SPI	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK
Nisan	3	3	3	3	2	3	3	5
Mayıs	3	3	3	3	1	2	2	6
Haziran	1	4	1	4	1	2	2	6
Temmuz	1	4	1	4	2	2	2	6
Ağustos	2	3	2	3	2	2	2	6
Eylül	2	4	2	4	2	2	3	5

Tablo 7. Karacabey için SPEI orta kurak (OK), şiddetli kurak ve aşırı kurak (ŞK) ayların 1990-2015 ve 2025-2049 dönemlerinde (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (Nisan- Eylül) değişimi

	1990-2015				2025-2049			
SPEI	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK
Nisan	3	0	3	0	5	1	2	0
Mayıs	5	1	5	1	3	2	3	0
Haziran	3	2	3	2	3	1	3	0
Temmuz	2	2	2	2	4	1	3	0
Ağustos	2	1	2	1	4	1	4	0
Eylül	1	1	1	1	4	1	3	0

Tablo 8. Karacabey için SPEI orta kurak (OK), şiddetli kurak ve aşırı kurak (ŞK) ayların 2050-2074 ve 2075-2100 dönemlerinde (RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre) domates gelişme sürecindeki (Nisan- Eylül) değişimi

	2050-2074				2075-2100			
SPEI	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK	RCP 4.5 OK	RCP 4.5 ŞK	RCP 8.5 OK	RCP 8.5 ŞK
Nisan	4	2	4	2	3	2	2	7
Mayıs	1	3	1	3	2	1	3	7
Haziran	4	2	4	2	2	2	4	7
Temmuz	2	4	2	4	2	2	6	5
Ağustos	1	4	1	4	1	3	6	5
Eylül	2	4	2	4	1	3	5	6

3. Değerlendirme

Her iki senaryoda da sıcaklık temelli indislerde artış ve buna bağlı olarak domatesin gelişme hızında yükselme eğilimi belirlenmiştir. Özellikle Büyüme Derece Gün (BDG) değerlerindeki artış, bitkinin gelişme aşamalarına daha erken ulaşabileceğini göstermektedir. Bu değişimin, özellikle fide dikimi, çiçeklenme ve meyve tutumu gibi kritik gelişim dönemlerinin zamanlamasını etkileyebileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, sıcaklık artışının yalnızca fenolojik gelişim üzerinde değil, bitkinin su tüketimi üzerinde de etkili olması beklenmektedir. Artan sıcaklıklarla birlikte evapotranspirasyonun yükselmesi, bitkinin ihtiyaç duyduğu su miktarını artırarak özellikle yağışın yetersiz kaldığı dönemlerde sulama ihtiyacının artmasına neden olabilecektir. Çiçeklenme ve meyve tutumu dönemlerinin sıcaklık ve kuraklığa karşı hassas olması, bu dönemlerde oluşabilecek su açığının verim ve ürün kalitesi açısından önemini artırmaktadır.

Kuraklık indislerinin sonuçları, özellikle RCP8.5 senaryosunda gelecekte kuraklık riskinin belirginleşebileceğine işaret etmektedir. Yağışlardaki azalma ile artan evapotranspirasyonun birlikte değerlendirilmesi, bitkinin karşı karşıya kalabileceği su açığının gelecekte daha belirgin hâle gelebileceğini göstermektedir. Bu durum, Karacabey'de yoğun olarak gerçekleştirilen domates üretimi açısından sulama suyunun miktarı ve zamanlamasının daha önemli hâle geleceğini ortaya koymaktadır. Özellikle orta ve uzak gelecekte artması beklenen kuraklık koşullarında, mevcut su kaynaklarının daha etkin ve planlı kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda sulama zamanlamasının bitkinin kritik gelişme dönemlerine göre düzenlenmesi, su tasarrufu sağlayan sulama yöntemlerinin yaygınlaştırılması ve sulama altyapısının iklim değişikliğine bağlı artan su ihtiyacını dikkate alacak şekilde geliştirilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca sıcaklık ve kuraklık risklerinin birlikte değerlendirilmesi, yalnızca mevcut su ihtiyacının karşılanması açısından değil, gelecekte tarımsal üretimin sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından da önemlidir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Karacabey'de yetiştirilen domatesin Nisan-Eylül dönemindeki gelişimi dikkate alınarak iklim değişikliğinin kuraklık üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir. Çiçeklenme ve meyve tutumu dönemlerinin sıcaklık ve kuraklığa karşı hassas olması, bu dönemlerde oluşabilecek su açığının domates üretimi açısından önemini artırmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda, iklim değişikliğine uyum kapsamında sıcaklık ve kuraklığa toleranslı çeşitlerin kullanılması, ekim ve hasat tarihlerinin değişen fenolojik koşullara göre yeniden değerlendirilmesi, sulama altyapısının geliştirilmesi ve su tasarrufu sağlayan sulama yöntemlerinin yaygınlaştırılması önerilmektedir. Ayrıca üreticilerin iklim riskleri konusunda bilinçlendirilmesi ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, gelecekte oluşabilecek verim ve su kayıplarının azaltılmasına katkı sağlayabilecektir.

5. Kaynaklar

[1] L. Şaylan, "İklim krizi: iklim değişimi ve tarım etkileşimi," 3. Uluslararası Tarım ve Gıda Etiği Kongresi'nde sunulmuştur, Türkiye, Kasım 2021.

[2] Parmesan, C., Morecroft, M. D., & Trisurat, Y. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability (Doctoral dissertation, GIEC).

[3] Dikshit, A., Pradhan, B., & Huete, A. (2021). An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network. Journal of environmental management, 283, 111979.

[4] http://www.bursa.gov.tr/karacabey, erişim tarihi 09.09.2026.

[5] https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari/koppen.pdf, erişim tarihi 09.09.2026.

[6] Max Planck Institute for Meteorology (2017): WCRP CMIP5: Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) MPI-ESM-MR model output collection. Centre for Environmental Data Analysis, http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/83035a56b0e3498694aed0f319a83d7c

[7] https://cds.climate.copernicus.eu, erişim tarihi 24.08.2026.

[8] https://climpact-sci.org, erişim tarihi 02.08.2026.

[9] https://www.google.com/maps, erişim tarihi 09.09.2026.

Ayırma Duvarlı Simetrik Akarsu Kavşağında Taban Morfolojisinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma

Zehra BÜYÜKER*
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 0000-0001-9987-0951
zehra.buyuker@ikc.edu.tr

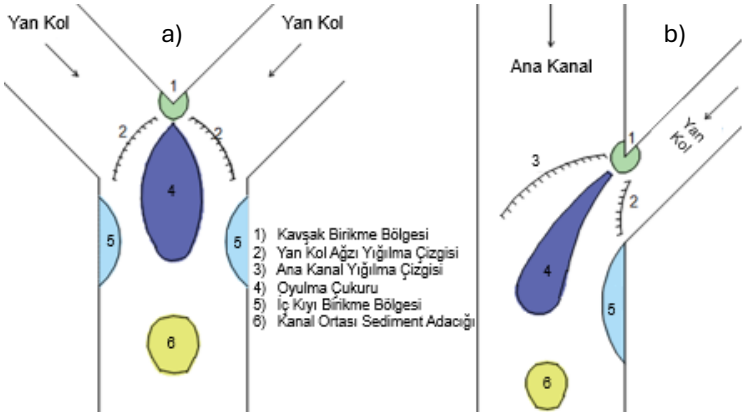
Gökçen BOMBAR
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, adres, 0000-0002-8156-6908
gokcen.bombar@ikc.edu.tr

Anahtar Kelimeler: simetrik akarsu kavşağı, sediment taşınımı, ayrıma duvarı, taban morfolojisi

1. Amaç

Akarsu kavşaklarında akım yapısı ile sediment taşınımı arasındaki karmaşık etkileşimler, kavşak bölgesinde belirgin oyulma ve birikme bölgelerinin oluşmasına ve zaman içerisinde taban morfolojisinin değişmesine neden olmaktadır. Hareketli tabana sahip akarsu kavşaklarında bu etkileşimler sonucunda karakteristik bir taban morfolojisi gelişmektedir [1]. Mosley (1976), küçük ölçekli simetrik ve asimetrik akarsu kavşağında farklı birleşme açıları, debi oranları ve sediment besleme koşulları altında gerçekleştirdiği kapsamlı deneysel çalışmada, her iki kavşak tipinde de oyulma ve birikme bölgelerinin gelişimini ortaya koymuştur [2]. Best (1988) ise yaptığı laboratuvar deneyleri ve doğal akarsu gözlemleriyle sediment taşınım mekanizmasını incelemiştir. Yapmış olduğu deneylerde 15°, 45°, 70°, 90° ve 105° birleşme açılarında oluşan taban morfolojisini gözlemlemiş, 15° birleşme açısına sahip akarsu kavşağında herhangi bir oyulma çukuru oluşmadığını ve birleşme açısı arttıkça giderek derinleşen bir oyulma çukurunun geliştiği sonucuna varmıştır [3]. Yaptığı çalışmalara dayanarak Best (1988), hareketli tabana sahip açık kanal kavşakları için bir morfolojik model öneren ilk araştırmacıdır.

Günümüzde, kapsamlı laboratuvar ve saha araştırmaları sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda ortaya konulan, doğal simetrik ve asimetrik akarsu kavşaklarının kavramsal taban morfolojisi modelinin Şekil 1'deki karakteristik özelliklerin tamamını ve büyük çoğunluğunu içerdiği bilinmektedir: (1) kavşak memba köşesinde akım durgunluk bölgesi altında oluşan birikme bölgesi; kavşak plan geometrisine bağlı olarak (2) iki yan kol veya (2) bir yan kol ile (3) bir ana kanal ağız bölgelerinde gözlemlenen yığılma çizgileri; (4) akım hızının ve türbülansın da artmasıyla meydana gelen oyulma çukuru; (5) iç kıyı boyunca gözlemlenen akım ayrılma bölgelerinin altında gelişen birikme bölgesi/bölgeleri; (6) kavşak mansabında oluşan kanal ortası sediment adacığı. Akarsu kavşaklarında yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar, Şekil 1'deki morfolojik özellikleri ve hidrodinamik yapının oyulma ve birikme bölgelerini kontrol ettiğini doğrulamaktadır [4-7].



Şekil 1. Açık kanal kavşaklarında taban morfolojisi, a) simetrik, b) asimetrik [8]

Akarsu kavşaklarında meydana gelen oyulma çukurunun derinleşmesi, akarsuyun ekosistemini ve suyun kalitesini bozmakla beraber kavşak yakınındaki köprü ve diğer hidrolik yapıların temel güvenliğini tehdit edebilmektedir. Sediment birikimleri ise akım kesitinin daralmasına bağlı olarak akım taşıma

kapasitesinin azalmasına ve taşkın riskinin artmasına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle oyulma ve birikme süreçlerinin kontrol altında tutulması ve yönetilmesi hem hidrolik yapıların güvenliği hem de akarsu sistemlerinin sürdürülebilir yönetimi açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla akarsu kavşaklarında batık vanalar, kazık grupları, yönlendirme duvarları ve ayırma duvarları gibi çeşitli akım kontrol yapılarından yararlanılmaktadır.

Oyulma ve birikme bölgelerinin kontrol edilmesi üzerine yapılan ilk çalışma, Odgaard ve Wang (1991) tarafından akım koşullarını düzenlemek ve sediment birikimini kontrol etmek üzere 90° birleşme açısına sahip bir akarsu kavşağında batık vanalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir [9]. Yapılan düzenlemeyle akım vanalarla oyulma bölgesinden birikme bölgesine yönlendirilmiştir. Bu sayede, birikme bölgesindeki hızın artmasıyla, birikme bölgesindeki sedimentin büyük kısmı uzaklaştırılmıştır. Wuppukondur ve Chandra (2017), 90° birleşme açısına sahip bir akarsu kavşağında oyulmayı kontrol altına almak amacıyla dairesel kazık ve vanalar kullanmışlardır. Çalışmada, kazık boyutu (8 mm ve 12 mm) ile vana yerleşim açısının (15°, 30° ve 60°) oyulma çukurunun derinliği ve konumu üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, vanaların açısının artmasıyla oyulma derinliğinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca, kazıklar arasındaki mesafeden bağımsız olarak, kazık çapının artmasıyla maksimum oyulma derinliğinin de arttığı belirlenmiştir. Kazıkların kullanıldığı deneylerde, kazık kullanılmayan deneye kıyasla maksimum oyulma bölgesinin mansap yönüne ve dış kıyıya doğru kaydığı gözlemlenmiştir [10]. Ali vd. (2019), Malezya'daki Kurau ve Ara akarsularının birleşim bölgesini temsil eden iki boyutlu bir nümerik model kullanarak kavşak bölgesine farklı boyut ve yerleşim düzenlerinde yerleştirilen vanaların hidro-morfodinamik yapı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Vanalar 15° ve 30° açıyla yerleştirilmiş olup 15° açıyla yerleştirilen vanaların oyulma derinliğinin azaltılmasında belirgin bir etki oluşturmadığı, buna karşılık 30° açıyla yerleştirilen vanaların oyulma ve birikme bölgelerinin kontrol edilmesinde daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Her iki yerleşim açısı için de tek vana kullanılan senaryonun en iyi performansı sergilediği görülmüştür [11].

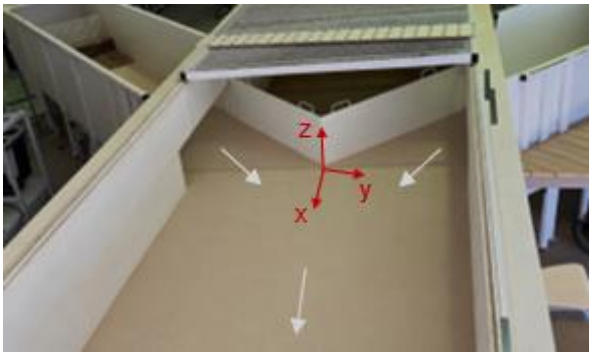
Yapılan çalışmalar akarsu kavşaklarında vana ve kazıkların morfolojik yapının kontrol altında tutulması amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların önemli bir bölümünün asimetrik kavşaklar üzerinde yoğunlaştığı, ayırma duvarlı simetrik akarsu kavşaklarının ise sınırlı olarak ele alındığı görülmektedir. Bu sebeple, sonuçları burada sunulan mevcut çalışma, literatürdeki bilgi boşluğunun giderilmesi amacıyla akarsu kavşağındaki akım ve taban morfolojisinin 45° açıyla yerleştirilmiş bir ayırma duvarı ile kontrol edildiği, hareketli tabana sahip büyük ölçekli bir simetrik akarsu kavşağında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, taban morfolojisinde meydana gelen oyulma ve birikme bölgelerinin yerini ve boyutlarını belirlemek üzere tasarlanmıştır.

2. Metaryal ve Yöntem

Deneysel çalışma, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan büyük ölçekli açık kanalda gerçekleştirilmiştir.

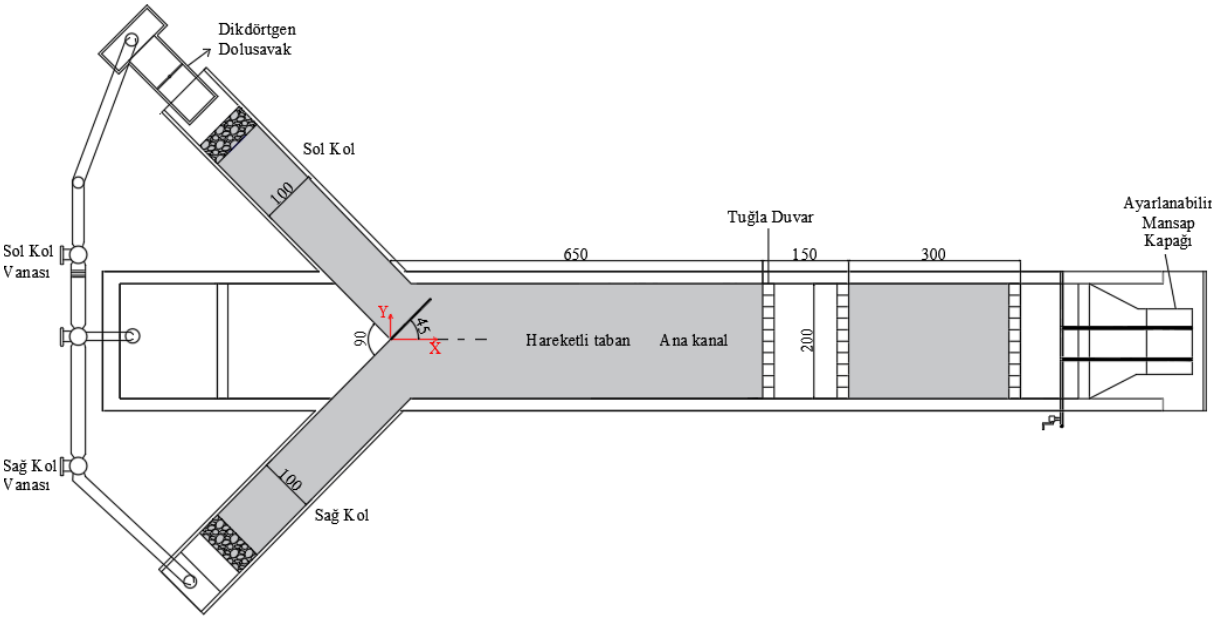
2.1 Deney Düzeneği

Deney düzeneği 4,9 m uzunluğunda ve 1,0 m genişliğinde dikdörtgen enkesitli iki yan kolun 90° açıyla birleşerek mansapta 6,5 m uzunluğunda ve 2,0 m genişliğinde bir ana kanalı oluşturduğu büyük ölçekli bir simetrik akarsu kavşağıdır (Şekil 2 ve Şekil 3). Kanalların yan duvarları 0,9 m yüksekliğinde olup duvarlar ve yatay taban yüzeyi betondan imal edilmiştir.



Şekil 2. Laboratuvardaki deney düzeneği

Şekil 3'te gri olarak gösterilen bölgeye (ana kanal ve yan kollar), elek analizi sonucunda elde edilen tane boyu dağılımına ait d_{50} değeri 1,044 mm ve geometrik standart sapma değeri (σg) 1,16 olan sediment, 20 cm kalınlığa sahip olacak şekilde hareketli bir platform yardımıyla serilerek hareketli taban oluşturulmuştur. Kavşak bölgesine 100 cm uzunluğunda, 2 cm genişliğinde ve 30 cm yüksekliğindeki ayırma duvarı ana kanal ekseni ile 45° açı yapacak şekilde açıölçer yardımıyla yerleştirilmiştir. Ayırma duvarının 10 cm yüksekliğindeki kısmı taban dışında kalmıştır.



Şekil 3. Deney düzeneği plan görünümü (birimler cm'dir)

Su, sisteme bodrum katta bulunan 24 m^3 hacmindeki su deposundan iki adet santrifüj pompa yardımıyla çekilerek sağ ve sol koldan pompalanmaktadır. Sağ kola pompalanan suyun debisi mevcut elektromanyetik debimetreyle ± 0,1 l/s hassasiyetle ölçülmektedir. Sol kolun debisi ise 0,7 m genişlikteki dikdörtgen savak ile belirlenmektedir. Savak üzerinden geçen akımın derinliği, h, limnimetre kullanılarak ± 0.1 mm hassasiyetle ölçülmüştür. Savağın debi katsayısı, C_d, Rehbock (1929)'un Eşitlik 1'deki ampirik formülüyle hesaplanmıştır [12].

$$C_d = 0{,}602 + 0{,}083h/P \quad (1)$$

Bu denklemde, dikdörtgen savağın yüksekliği P ile ifade edilmektedir. Her iki koldaki debi 10 l/s değerine ulaşıncaya kadar ilgili hat üzerine yerleştirilen kontrol vanaları kullanılmıştır.

Deney düzeneğinin ana kanal mansabında akım derinliğinin ayarlanmasını sağlayan bir mansap kapağı yer almaktadır (Şekil 4). Mansap kapağı yardımıyla ayarlanan akım derinliği, 5 cm, deney boyunca limnimetre ile ölçülerek (± 0.1 mm) sabit tutulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Ana kanal mansap bölgesi

Taban topoğrafyası, ana kanal boyunca x ve y yönlerinde 10 cm aralıklarla alınan ölçümler ile elde edilmiştir. Bu ölçümlerde, yatay düzlemde her iki eksende hareket edebilen tekerlekli ve raylı travers araba üzerine yerleştirilen downlooking Vectrino probunun mesafe ölçme özelliği kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Travers araba üzerine yerleştirilmiş Vectrino probu

2.2 Deneysel Yöntem

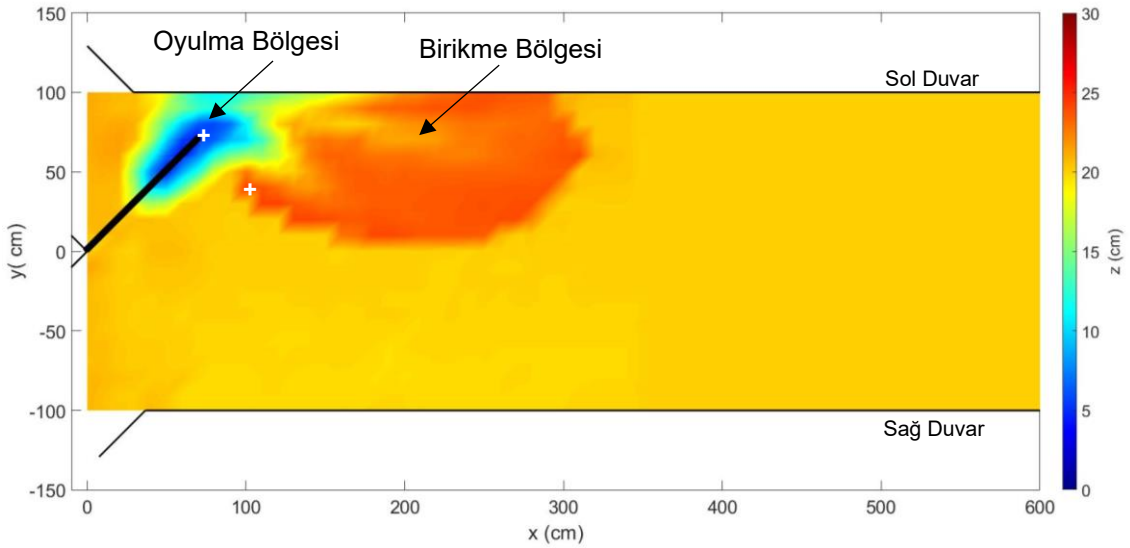
Şekil 3'teki gri bölgeye hareketli tabanı oluşturacak şekilde 20 cm kalınlığında sediment serildikten sonra ayırma duvarı, ana kanal boyuna ekseniyle 45° açı yapacak şekilde kavşak bölgesine yerleştirilmiştir. Sisteme su verilmeye başlamadan önce mansap kapağı kapatılmıştır ve pompalar, sediment danelerinin hareket etmemesini garanti altına almak amacıyla, çok küçük debi ile (2 l/s) kollara suyu pompalamaya başlamıştır. Sediment hareketi olmayacak şekilde kanal su ile doldurulmuştur. Akım derinliği sedimentin hareket etmeyeceği seviyeye geldikten sonra, vanalar kullanılarak yan kol debileri 10 l/s'ye getirilmiştir ve mansap kapağı yavaş yavaş indirilerek akım derinliği 5 cm'e kadar azaltılmıştır (t=0). Deneyler başladıktan sonra 6 saat devam ettirilmiştir. Down-looking Vectrino ile taban topoğrafyasının elde edilebilmesi için mansap kapağı kademeli olarak kaldırılarak kanal içindeki akım derinliği arttırılmış ve deney dondurulmuştur. Son olarak, ana kanal boyunca x ve y eksenlerinde 10 cm aralıklarla alınan ölçümler kullanılarak taban batimetrisi elde edilmiştir.

3. Değerlendirme

Deney sonunda (t=6 s), ana kanal içinde 0 cm ≤ x ≤ 610 cm ve -100 cm ≤ y ≤ 100 cm aralığında yapılan ölçümler sonucu elde edilen taban topoğrafyasının plan görüntüsü Şekil 6'da sunulduğu gibidir. Oyulma ve birikme (kanal ortası adacığı) bölgelerindeki minimum ve maksimum sediment kalınlıklarının tespit edildikleri koordinatlar '+' işareti ile gösterilmiştir.

6 saat sonunda, ayırma duvarının etrafında 110 cm uzunluğunda ve 80 cm genişliğinde bir oyulma bölgesi oluşmuştur. Bu bölgeden taşınan sediment ise mansap yönünde hareket ederek kanalın sol kıyısından kanal eksenine doğru genişleyen belirgin bir birikme bölgesinin oluşmasına neden olmuştur. Söz konusu birikme bölgesinin genişliği 100 cm, uzunluğu ise 200 cm olarak belirlenmiştir. Oyulma bölgesinin mansabında oluşan birikme bölgesi, taban değişiminin bu iki morfolojik özellik arasında belirgin bir mekânsal süreklilik gösterdiğine işaret etmektedir.

Oyulma bölgesinde '+' işareti ile gösterilen maksimum oyulmanın tespit edildiği koordinat (x, y) = (71 cm, 71 cm) olup, oyulma derinliği 15,9 cm olarak ölçülmüştür. Bu nokta, ayırma duvarının uç kısmına karşılık gelmektedir. Birikme bölgesinde ise '+' işareti ile gösterilen maksimum taban kotunun 24,3 cm olduğu ve bu değerin (x, y) = (100 cm, 40 cm) koordinatında tespit edildiği belirlenmiştir (Şekil 6). Kavşak mansabında sağ kıyı boyunca herhangi bir oyulma ya da birikme bölgesi oluşmadığı, sedimentin taşınmadığı, gözlemlenmiştir.

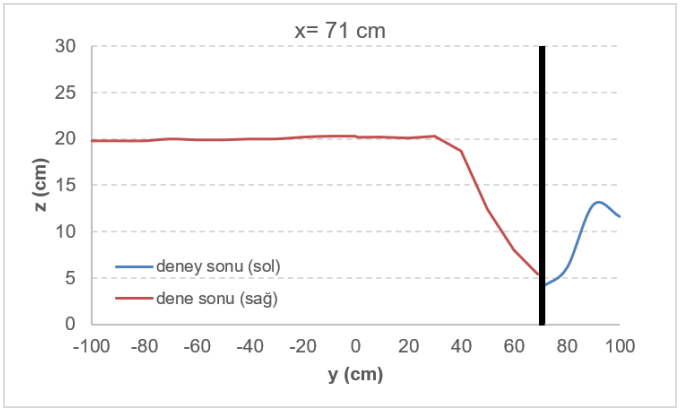


Şekil 6. Deney sonu taban batimetrisi

Taban topoğrafyası incelendiğinde, oyulma ve birikme bölgelerinin x ≈ 350 cm kesitine kadar devam ettiği, bu kesitten itibaren mansap yönünde taban topoğrafyasında kayda değer bir değişim gözlenmediği belirlenmiştir. Bu durum, sediment taşınımının bu kesitten sonra sınırlı kaldığını göstermektedir.

Şekil 1.a'da özetlenen morfolojik modelde ve Öztürk vd. (2022)'nin yaptığı çalışmada kavşak bölgesinde meydana gelmesi beklenen oyulma çukurunun, ayırma duvarının etkisiyle daha mansaba ilerleyerek ayırma duvarının ucunda (sol duvara daha yakın bölgede) oluştuğu gözlemlenmiştir [13].

Şekil 7, ayırma duvarının sona erdiği kesitteki taban profilini göstermektedir. Bu kesit incelendiğinde, ayırma duvarından sağ kıyıya doğru ilerledikçe (−100 cm ≤ y ≤ 30 cm) taban profilinin başlangıç durumunu koruduğu görülmektedir. Bu durum, plan görünümünde bu bölgede herhangi bir oyulma veya birikme bölgesinin oluşmadığını doğrulamaktadır. Buna karşılık, ayırma duvarına yaklaşıldıkça oyulma derinliğinin arttığı ve maksimum oyulma derinliğinin ayırma duvarının hemen yakınında meydana geldiği açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Deney sonunda ayırma duvarının uç kısmındaki taban morfolojisinin en kesit görünümü

4. Sonuçlar

Akarsu kavşaklarında akım yapısının ve taban morfolojisinin kontrol edilmesi, bu bölgelerde ortaya çıkabilecek risklerin olası etkilerinin azaltılması açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, mevcut literatürdeki bilgi boşluğuna katkı sağlamak amacıyla, ayırma duvarı ile akım koşullarının düzenlendiği büyük ölçekli simetrik bir akarsu kavşağında, hareketli taban koşulları altında taban morfolojisinin değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

Deney sonucunda, ayırma duvarının kavşak bölgesindeki karakteristik morfolojik yapıyı değiştirdiği ve oyulma bölgesinin kavşak köşesi yerine ayırma duvarının uç kısmında oluştuğu belirlenmiştir. Oyulma bölgesinden taşınan sedimentin oluşturduğu birikme bölgesinin ise kavşak mansabında asimetrik bir dağılım sergilediği görülmüştür.

Elde edilen bulgular, ayırma duvarının simetrik akarsu kavşaklarında taban morfolojisinin konumsal gelişimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Akım yapısının incelenmediği mevcut deney kapsamında, gözlenen morfolojik değişimlerin hidrodinamik nedenlerinin ayrıntılı olarak ortaya konulabilmesi için gelecekte hız ve türbülans ölçümlerinin de gerçekleştirildiği çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya değerli katkılar sağlayan ve TÜBİTAK 2221 Konuk veya Akademik İzinli (Sabbatical) Bilim İnsanı Destekleme Programı kapsamında desteklenen Prof. Dr. António Heleno Cardoso'ya teşekkürlerini sunar.

Deneyler, "Simetrik Akarsu Kavşaklarında Sediment Yükü Nedeniyle Taban Morfolojisinde Oluşan Değişikliğin Deneysel Olarak İncelenmesi" başlıklı ve 2016-GAPMÜMF-0020 numaralı proje kapsamında oluşturulan deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir.

5. Kaynaklar

[1] Joy, D. M., Townsend, R. D. (1981). Improved Flow Characteristics at A 90° Channel Confluence. Proceedings of 5th Canadian Hydrotechnical Conference, Canada, 781-792.

[2] Mosley, M. P. (1976). An Experimental Study of Channel Confluences. The Journal of Geology, 84(5), 535-562.

[3] Best, J. L. (1988). Sediment Transport and Bed Morphology at River Channel Confluences. Sedimentology, 35(3), 481-498. doi: 10.1111/j.1365-3091.1988.tb00999.x.

[4] Rhoads, B. L., Sukhodolov, A. N. (2004). Spatial and Temporal Structure of Shear-Layer Turbulence at A Stream Confluence. Water Resources Research, 40, 1-13.

[5] Shakibaeinia, A., Zarrati, A. R, Tabatabai, M. R. M. (2007). Three-Dimensional Numerical Study of River Channel Confluence with Bed Changes. Proceeding of 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, 32(2), 609-617.

[6] Bombar, G., Cardoso, A. H. (2020). Effect of the Sediment Discharge on the Equilibrium Bed Morphology of Movable Bed Open-channel Confluences. Geomorphology, 367.

[7] Liu, T., Fan, B., Lu, J. (2015). Sediment–Flow Interactions at Channel Confluences: A Flume Study. Advances in Mechanical Engineering, 7(6), 1-9.

[8] Büyüker, Z. (2023). Effect of Sediment Load on the Time Evolution of the Morphology of a Large-scale Laboratory Movable-bed Symmetrical Confluence. Master's Thesis, İzmir, Turkey.

[9] Odgaard, A. J. and Wang, Y. (1991). Sediment Management with Submerged Vanes. I: Theory. Journal of Hydraulic Engineering, 117(3), 267.

[10] Wuppukondur, A., Chandra, V. (2015). An Experimental Study to Control Scour at River Confluence. AGU Fall Meeting, San Fransisco, 14-16 December 2015.

[11] Ali, H. L., Yusuf, B., Mohammed, T. A, Shimizu, Y., Ab Razak, M. S., Rehan, B. M. (2019). Improving the Hydro-Morpho Dynamics of A River Confluence by Using Vanes. Resources, 8.

[12] Rehbock, T. (1929). Discussion of precise weir measurements by EW Schoder and KB Turner. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 93(1), 1143-1162.

[13] Öztürk, B., Büyüker, Z., Taşkaya, E., Bombar, G. ve Cardoso, A. H. (2022). Simetrik Akarsu Kavşağında Zamanın Taban Morfolojine Etkisi, 11. Ulusal Hidroloji Kongresi, Gaziantep, Türkiye, 13-14 Ekim 2022.

Eğlence 1 HES Projesinin Kuru Dere Yataklarında Oluşan Ani Taşkınların Taban Sediment Hareketi Üzerindeki Etkisi

Torkan HASSANİ
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul_Maslak
hassani22@itu.edu.tr

Şevket ÇOKGÖR*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul_Maslak
cokgor@itu.edu.tr

Mustafa Selmani ÖZKAYA
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul_Maslak
ozkayam19@itu.edu.tr

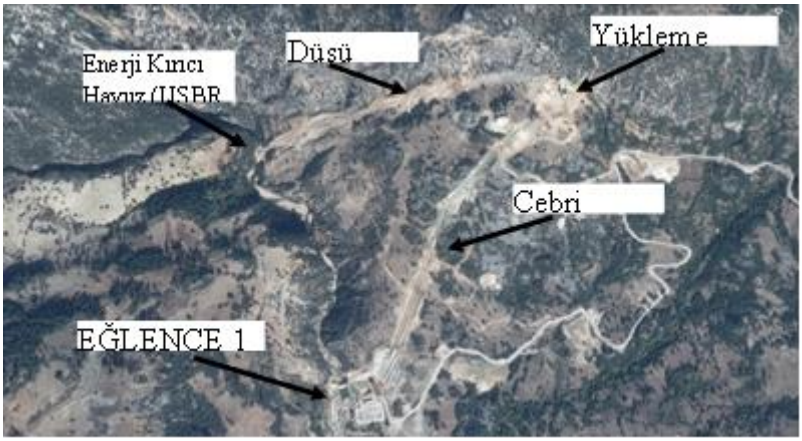
Anahtar Kelimeler*:* ani taşkın, seyrek akımlı akarsu, taban malzemesi, erozyon, yatak stabilitesi

1. Amaç

Akımın süreksiz olduğu yani sadece ani yağışlar sırasında akımın gözlemlendiği yataklarda (çataklarda) taban malzemesi hareket dinamikleri sürekli akım olan akarsu yatağında oluşan taban malzemesi hareketine göre çok daha fazladır [1]. Akımın çok seyrek olarak gözlemlendiği bu tip yatakların stabilitesi ve sürüklenmeye karşı direnci, sürekli akım olan akarsulara göre çok zayıftır. Sürekli akımın olduğu akarsularda zamanın büyük bölümü olan taban akımı sırasında tabanın akıma karşı direnci, küçük malzemelerin hareketi ve akım tarafında süpürülmesi ile daha kaba sediment çapına sahip bir zırh tabakası oluşması (armor layer), küçük tanelerin büyük tanelerin veya kayaların/taşların etrafında kümelenerek akıma karşı direnç oluşturması (clustering) ve akarsu tabanın üzerindeki su basıncı ile konsolidasyon meydana gelmesi durumlarında artmaktadır.

Morfolojik olarak sadece ani ve kuvvetli yağış, ya da kar erimesi gibi hidrolojik şartlar altında akımın meydana geldiği yataklarda taşınan taban malzemesi miktarı, eşdeğer akım özelliklerine sahip, sürekli akımın oluğu akarsulara göre bin (1000) katına kadar fazla taban malzemesi debisi sağlayabilmektedir [1]. Akarsu yatağının bu derece dirençsiz olduğu ve ani taşkınların (flash floods) gözlenme riskinin olduğu yerlerde yapılacak mühendislik yapıları önemli riskler taşımaktadırlar. Topoğrafik avantajları ve akımın buralarda çok nadir görülmesi nedeniyle bu yataklar çoğu zaman farklı yapıları kanal, bina inşa edilerek değerlendirilmektedir. Bu yapılar bu ani taşkın (flash flood) ve tabandaki çok büyük sediment hareketi sırasında önemli hasarlar alabilir, can ve mal kaybına sebep olabilirler.

Sunulan bu çalışmada Eğlence 1 hidroelektrik santrali (HES), yükleme odası deşarj kanalında meydana gelen hasarlar, bunların yukarıda bahsedilen akım ve taban koşulları ile ilişkisi incelenmiştir. Adana İli Karaisalı İlçesi sınırları içerisinde bulunan Eğlence Çayı (Deresi) üzerinde bulunan Eğlence 1 HES'li akarsudan alınan suyun 276 m düşü ile enerji üretilmektedir. HES 17,4 m3/s'lik debi göz önüne alınarak planlanmıştır. HES'te üç adet Francis tipi türbin ile enerji üretilmektedir. Tesisin yıllık üretim kapasitesi 127,3 GWh olarak planlanmıştır. Sistemde iletim tüneli (kanalı) ile akarsudan alınan su ani vana kapanma ve açılması sırasında oluşacak su darbesine karşı inşa edilmiş bir yükleme havuzuna iletilmekte, buradan cebri borular ile türbinlere aktarılmaktadır. Sistemde, yükleme bacasında maksimum su seviyesinin aşılması durumda suyu tahliye amaçlı bir düşü kanalı planlanmıştır, bu düşü kanalı 674,3 m kotundan, 427,3 m kotuna 247 m'lik kot farkına sahiptir. Bu kanal boyunca genel olarak membadan mansaba (enerji kırıcı havuza) doğru yaklaşık %30-34, %13, %29 ve %46 olmak üzere 4 farklı eğim bandı bulunmaktadır. Düşü kanalı yükleme havuzundan sonra kuru bir dere yatağını izleyecek şekilde yatağın içine konumlandırılmıştır (Şekil 1). Düşü kanalı sonunda ise USBR II (United States Bureau of Reclamation Type II) tipi bir enerji kırıcı havuz bulunmaktadır. Sular buradan dere yatağına verilmektedir (Şekil 1). Düşü kanalının inşası iç açıklığı 2x2 m olan birbirine geçmeli kare kesitli betonarme büzlerden meydana gelmiştir. Büzler birbirlerine geçmeli olarak yerleştirilmiş, büzler arasındaki derzler sızdırmazlık amacı ile bitümlü malzeme ile kaplanmıştır (Şekil 2.) Düşü kanalında iletilen suların enerjisinin kırılarak mansaba verilmesi için düşü kanalı mansabına USBR tip II betonarme enerji kırıcı havuz inşa edilmiştir.



Şekil 1. Eğlence 1 HES Projesi genel görünüşü



Şekil 2. Düşü kanalını oluşturan 2x2 m'lik kare kesitli betonarme büzler

Çalışmanın amacı bu tip kuru dere yataklarına inşa edilen yapıların aşırı taban sedimenti hareketi sonucunda ortaya çıkacak sorunlara karşı dikkat çekmektir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Topoğrafik ve Morfolojik Özellikler

Yükleme havuzu tahliye (düşü) kanalının yer aldığı bölge coğrafi olarak, oldukça dik yamaçların olduğu, vadiye doğru eğimlerin %60'lar civarında olduğu küçük bir vadi (çatak) şeklindedir. Morfolojik olarak değerlendirildiğinde bu çatağın sadece kuvvetli yağış sırasında akım geçiren bunun dışında kuru olan bir dere yatağı olduğu görülmektedir. Burası gibi kurak ya da yarı-kurak bölgelerde oldukça sıkça görülen bu kuru dere yatakları (çataklar) sadece yılın çok az döneminde ani yağışlar sırasında akım oluşturur (ephemeral stream) bunun dışında ise tamamen kuru kalırlar. Burada özellikle dikkat edilmesi gereken, burada yamaç eğimlerinin çok dik olması nedeniyle ani yağış ya da kar erimesi durumunda bu yatakta ani taşkınların (flash flood) meydana gelmesidir. Yağışın şiddetli ve ani olması ve yağış şiddetinin sızma hızından çok büyük olması durumunda vadide beklenmeyen yüksek akımlar görülebilir. Eğimin etkisi ile de bu taşkınların yatak üzerinde önemli etkileri olur. Özellikle sürekli akarsulara göre burada bir baz akım olmadığından yatak malzemesinin konsolidasyonu ve ayrıca baz akım sırasında meydana gelen kaplama tabakası da (pavement) oluşmayacaktır. Bu tip dere yatakları taban malzemesi hareketine karşı çok hassastırlar. Akıma maruz kaldıklarında sürekli akan akarsularla karşılaştırılamayacak kadar yüksek bazen de sürekli akarsularda aynı taşkının görüldüğü duruma göre 1000 katı hatta daha fazla taban malzemesi hareketine sebep olurlar [1, 2, 3, 4]. Bu ani ve yüksek taban malzemesi hareketi akarsu morfolojisini ani ve etkili olarak değiştirir. Yatak hemen hemen her taşkından sonra farklı bir morfolojiye

sahip olur. Dolayısı ile böyle ani fiziksel değişimlerin olduğu bölgede yapı inşa etmek ve bu yapının sürekliliğini sağlamak çok uygun değildir yapılacaksa da bu etkilerin göz önüne alınması gereklidir.

2.2 Hidrolojik Etkiler

Tahliye kanalı ve enerji kırıcı havuzun bulunduğu zaman zaman akan [ephemeral stream) akarsuyun havza alanı yaklaşık 0,2 km^2'dir. Bölgedeki yağış durumu incelendiğinde ani yağışların sıkça olduğu ve yükseklik nedeni ile kar yağışının olduğu karın kış boyunca kalabildiği ve bölgenin sıcaklıklarındaki ani artışla ani kar erimesi beklenebileceği ve bunun da yağmur ile birlikte olabileceği değerlendirilmiştir. Bölge tipik Akdeniz üzerinden gelen bulutların ani yağışa sebep olabileceği yüksekliktedir. Bu bölgede ani taşkınların (flash floods) görülmesi karakteristiktir. Ayrıca havzanın coğrafi durumu da bu taşkınları kolaylaştırmakta ve etkisini arttırmaktadır. Dere yatağına doğru çok yüksek eğimlerin olması yağışın hemen hemen tamamını çok kısa sürede yatağa iletmekte ve taşkının pik değeri çok artmaktadır.

3. Değerlendirme

3.1 Yapıların Hidrolik Olarak Değerlendirilmesi

Yükleme havuzu tahliye kanalı ve buna bağlı enerji kırıcı yapının hidrolik hesapları ve performansı incelenmiştir. Yükleme odasından alınan su planda trapez olan bir yaklaşım kanalı ile iç kesiti 2x2 m olan kutu menfezlerin birbirine eklenmesi ile meydana gelen üstü kapalı tahliye kanalı mevcuttur. Yükleme havuzu tahliye kanalı arasındaki geçiş rakortmanı akım çizgilerine uygun olarak yapılmıştır ve altı grobeton ile doldurularak stabil hale getirilmiştir. Tahliye kanalı 17,4 m3/s'lik HES için planlanan debiyi iletmek için planlanmıştır. Kanalın serbest yüzeyli akması planlanmıştır. Giriş su derinliği 1,7 m olarak tahmin edilmiş, kanal içerisindeki akım Manning-Strickler bağıntısı ile ötelenerek değişik kesitlerde akım karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Akım karakteristikleri olarak sadece kesitsel ortalama akım hızı ve su derinliği göz önüne alınmıştır. Akım karakteristikleri incelendiğinde eğimin arttığı kısımlarda kanal içerisinde akım hızları bazı bölgelerde 20 m/s gibi çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu durum menfez içerisinde akımın kinetik enerjisinin çok yüksek olduğunu ve buna bağlı olarak ta akımın türbülans yapısının etkilendiğini ve çalkantı bileşenlerinin kanal içerisinde istenmeyen büyüklüklere çıktığını göstermektedir.

3.2 Tahliye Kanalı ve Enerji Kırıcı Havuzda Meydana Gelen Hasarlar

Tahliye kanalının çalışması ve aynı zamanda enerji kırıcı havuzdaki hasarlar incelendiğinde tahliye kanalını oluşturan menfezlerin oynadığı birleşim yerlerinden açıldığı, tahliye kanalının yerleşim ekseninden kaydığı, birleşim yerlerinden açıldığı görülmektedir (Şekil 3). Tahliye kanalı tabanın kaya olduğu düşünülerek açılan güzergaha yapılan dolgu üzerine büzlerin yerleştirilmesi ve derzlerin doldurulması ile inşa edilmiştir. Projeye göre kanalın üzeri 50 cm kadar kazıdan çıkan Zemin ile doldurulmuştur. Bu kadar uzun bir hatta güzergahın tamamının yekpare kaya olması beklenmemelidir. Mevcut inşa tekniği ile parçalardan birinde yapılacak yerleştirme hatası ya da dışardan etki sonucu meydana gelecek oynama sistemin tamamen devre dışı kalmasına yol açabilir. Buradaki durum irdelendiğinde, bu hasarların meydana gelen ani taşkın (flash flood) sırasında (Bölüm 2'de söz edilen) vadi tabanındaki malzemenin hareketidir. Bu tip kuru dere yataklarında (sadece çok kısa zaman aralıklarında akım görülen) taban malzemesinin akıma karşı direncinin çok zayıf olması, konsolidasyonunun olmaması gibi nedenlerle menfezler etrafındaki malzeme yıkanmış ve buna bağlı olarak kanal da hasar görmüştür. Tabanda erozyonun hâkim olduğu bitki örtüsünden de takip edilebilir. Akımın olduğu kısımlarda ağaç ya da yetişmesi uzun süre alan bitkiler mevcut değildir akarsu yatağındaki sürekli morfolojik değişimler bitki oluşumuna izin vermemekte ve burada yıl boyunca zamana bağlı akım olduğu görülmektedir. Bu doğal duruma ilave olarak kanalın inşası için zeminin kaldırılması sonra da kanalın etrafının ve üzerinin aynı zeminle doldurulması zemin konsolidasyonun daha da zayıflamasına sebep olmaktadır. Ayrıca akım ile hareket eden tanelerin zemin yığını içerisindense sert ve sabit bir yüzey üzerinden hareketi daha kolay ve büyüktür (Şekil 4). Tahliye kanalı yanında ve üzerindeki oyulmalar bu durum sonucunda oluşmuştur (Şekil 3). Kanal mevcut durumunda sürdürülürse bu hasarların sürekli görülme ihtimali yüksektir.

Bu tip yüksek eğimli kanallarda akım hızları da belirli kesitlerde çok büyük olacağından burada uygulanan yapım tekniğinin de uygun olmadığı görülmektedir. Ayrıca kanal içerisinde kesitte azalmaya neden olacak bir durum yaşanmasında kanal basınçlı çalışmaya başlayacak ve bu durum kanala daha da büyük hasarlar verecektir. Enerji kırıcı havuzda da önemli hasarlar görülmektedir. Bunlar tahliye

kanalı ile havuz arasında açılmalar havuzun konumundan ötelenmesi şeklindedir. Havuz etrafındaki sediment hareketi, zeminde yıkanmalar ve havuzun ana kaya üzerine yeterince sabitlenememesi sonucunda hasar meydana gelmiştir.



Şekil 3. Tahliye kanalı a) Ana (kanalın ekseninden ayrılması), b) Yerel (menfez bağlantı açılmaları)



Şekil 4. Kanal etrafında oyulma ve dere yatağı morfolojisinde değişmeler

Dere yatağına inşa edilen bu yapıda stabilite problemi olacağı açıktır. Bu yapının özellikle erozyona karşı çok dirençsiz olduğu genelde kuru olan sadece zaman zaman akan (ephemeral stream) derede olması buradaki yapıların daha büyük hasar almasına sebep olacaktır. Yatağın morfolojisi her görülen akımdan sonra yeniden değişecektir bu durum buradaki her yapıyı da etkileyecektir. Hasarlara karşı yapılan onarımlarda da dikkatli olunmalıdır. Menfez kullanılarak burası için hatalı seçilmiş malzemeden

yapılan kanal sadece lokal hasarların giderilmesi ile hizmete sokulmamalıdır kanalda hat boyunca deformasyonlar da vardır bu kısımlarda tespit kitlesi uygulaması zorunludur ayrıca kanal içerisinde menfez bağlantılarındaki süreksizlikler de incelenmelidir. Enerji kırıcı havuz içinde stabilite problemi vardır. Havuzun çalışmasında ya da dere yatağında akım olduğunda yataktaki morfolojik değişimlerden yapı etkilenecektir (Şekil 4).

4. Sonuçlar

Eğlence HES 1 yükleme havuzu tahliye kanalı ve enerji kırıcı yapıda ani taşkın sonucundaki sediment hareketi ile oluşan hasarlar değerlendirilmiştir. Hasarlar genel olarak dere yatağına yapılan yapılar etrafında görülen sediment hareketi kaynaklı oyulmalardan ve aşırı sediment hareketi sırasında meydana gelen morfolojik değişimlerden meydana gelmiştir. Hasarlara kanalın güzergâh seçimi kuru dere yatağının hidrolojik ve morfolojik şartlarının doğru değerlendirilmemesi, uygun olmayan kanal tasarımı (menfez uygulaması) ve inşa sırasındaki eksiklikler (tabanın güzergâh boyunca aynı zeminden oluştuğunun düşünülmesi vb.) sebep olmuştur.

Bu tip vadilerde yapılaşma engellenmeli, zorunlu ise bu duruma karşı çok zor da olsa önlem alınmalıdır.

5. Kaynaklar

[1] Laronne J.B., Reid I., Yitshak Y., Frostic L.E., 1994, “The non-layering of gravel bed steambeds under ephemeral flood regimes” Journal of Hydrology, 159, 353– 363

[2] Meirovich L., Laronne J.B., 1998,” The variation of water surface slope and its significance for bedload transport in gravel-bed streams”, Journal of Hydraulic Research. Vol 36, No: 2. 147-157.

[3] Reid I., Laronne J.B., and Powell D. M., 1998, “Flash-Flood and bedload dynamics of desert gravel-bed streams”, Hydrol. Process. 12, 543-557.

[4] Wittenberg L., Laronne J.B., Newson M.D., 2007, “Bed clusters in humid perennial and Mediterranean ephemeral gravel-bed streams: The effect of clast size and bed material sorting” Journal of Hydrology, 334, 312– 318.

Akarsularda Odunsu Materyal Akışı, Tuzaklama Yöntemleri Ve Yenilikçi Bir Yaklaşım

İsa CİCİ
İnönü Üniversitesi/Malatya - 0000-0002-5501-3509
isa.cici@inonu.edu.tr

Ömerul Faruk DURSUN
İnönü Üniversitesi/Malatya - 0000-0003-3923-5205
faruk.dursun@inonu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* taşkın, akarsuların taşıdığı odunsu malzemeler, odunları tuzaklama

1. Amaç

Akarsu havzalarında meydana gelen taşkınlar sırasında taşınan odunsu materyaller ve moloz akıntıları; köprü, baraj ve tersip bendi gibi kritik hidrolik yapıların menfezlerini tıkayarak veya yapıya aşırı hidrodinamik yükler bindirerek yapısal göçmelere yol açabilmektedir. Bu tıkanmalar, memba kesiminde ani su kabarmalarına neden olarak çevre taşkın riskini ve can/mal kaybı tehdidini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı; söz konusu taşkın felaketlerini ve yapısal hasarları önlemek amacıyla literatürde uygulanan mevcut koruma yapılarının hidrolik performanslarını irdelemek ve yüksek tuzaklama verimliliğine sahip, memba geri su kabarmasını minimize eden yenilikçi bir tuzaklama sistemi geliştirmektir.

2. Materyal ve Yöntem

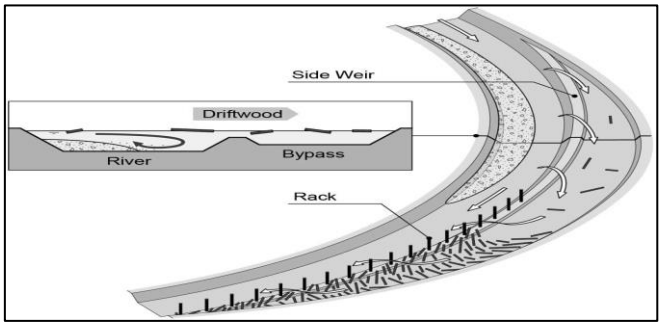
2.1. Literatür

Literatürde yapılan tuzaklama çalışma yöntemleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Literatürde mevcut bulunan bazı malzeme tuzaklama yöntemleri

Yöntem	Literatür	Yöntem	Literatür
Nehir'e eşit aralıklarla engeller yerleştirilmiştir.	Lange ve Bezzola (2006)	Köprü ayaklarının yukarısına büyük bir ahşap kanat yerleştirmek	Schalko vd. (2020a)
Nehir kıvrımın da bir geçiş yolu oluşturulmuştur.	Schmocker ve Weitbrecht (2013)	Köprü ayaklarının yukarısına bir alt eşik yerleştirmek	Schalko vd. (2020b)
Nehirde yüzen odunu tutmak için ızgara monte etmiştir.	Schalko vd. (2019a); Schalko vd. (2019b)	Köprü ayağı şekil tasarımı	De Cicco vd. (2020)
Nehrin kesitinin yarısını kaplayan, birbirini takip eden iki ızgara konulmuştur.	Panici ve Kripakaran (2021)	Gemibornu tasarımı	Akçalı E. (2022)
Nehirde yüzen odun tutmak için eğimli ızgara yapılarını kullanmıştır.	Schalko vd. (2021)		

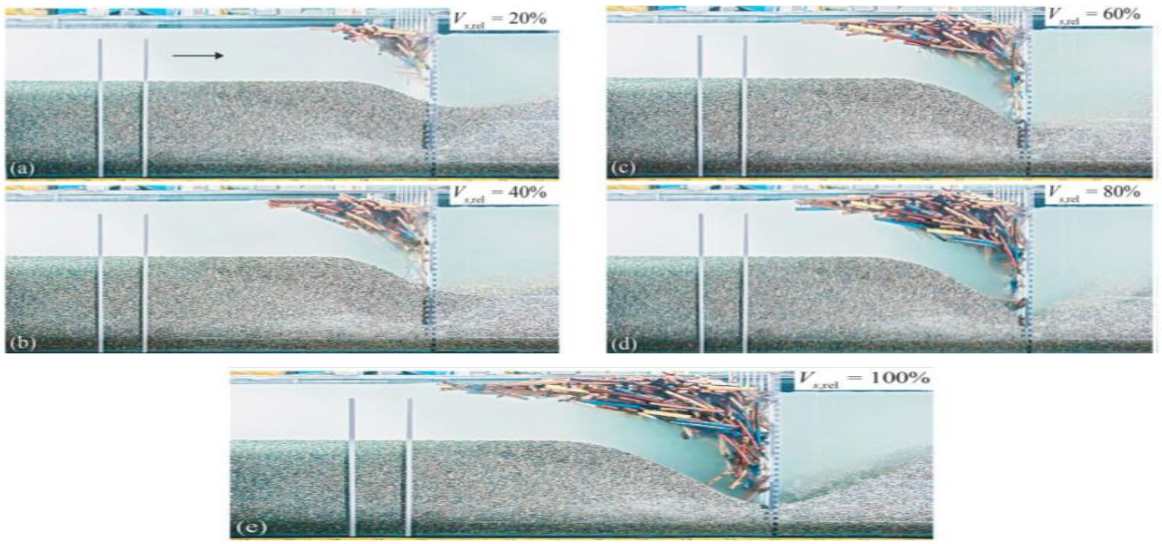
Schmocker vd. (2013), nehir güzergâhında beklenen odunsu moloz miktarını belirleyerek tutma yapıları için en uygun konumu tayin etmeye yarayan bir yüzen odun taşıma diyagramı geliştirmiştir. Çalışmada, yüzen odunun menderes dış bükeyinde konumlandırılan bir baypas kanalında tutulduğu yenilikçi bir yapı modeli sunulmuştur. Şekil 1'de baypas tasarımının nehir de konumlandırılmış şekli verilmiştir.



Şekil 1. Baypas kanalının şekli Schmocker vd. (2013)

Schalko vd. (2021), mansap yönündeki potansiyel taşkın ve moloz tehlikelerini azaltmak amacıyla sediment tuzakları veya ızgara benzeri tutma yapılarının inşa edildiğini belirtmiştir. Araştırmacılar, taban açıklığı bulunan eğimli bir çubuk ızgara üzerinde oluşan yüzen odun birikimlerinin memba su kabarması ve yatak yükü taşınımı üzerindeki etkilerini incelemek üzere bir dizi kanal deneyi gerçekleştirmiştir.

Schalko vd. (2019), hareketli tabanlı bir yatakta boyuna yüzen odun birikimlerinin neden olduğu memba su kabarmasını inceleyen hidrolik model deneylerinin sonuçlarını sunmuştur. Şekil 2'de, odun hacmine bağlı olarak memba su seviyesinde meydana gelen değişim ifade edilmiştir. Çalışmada, odunların ızgaranın su yüzeyi üzerindeki üst kesiminde biriktiği, biriken bu kütlenin altında ise akım hızının artarak akışın tabana doğru yönlendiği gözlemlenmiştir. Yüksek Froude (Fr) sayılarında odunların tabana doğru sürüklenme eğiliminin arttığı ve bunun da birikimin daha sıkı (kompakt) bir yapı kazanmasına yol açtığı ifade edilmiştir.



Şekil 2. Yüzen odun hacmine göre oyulma etkisi

Schalko vd. (2020), eğimli ızgaraların memba su kabarmasını ve yerel oyulmayı azaltacağı hipotezini öne sürmüştür. Şekil 3'te, artan yüzen odun hacminin memba su seviyesindeki kabarma ve taban oyulması üzerindeki etkileri sunulmuştur. Elde edilen bulgular, ızgara açısının yataya doğru daralmasıyla birlikte hem memba su yükselmesinin hem de yerel oyulma derinliğinin azaldığını göstermiştir. Boyutsuz memba su yükselmesi ($\Delta h/h_o$), ızgara açısı azaldıkça düşüş sergilemiş; açının 90°'den 20°'ye indirilmesi durumunda ($\Delta h/h_o$) değerinde yaklaşık %25 oranında bir azalma kaydedilmiştir. Bununla birlikte, yüksek miktarda yüzen odun ve ince organik malzemenin taşındığı koşullarda yapı üzerinden aşma (üstten taşma) ve ızgaranın tamamen tıkanması gibi risklerin ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır.

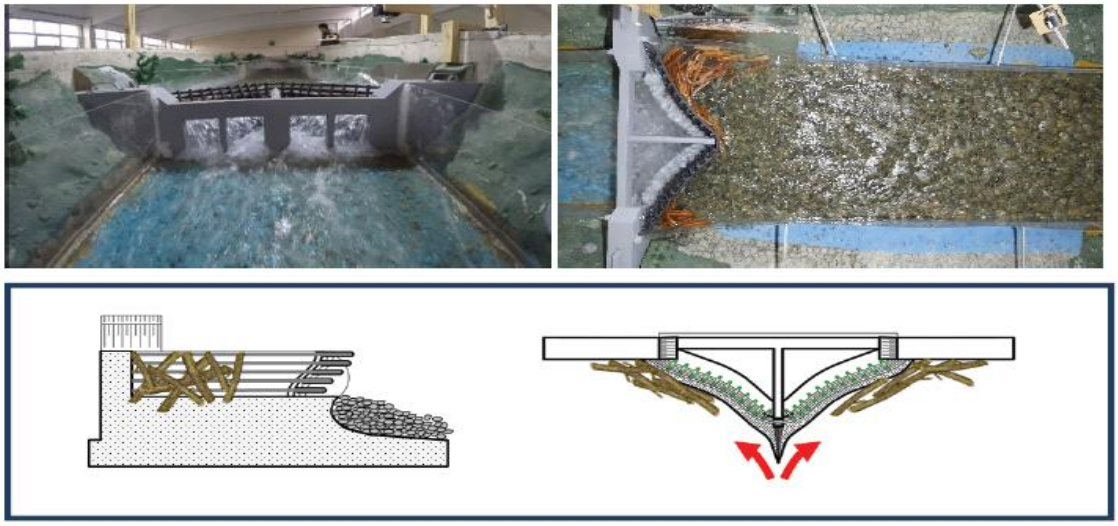
De Cicco vd. (2020), köprü ayaklarında biriken odunsu molozların yapıya ek hidrodinamik yükler bindirdiğini, taşkın riskini ve yerel oyulmayı şiddetlendirdiğini, nihayetinde ise köprü göçmelerine yol açabileceğini belirtmiştir. Çalışmada, ova tipi nehirlerde köprü ayağı geometrisinin odun birikimi ve tıkanma olasılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada ayrıca, köprü ayağı enkesit şeklinin

memba akım alanını önemli ölçüde değiştirdiği ve bu durumun tıkanma olasılığını doğrudan belirlediği vurgulanmıştır. Test edilen koşullar altında en yüksek tıkanma riskinin; kare kesitli ayak geometrisi, yüksek Fr sayısı ve yarı yoğun (yarı tıkalı) odun taşınım rejiminin bir araya geldiği durumlarda oluştuğu saptanmıştır. Tıkanma olasılığını ve odun birikimini en aza indirmek için silindirik veya burun kısmı sivrilen (keskin uçlu) köprü ayak geometrilerinin hidrolik açıdan en uygun tasarımlar olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, yoğun miktarda yüzen odun akışına maruz kalındığında köprü açıklıklarının tıkanma olasılığının oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir.



Şekil 3. Yüzen odun hacmine göre oyulma üzerindeki etkisi

Akçalı E. (2022), dünyada kullanımı giderek yaygınlaşan ancak işletme aşamasında yaşanan hızlı tıkanma mekanizması nedeniyle işlevini tam olarak yerine getiremeyen geçirgen tersip bentlerine alternatif olarak yeni bir model geliştirmiş ve Şekil 4'de sunulan "Gemiburnu" tipi yapıyı önermiştir. Bu çalışma kapsamında; klasik biriktirmeli tersip bentlerinin sediment tutma işlevini korurken, aynı zamanda odunsu materyalleri etkin bir şekilde tuzaklayabilen ve bent üzerinden aşmasını engelleyen yenilikçi bir bent geometrisi tasarlanmıştır. Laboratuvar ortamında yürütülen fiziksel model deneyleri; Gemiburnu tipi geçirgen bendin, klasik yarı geçirgen bentlere kıyasla hızlı tıkanma ve üstten aşma problemlerini önlemede oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.



Şekil 4. Gemi burnu şeklinde geçirgen tersip bendi

2.2. Yöntem

Deneyler, İnönü Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında bulunan açık kanal deney seti kullanılarak yapılmıştır. Bu açık kanal deney setine ait üsten görünüm Şekil 5'de verilmiştir. Deney seti 13 m uzunluğunda, 1.2 m genişliğinde ve 0.8 m derinliğindedir. Ayrıca çalışmada 1/20 ölçekte deneyler yapılmıştır. Deneyler 20, 40, 60, 80 l/s debi değerleri için üç sıra geçirgen mahmuz yerleştirerek çalışma yapılmıştır. Ayrıca mahmuz boyu L/2, 2L/3 ve L/3 olacak şekilde alınmıştır. Burada: L kanal genişliğini temsil etmektedir. Deneyler 0.0001 eğim durumunda yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan odunsu malzemeler çınar ağacı dalları kesilerek elde edilmiştir. Kuru halde malzeme yoğunluğu 600 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Ön deneylerde su içerisine tam olarak batırılan

odun parçalarının ilk 2 saat içinde suya doyduğu ve ağırlık artışının durduğu hassas teraziyle belirlenmiştir. Bu doğrultuda, deney sonuçlarının standardizasyonu için tüm odun numuneleri deneyler öncesinde en az 2 saat suda bekletilip süzülerek doygun hâle getirilmiştir. Deneylerde ifade edilen tuzaklama oranları, tutulan malzemelerin ağırlıklarının toplam malzeme ağırlığına oranlanması ile elde edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan odun parçalarının çapları 1 ile 3,5 cm, uzunlukları ise 10 ile 35 cm arasında değişecek şekilde standartlaştırılmıştır.

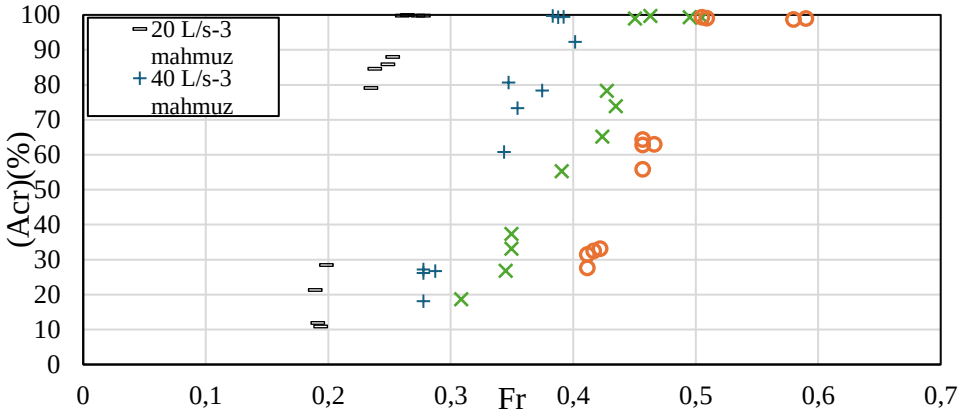


Şekil 5. Üçlü geçirgen mahmuz yapısı ve malzeme tuzaklanmış hali

3. Değerlendirme

Şekil 5'de, üçlü geçirgen mahmuz dizisinin yüzen odunları tuzaklama mekanizması ve birikim morfolojisi gösterilmiştir. Deney sonuçları, üçlü geçirgen mahmuz konfigürasyonunun yaklaşık %98 gibi oldukça yüksek bir odun tuzaklama verimliliği sağladığını göstermiştir. Odun tuzaklama verimi; hassas terazi ile tartılan, tuzaklanmış odun kütlesinin sisteme verilen toplam odun kütlesine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Yatak enkesitinin tamamı odun birikintisiyle bloke edilmediğinden (tam tıkanma yaşanmadığından), hidrolik iletim kapasitesi kısmen korunmuş ve buna bağlı olarak memba geri su kabarması yerel olarak yoğunlaşmak yerine daha geniş bir alana yayılarak pik su seviyesi artışı minimize edilmiştir.

Şekil 6'da geçirgen mahmuzlarda tuzaklanan yüzen odunları yakalama oranları ile Fr sayısı arasındaki ilişki araştırılmıştır Acr; yüzde cinsinden geçirgen mahmuzlarda biriken odun malzemesinin tüm odunsu malzemeye oranını belirtmektedir. Fr sayısı köprü membaındaki ortalama akım derinliği ve hıza göre hesaplanmıştır.



Şekil 6. Geçirgen mahmuzlarda tuzaklama oranları

Bütün debilerde L/2 boyunda olan geçirgen mahmuzların en iyi şekilde odun yakaladığı sonucu elde edilmiştir. L/3 boyunda olan geçirgen mahmuz çalışmalarda en düşük odun tuzaklama oranları elde edilmiştir. Ayrıca debinin artmasıyla Fr sayısında artış olmuştur. Ayrıca tuzaklanan odun miktarı artıkça da Fr sayısında artış meydana gelmiştir. Bu durum, geçirgen mahmuzlarda odunun birikmediği durumlarda köprüde birikmenin artması ve köprüde akım hızının yavaşlaması şeklinde açıklanabilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada; akarsu sistemlerindeki odunsu materyaller ve bu materyallerin oluşturduğu hidrolik riskler ve geliştirilen koruma/kontrol yapıları üzerine literatür taraması gerçekleştirilmiş ve yeni bir yöntem önerilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Yüzen odunların birikme ve enkesit tıkanıklığı oluşturma olasılığı; odunun geometrik ve fiziksel özellikleri, yaklaşım akımının hidrodinamik koşulları ve nehir içi yapı geometrilerinin karşılıklı etkileşimine doğrudan bağlıdır.

Odun birikintileri nedeniyle oluşan kesit daralmaları; memba su kabarmasını, yapı çevresindeki yerel taban oyulmasını ve sedimantasyon birikimini önemli ölçüde etkilenmektedir. Tıkanma kaynaklı aşırı hidrodinamik yükler sonucu yapının göçmesi durumunda ise mansap yönünde ani bir pik debi (taşkın dalgası) açığa çıkabilmektedir.

İncelenen çalışmalarda, odun tuzaklama verimliliği yüksek olan rijit yapıların aynı zamanda belirgin bir geri su kabarmasına yol açtığı görülmüştür. Bu nedenle, hidrolik koruma yapılarının tasarımında tuzaklama kapasitesi ile memba su yükselmesi arasındaki optimizasyonun birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Geliştirilen yenilikçi tasarım sayesinde memba su kabarması belirgin ölçüde sınırlandırılarak pik su seviyesi artışı minimize edilmiştir. Buna ek olarak çalışma kapsamında, önerilen yapının mansapta yer alan köprü ayakları etrafındaki akım alanı ve tıkanma dinamikleri üzerinde önemli yararlı etkileri oluşmaktadır. Geliştirilen yenilikçi tasarım ile yüzen odun tutma süreçlerinde yaklaşık %98 gibi oldukça yüksek bir tuzaklama verimliliği elde edilmiştir.

Geçirgen mahmuz boyunun artmasıyla odun tuzaklama verimliliği artmıştır. En iyi çalışmalar geçirgen mahmuz boyunun L/2 olduğu deneylerde elde edilmiştir. En kötü sonuçlar ise mahmuz boyunun L/3 olduğu durumlarda meydana gelmiştir. Tuzaklama oranının artmasıyla Fr sayısında artış meydana gelmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmayı 124M033 kod numaralı proje ile destekleyen Tübitak'a ve FYL-2024-3792, FDP-2024-3650 ve FDK-2022-3054 kod numaralı projeler ile destekleyen İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

[1] Akçalı, E. (2022). Taşkın ve rüsubat kontrolünde yeni öneri: gemiburnu tip geçirgen bent. Teknik Dergi, 33(6), 12847-12861.

[2] De Cicco, P. N., Paris, E., Solari, L., & Ruiz-Villanueva, V. (2020). Bridge pier shape influence on wood accumulation: Outcomes from flume experiments and numerical modelling. Journal of Flood Risk Management, 13(2), e12599.

[3] Lange, D., Bezzola, G.R., 2006. Schwemmholz. Probleme und L¨osungsans¨atze. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETHZ, Zürich, Mitteilungen, 188, p. 125 (in German).

[4] Panici, D., Kripakaran, P., 2021. Trapping large wood debris in rivers: experimental study of novel debris retention system. J. Hydraul. Eng. 147 (3), 04020101. https:// doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001859.

[5] Schalko, I. (2020). Wood retention at inclined racks: Effects on flow and local bedload processes. Earth Surface Processes and Landforms, 45(9), 2036-2047.

[6] Schalko, I., Lageder, C., Schmocker, L., Weitbrecht, V., & Boes, R. M. (2019a). Laboratory flume experiments on the formation of spanwise large wood accumulations: I. Effect on backwater rise. Water Resources Research, 55, 4854–4870. https://doi.org/10.1029/2018WR024649

[7] Schalko, I., Lageder, C., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M., 2019b. Laboratory Flume experiments on the Formation of Spanwise large Wood Accumulations: Part II—Effect on local scour. Water Resour. Res. 55 (6), 4871–4885. https://doi.org/ 10.1029/2019WR024789.

[8] Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M., (2020b). Risk reduction measures of large wood accumulations at bridges. Environ. Fluid Mech. 20 (3), 485–502. https:// doi.org/10.1007/s10652-019-09719-4.

[9] Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M., 2020a. Laboratory study on wood accumulation probability at bridge piers. J. Hydraul. Res. 58 (4), 566–581. https:// doi.org/10.1080/00221686.2019.1625820.

[10] Schmocker, L., & Weitbrecht, V. (2013). Driftwood: Risk analysis and engineering measures. Journal of Hydraulic Engineering, 139(7), 683-695.

Anroşman Tabanlı Kanallarda Çözünmüş Oksijen Artırımının Deneysel Olarak İncelenmesi

Veysel Süleyman YAVUZ*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
yavuzvs@itu.edu.tr

Şevket ÇOKGÖR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
cokgor@itu.edu.tr

Torkan HASSANİ
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
hassani22@itu.edu.tr

Ayşegül ÜÇÜNCÜ
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
ucuncu@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: açık kanal, çözünmüş oksijen, oksijen transferi

1. Amaç

Çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu, çevresel faktörler göz önünde bulundurulduğunda, özellikle su kalitesi ve sucul yaşam açısından akarsulardaki en kritik parametrelerden biridir. Doğal süreçler ve insan faaliyetleri sonucunda meydana gelen çeşitli kimyasal, fiziksel ve biyolojik olaylar sudaki oksijeni farklı şekillerde tüketmekte ve bunun sonucunda çözünmüş oksijen miktarı azalmaktadır. Çözünmüş oksijen seviyesinin azalması, akarsu kalitesini önemli ölçüde düşürmekte ve biyolojik yaşam açısından tehdit oluşturmaktadır. Buna karşılık, akarsulardaki çözünmüş oksijen seviyesinin artırılması, sucul habitatın iyileştirilmesine katkı sağlamakta ve dolaylı olarak bitki ve insan yaşamını da olumlu yönde etkilemektedir. Literatürde, akarsulardaki çözünmüş oksijen seviyelerinin artırılması amacıyla savaklar [1], hidrolik sıçramalar [2], dolusavaklar [3] ve kaskatlar [4] gibi çeşitli yapısal çözümler önerilmektedir. Oksijen kazanımı açısından yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri, akımın basamaklı yapılar üzerinden geçirilmesidir. Bu tür yapılar tarih boyunca yaygın olarak kullanılmıştır. Kaskat kanallardaki akımın temel karakteristikleri, yüksek türbülans düzeyi ve önemli miktarda hava girişidir.

Bu kanallarda sıyırmalı akım (skimming flow) ve nap akımı (nappe flow) olmak üzere iki farklı akım rejimi meydana gelmektedir. Sıyırmalı akım rejiminde ana akım, basamak köşelerinin oluşturduğu hayali yüzey boyunca yapının eğimi doğrultusunda hareket etmekte ve basamak boşluklarında resirkülasyon bölgeleri oluşmaktadır. Bu akım rejiminde her bir basamak üzerinde ayrı bir hidrolik sıçrama meydana gelmemektedir. Nap akımında ise akım, bir basamaktan diğerine serbest jet şeklinde düşerek alt basamağa çarpmakta, akım koşullarına bağlı olarak basamaklar üzerinde hidrolik sıçrama oluşabilmektedir.

Çokgör ve Küçükali, deneysel çalışmalarında kayaların akarsulardaki çözünmüş oksijen seviyeleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve su derinliğine göre kaya yüksekliğinin çözünmüş oksijen kazanımını etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermiştir [5]. Akarsulardaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunu artırmak amacıyla inşa edilen yapılar oksijen seviyesini artırmakla birlikte, akarsuyun memba ve mansap kesimleri arasındaki etkileşimi bozarak bazı olumsuz çevresel sonuçlara yol açabilmektedir. Bu durum, katı madde taşınımının kesintiye uğramasına ve balık geçişlerinin engellenmesine neden olabilmektedir. Bu faktörler dikkate alındığında, nehir rehabilitasyonu çalışmalarında ve dolusavak çıkışlarında daha doğal ve çevreyle uyumlu alternatiflerin kullanılması önem kazanmaktadır. Nehir havzalarındaki yerleşimlerin artmasıyla birlikte akarsulardaki ince taneli askıda katı madde miktarı da artmaktadır. Bu durum, düşey türbülans bileşenini ve özellikle akarsuyun alt tabakalarına oksijen girişini azaltarak akım koşullarını etkilemektedir. Bunun sonucunda akarsulardaki biyolojik çeşitlilik giderek azalmakta ve bazı türler ortadan kaybolmaktadır. Günümüzde nehir sistemlerindeki biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilmesi amacıyla çeşitli düzenlemeler uygulanmakta, farklı amaçlarla inşa edilen baraj ve savak gibi yapıların çözünmüş oksijen seviyeleri üzerindeki etkileri

incelenmekte ve çözünmüş oksijen seviyelerine sağlayabilecekleri katkılar tasarım parametrelerinden biri olarak değerlendirilmektedir [5]. Bu çalışmada, bir akarsuyun çözünmüş oksijen seviyesinin artırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, laboratuvar ortamında doğada bulunan farklı yüksekliklerdeki taşlar kullanılarak eğimli, pürüzlü ve doğal basamaklı bir yapı oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, açık kanallarda doğayla bütünleşmeyen yapay bir hidrolik yapıya ihtiyaç duyulmadan, doğal taş düzenlemeleri aracılığıyla suyun havalandırılmasının sağlanmasıdır. Bu kapsamda, basamaklı taş düzeneğinin yanı sıra su derinliği, hava ve su sıcaklığı ile sıyırmalı ve nap akım koşullarının sudaki çözünmüş oksijen transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Savaklar ve kaskadlar gibi hidrolik yapıların çevresinde meydana gelen oksijen transferi, Gameson [6] tarafından tanımlanan aşağıdaki ifade kullanılarak belirlenebilmektedir:

$$r=\frac{C_S - C_U}{C_S - C_D} \tag{1}$$

Burada C_S, C_U, ve C_D sırasıyla doygunluk, memba ve mansap oksijen konsantrasyonlarını (mg/L), r ise eksiklik oranını ifade etmektedir. r değeri, oksijen transferinin gerçekleşmediği durumda 1'den, tam oksijen transferinin gerçekleştiği durumda sonsuza kadar değişmektedir. Diğer taraftan, bu transferin verimi aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilmektedir:

$$E=\frac{C_D - C_U}{C_S - C_U}=1-\frac{1}{r} \tag{2}$$

Burada konsantrasyondaki değişim, başlangıçtaki oksijen eksikliğinin bir oranı olarak ifade edilmektedir. Bu denklemde E parametresi havalandırma verimini ifade etmekte olup, havalandırmanın olmadığı durumda 0 ile mansapta tam doygunluğun gerçekleştiği durumda 1 arasında değişmektedir.

Eksiklik oranı ve havalandırma verimi olarak tanımlanan bu iki boyutsuz büyüklük, farklı havalandırma yapılarının veya farklı düzenlemelerin oksijen transferi üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması için bir temel oluşturmaktadır. Bununla birlikte, oksijen transferi su sıcaklığına duyarlı olduğundan, havalandırma veriminin belirlenmesinde bir sıcaklık düzeltme katsayısının kullanılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında Gulliver vd. [7] tarafından geliştirilen aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır:

$$1-E_{20} = (1 - E_T)^{1/f_T} \tag{3}$$

Denklem 3'te E_{20} parametresi 20 °C'deki havalandırma verimini, E_T ölçümün gerçekleştirildiği su sıcaklığındaki havalandırma verimini ve f_T ise aşağıdaki bağıntıyla verilen katsayıyı ifade etmektedir:

$$f_T = 1 + 0{,}02103\cdot(T_w - 20)+8{,}261\cdot 10^{-5}\cdot(T_w - 20)^2 \tag{4}$$

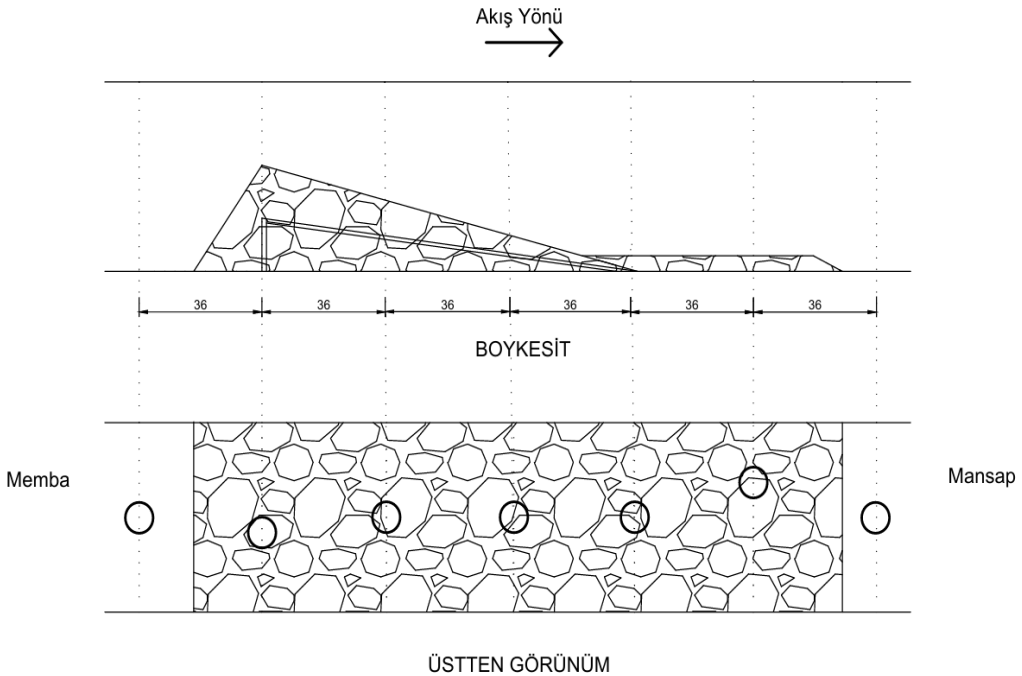
Burada T_w, su sıcaklığını ifade etmektedir.

Deneyler, 0,5 m genişliğinde, 0,45 m yüksekliğinde ve 12,5 m uzunluğundaki yatay tabanlı laboratuvar sirkülasyon kanalında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan taş düzeneği kanalın orta kısmına sabitlenmiş ve akım, suyun kanal içerisinde devridaim ettirilmesiyle sağlanmıştır. Çözünmüş oksijen miktarının belirlenmesinde OXI 330i membran tipi oksijen ölçerler kullanılmıştır. Bu cihazlar çözünmüş oksijen miktarının yanı sıra su sıcaklığını da ölçebilen sıcaklık sensörlerine sahiptir. Sıcaklık, sudaki çözünmüş oksijen seviyesini etkileyen bir parametre olduğundan, oksijen ölçüm cihazı her ölçümden önce havada kalibre edilmiş ve hava ile su sıcaklıkları belirlenmiştir. Sirkülasyon kanalındaki oksijen seviyesini artırmak amacıyla oluşturulan deney düzeneği, ortalama çapı 10 cm olan köşeli kaya parçalarından meydana gelen, 110 cm uzunluğunda ve 28 cm yüksekliğinde eğimli bir rampadan oluşmaktadır. Rampanın memba kısmı, benzer boyutlardaki kayaların ters eğimli olarak yığılmasıyla desteklenmiş ve düzenek laboratuvar kanalının orta kısmına sabitlenmiştir. Ölçümler toplam yedi farklı noktada gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar, akımın taş düzenlemesinden etkilenmediği memba bölgesinde, taşlardan oluşan düzeneğin bulunduğu kesitte ve meydana gelen hidrolik sıçramanın öncesinde yer almaktadır. Ölçüm noktaları, düzeneğin başlangıç ve en yüksek kısmından 20 cm mesafeden başlayacak ve 36 cm aralıklarla devam edecek şekilde belirlenmiştir. Her ölçüm noktasındaki taşlar, membran tipi oksijen ölçüm cihazının uygun şekilde konumlandırılmasına olanak sağlayacak biçimde düzenlenmiştir. Akış halindeki sudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun doğru şekilde

belirlenebilmesi amacıyla oksijen ölçüm cihazı her ölçüm noktasında en az 60 saniye boyunca sabit tutulmuştur. Bu nedenle cihaz, farklı akım koşullarında sabit kalmasını sağlayacak bir profil üzerine monte edilmiştir. Ölçümler, sıyırmalı ve nap akım koşullarında farklı debiler için tekrarlanmış ve toplam 14 veri seti elde edilmiştir. Her bir tekrarda farklı bir debi kullanılmış ve sonuçlar analiz edilmek üzere kaydedilmiştir. Böylece akım koşullarındaki değişimin ve taş düzeneğinin farklı ölçüm noktalarındaki çözünmüş oksijen miktarı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra, oksijen seviyelerindeki değişimin daha belirgin biçimde gözlenebilmesi amacıyla suyun başlangıçtaki çözünmüş oksijen seviyesi düşürülmüştür. Bu amaçla suya kobalt (III) klorür hekzahidrat ve sodyum sülfit (%97) eklenmiş ve deneyler aynı yöntem kullanılarak beş ölçüm seti için tekrarlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği boy kesiti



Şekil 2. Deney düzeneği boy kesit ve üstten görünüm çizimi



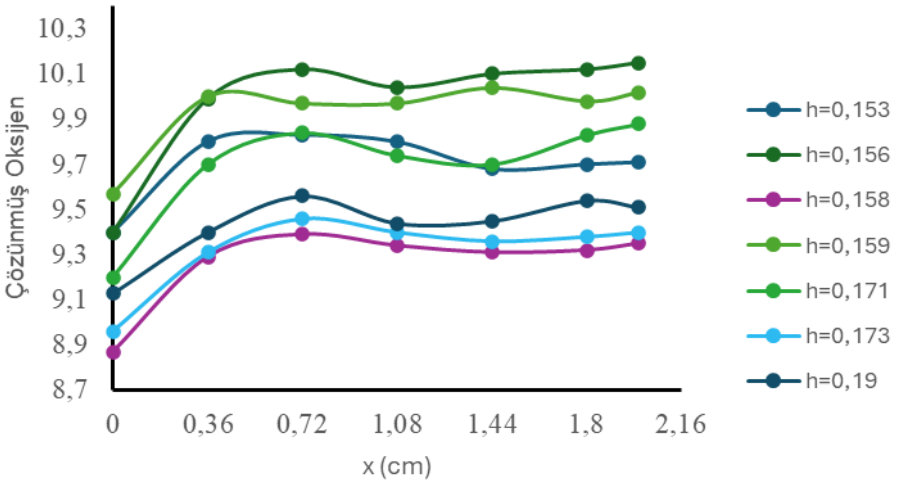
Şekil 3. Düzenek üzerinde oksijen ölçüm anı

3. Değerlendirme

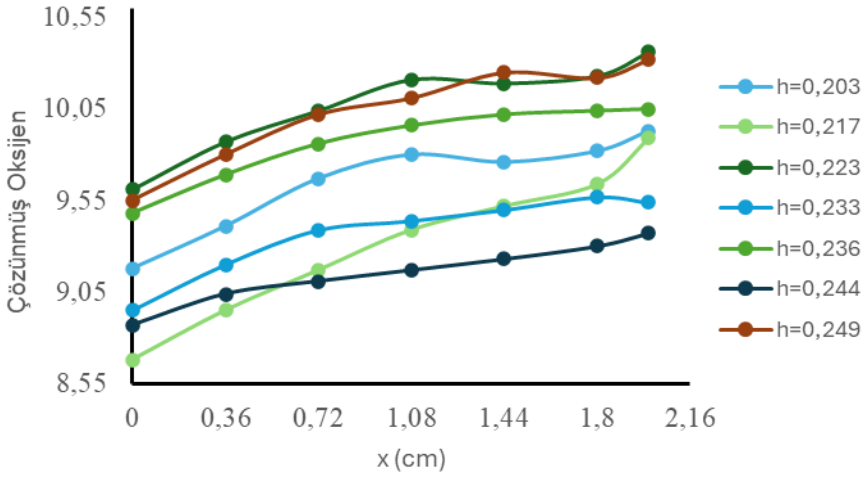
Tablo 1'de h_U ve h_D giriş ve çıkış su yükseklikleri, Q debiyi, T_W su sıcaklıklarını, C_S, C_U ve C_D doygunluk, memba ve mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını, E_{20} ve r_{20} oksijen transferine ilişkin değerlerini ve h, başlangıçtaki savak üzeri su derinliği ifade etmektedir.

Tablo 1. Deney matrisi

Deney	h	Q	Akım Rejimi	h_U	h_D	T_W	C_S	C_U	C_D	f	E_{20}	r_{20}
1	0,153	0,0053	Nap	0,29	0,02	16,4	10,5	9,4	9,71	0,925	0,39	1,64
2	0,156	0,0056	Nap	0,293	0,02	15,5	10,5	9,4	10,15	0,907	0,68	3,14
3	0,158	0,0059	Nap	0,293	0,022	17,7	10,5	8,87	9,35	0,952	0,32	1,47
4	0,159	0,0060	Nap	0,298	0,022	15,5	10,5	9,57	10,02	0,907	0,51	2,02
5	0,171	0,0077	Nap	0,302	0,024	15,1	10,5	9,2	9,88	0,899	0,52	2,1
6	0,173	0,0080	Nap	0,302	0,024	17,5	10,5	8,96	9,4	0,948	0,32	1,48
7	0,19	0,0110	Nap	0,313	0,025	17,4	10,5	9,13	9,51	0,946	0,31	1,46
8	0,203	0,0136	Sıyırmalı	0,326	0,029	19,2	10,5	9,18	9,93	0,983	0,15	1,17
9	0,217	0,0168	Sıyırmalı	0,332	0,029	19	10,5	8,68	9,89	0,979	0,51	2,14
10	0,223	0,0183	Sıyırmalı	0,338	0,033	19,2	10,5	9,61	10,36	0,983	0,59	2,44
11	0,233	0,0210	Sıyırmalı	0,346	0,03	19	10,5	8,95	9,54	0,979	0,84	3,07
12	0,236	0,0218	Sıyırmalı	0,346	0,035	19,2	10,5	9,48	10,05	0,983	0,24	1,32
13	0,244	0,0242	Sıyırmalı	0,355	0,04	19	10,5	8,87	9,37	0,979	0,56	2,27
14	0,249	0,0258	Sıyırmalı	0,36	0,04	19,2	10,5	9,55	10,32	0,983	0,31	1,44



Şekil 4. Nap akım rejiminde elde edilen ÇO miktarları



Şekil 5. Skimming akım rejiminde elde edilen ÇO miktarları

Doğal taş düzenlemesinin çözünmüş oksijen üzerindeki etkisi farklı akım koşullarında incelenmiş ve 0,72 m'ye kadar olan ölçüm noktalarında çözünmüş oksijen konsantrasyonunda artış gözlenmiştir. Düzenek üzerindeki her bir ölçüm noktasında eksiklik oranı (*r*) ve oksijen transfer verimi (*E*) hesaplanmış ve bu değerler Denklem 1–4 kullanılarak belirlenmiştir. Mansap kesimindeki ölçüm noktalarında elde edilen maksimum çözünmüş oksijen konsantrasyonu dikkate alınarak maksimum eksiklik oranı ve maksimum oksijen transfer verimi değerleri elde edilmiştir.

Çözünmüş oksijen kazanımının nap ve sıyrımlı akım koşullarında farklılık gösterdiği ve her iki akım türünün de çözünmüş oksijen artışına katkı sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, deneysel sonuçlar ve elde edilen grafikler, sıyrımlı akımında çözünmüş oksijen kazanımının nap akıma kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Nap akımında akımın taş yüzeyleriyle daha fazla temas etmesi ve taşların oluşturduğu geometrik düzensizlikleri takip ederek ilerlemesi, su–yüzey etkileşimini artırmakta ve buna bağlı olarak havadan suya oksijen transferini desteklemektedir. Sıyrımlı akımında ise debi ve akım hızının daha yüksek olmasıyla birlikte türbülans kinetik enerjisinin arttığı ve buna bağlı olarak gerçekleşen havalanmanın çözünmüş oksijen kazanımına daha fazla katkı sağladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, doğal taş düzenlemesinin her iki akım koşulunda da çözünmüş oksijen kazanımını artırdığını, ancak bu artışın sıyrımlı akımında daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır.

Son olarak kimyasal madde kullanılmadan gerçekleştirilen deneylerin ardından, suya kobalt (III) klorür hekzahidrat ve sodyum sülfit (%97) ilave edilerek deneyler tekrarlanmıştır. Kimyasal madde ilavesinin amacı, sudaki başlangıç çözünmüş oksijen konsantrasyonunu yaklaşık 10 mg/L'den 5 mg/L seviyesine

düşürerek oksijen artışlarının daha belirgin şekilde gözlenebilmesini sağlamaktır. Kimyasal madde ilavesi sonrasında çözünmüş oksijen değerlerinin daha hızlı arttığı, ancak ulaşılan nihai artışların oransal olarak kimyasal madde kullanılmadan gerçekleştirilen deneylerde gözlenen artışlarla uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4. Sonuçlar

Eğimli doğal taş düzenlemesinin akarsulardaki çözünmüş oksijen seviyeleri üzerindeki etkileri laboratuvar açık kanal düzeneğinde incelenmiştir. Suyun taş düzenlemesi üzerinden aktığı noktalarda türbülans kinetik enerjisinden kaynaklanan hız değişimleri gözlenmiş ve türbülansın neden olduğu havalanmayla birlikte sudaki çözünmüş oksijen seviyelerinin arttığı belirlenmiştir. Farklı akım koşulları altında kaydedilen deneysel veriler, oluşturulan doğal taş düzeneğinin memba ile mansap arasındaki çözünmüş oksijen miktarını artırarak akarsuyun oksijen içeriğinin artmasına katkı sağladığını ve benzer nitelikteki yapılara kıyasla habitatla daha uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, akarsulardaki çözünmüş oksijen seviyesinin doğal ortam korunarak artırılmasına yönelik uygulamalar açısından bilgi sağlamaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Kim, J., Walters, R. W. (2001). Oxygen transfer at low drop weirs. Journal of Environmental Engineering, 127(7), 604–610.

[2] Chanson, H., Qiao, G. L. (1994). Air Bubble Entrainment and Gas Transfer at Hydraulic Jumps. Research Report No. CE149, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.

[3] Chanson, H. (1990). Study of air demand on spillway aerator. Journal of Fluids Engineering, 112, 343–350.

[4] Toombes, L., Chanson, H. (2000). Air-water flow and gas transfer at aeration cascades: A comparative study of smooth and stepped chutes. International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, 77–84, Balkema Publishers.

[5] Cokgor, S., Kucukali, S. (2004). Oxygen transfer in flow around and over stones placed in a laboratory flume. Ecological Engineering, 23(3), 205–212.

[6] Gameson, A. L. H. (1957). Weirs and the aeration of rivers. Journal of the Institution of Water Engineers, 11, 477–490.

[7] Gulliver, J. S., Thene, J. R., Rindels, A. J. (1990). Indexing gas transfer in self-aerated flows. Journal of Environmental Engineering, 116(3), 503–523.

Design of Small Dams Kitaplarındaki Radyal-Kapaklı Savak Debisi Hesapları için Bilgisayar Programları

Tefaruk HAKTANIR*
Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 0000-0002-8111-4557
thaktan@erciyes.edu.tr

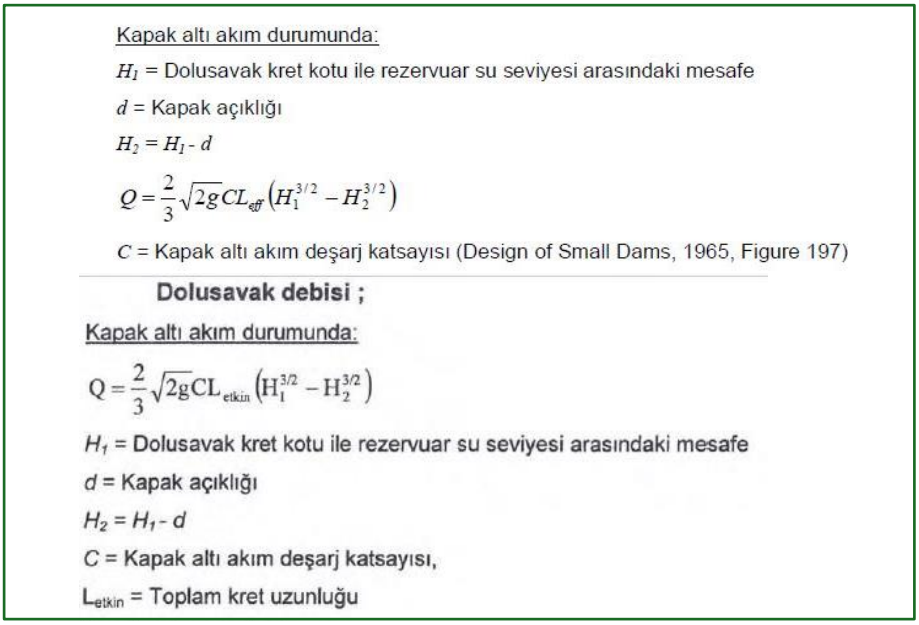
Anahtar Kelimeler: yarı açık radyal-kapaklı dolusavaktan geçen debi hesabı, yarı açık radyal-kapaklı dolusavaktan geçen debi için deneysel ve teorik değerler farkının hesabı

1. Amaç

Ülkemizdeki barajların hidrolik ünitelerinin tasarımı çoğunlukla *Design of Small Dams* kitabındaki yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Bu kitabının en son baskısı ve bundan önceki baskısı 1987 ve 1973 tarihlidir [1, 2]. Bu kitaplarda, Ogee profilli serbest (kapaksız) dolusavaktan geçen debinin hesabı için aynı yöntem verilmişken, radyal-kapaklı olandan, yarı açık kapak hali için farklı yöntemler sunulmuştur. 1973 baskılı *Design of Small Dams* kitabındaki yöntemin analitik ve nümerik olarak uygulanabilmesi 1987 baskılı kitaptakinden daha kolaydır. 1987 baskılı kitapta yöntemin uygulanması için USACE'nin yine 1987 tarihli 7 sayfalık ilgili raporuna atıf yapılmaktadır [3]. Debinin hesabı analitik olarak karmaşık olduğu için, anılan raporda yöntem, (1) Ogee savağın profilini içeren ve savak mansap yüzünün üç farklı çember parçalarıyla benzeştirildiği ölçekli bir şekil, (2) ilgili koordinatların hesabında gereken log-log ölçekli bir grafik üzerinde iki adet doğru içeren bir şekil, (3) savak geometrik verilerinin ve bu iki şekilden okunan değerlerin kullanıldığı, ilki 20 ikincisi 15 sütundan oluşan iki farklı çizelge üzerinde yapılan hesaplar gerektirmektedir. En nihayet ikinci çizelgenin son sütununda o kapak altı açıklığında savaklanan debi verilmektedir [3]. Bu yöntem ABD'deki John Doe Barajı örneği üzerinde açıklanmaktadır. *Design of Small Dams* kitabının 1987 ve 1973 baskılarında serbest Ogee savaktan geçen debinin hesabında gereken debi katsayısının belirlenmesinde dört farklı grafik ve detaylı hesap yöntemi verilmişken, kitabın 1987 baskısında, serbest savaktan daha karmaşık olan kapak altı (orifis) akımında debi hesabında detay verilmemiş, USACE yönteminin uygulanması önerilmiştir [2]. USACE'nin yöntemi ise birkaç grafiğin kullanıcı tarafından önceden hazırlanmasını, iki adet uzun tabloda adım adım geometrik ve trigonometrik ifadeler oluşturulmasını gerektirmektedir. Bu güçlükten dolayı olsa gerek, ülkemizde son yıllarda yapılan baraj tasarımlarında kapak altı akımın hesabı için 1987 baskılı *Design of Small Dams* yerine bir önceki 1973 baskılıdaki yöntem uygulanmaktadır. Buna iki adet örnek, kaynak verilmeden, ülkemizde iki adet barajın biri 2007 diğeri 2010 tarihli kati proje dokümanlarının ilgili kısımlarının kopyaları Şekil 1'de verilmektedir.

Yukarıda özetlenen güçlüğü kolaylaştırmak amacıyla bu bildirinin yazarı yarı açık radyal kapaklı Ogee savaktan geçen debinin hesabı için, yukarıda bahsedilen şekillerin ve tabloların hazırlanmasını gerektirmeyen, özgün analitik bir yöntem geliştirmiş ve bunu bir Fortran programı olarak kodlamıştır. Bu program, dolusavağın ilgili nicel bilgilerini içeren 13 satırdan oluşan giriş verisi dosyasını okuduktan sonra kullanıcı ile interaktif bir biçimde çalışmakta, kullanıcının klavyeden gireceği göl su kotu ve kapak altı açıklığı değerlerinde 1973 ve 1987 baskılı *Design of Small Dams* yöntemleriyle savak debisini hesaplayıp ekrana ve ayrıca çıktı dosyasına, iterasyon gerektiren ara hesap değerleri ile birlikte yazmaktadır. Kapak altı açıklığı için 99 verildiğinde serbest akım halinin debisini hesaplamaktadır. Bu programın yanısıra, bu bildirinin yazarı, aynı giriş verisi dosyasını okuduktan sonra, tasarım taşkın ötelenmesindeki maksimum göl seviyesi, faydalı hacim üst kotu ve bu ikisinin ortasındaki göl su kotu olmak üzere üç farklı göl su yüzü kotunda, metrik sistemde 0,5 m aralıklarda 0,5 metreden tam açık haline kadar, foot-pound-saniye sisteminde 1 ft aralıklarda 1 ft'tan tam açık haline kadar birçok kapak altı açıklığına karşılık 1973 ve 1987 baskılı *Design of Small Dams* yöntemleriyle savak debilerini hesaplayıp, oluşan üç farklı çizelgeyi çıktı dosyasına yazan bir program da geliştirmiştir. Bu yöntem ve bu programlar 2016 yılında yayınlanan bir makalede açıklanmış ve USACE'nin ilgili yayınındaki John Doe barajı ile birlikte Türkiye'den Kavşak, ABD'den Yellowtail, Hindistan'dan Bhakra barajları dolu savaklarına uygulanmıştır [4]. Bu programların yanısıra, bu bildirinin yazarı, laboratuvar modelinde veya gerçek bir baraj dolusavağı üzerinde ölçülmüş yarı açık savak debilerinden hesapladığı debi katsayısı değerlerini 1973 ve 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitaplarındaki yöntemlerin verdiği teorik debi katsayısı değerleri ile karşılaştıran ve bunların bağıl farklarını hesaplayan bir bilgisayar programı da geliştirmiştir. Bu program, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığınca tamamlanan beş adet model raporları, Seyhan Barajı dolusavağında 1959 yılında gerçek yapı üzerinde DSİ tarafından yapılmış ölçümlerin

sunulduğu rapor, ABD'de USBR ve USACE tarafından tamamlanmış benzer bir kaç model deney raporlarından alınan veriler üzerinde uygulanmış ve çalışmanın özeti 2021 yılında yayınlanan bir makalede sunulmuştur [5].



Kapak altı akım durumunda:

H_1 = Dolusavak kret kotu ile rezervuar su seviyesi arasındaki mesafe

d = Kapak açıklığı

$H_2 = H_1 - d$

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}CL_{eff}\left(H_1^{3/2} - H_2^{3/2}\right)$$

C = Kapak altı akım deşarj katsayısı (Design of Small Dams, 1965, Figure 197)

Dolusavak debisi ;

Kapak altı akım durumunda:

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}CL_{etkin}\left(H_1^{3/2} - H_2^{3/2}\right)$$

H_1 = Dolusavak kret kotu ile rezervuar su seviyesi arasındaki mesafe

d = Kapak açıklığı

$H_2 = H_1 - d$

C = Kapak altı akım deşarj katsayısı,

L_{etkin} = Toplam kret uzunluğu

Şekil 1. Ülkemizde iki adet barajın kati projesinde radyal-kapaklı ogee savaklarının yarı açık kapak hali için *Design of Small Dams* kitabının 1973 (ve 1965) baskısındaki yönteme göre yapılan tasarım hesaplarının ilgili kısımlarının kopyaları

Şekil 1'in üst ve alt kısmında bulunan debi ifadeleri aynı olmakla birlikte, bunlar farklı proje dokümanlarından alındığı için, üsttekinde "L_{eff}" alttakinde "L_{etkin}" olarak verilen sembollerin ikisi de dolusavağın etkin uzunluğunu göstermektedir. Bu uzunluk aşağıda tanımlandığı gibidir [1].

$$L_{eff} \equiv L_{etkin} = L_{net} - 2\times(Np\times kp + ka)\times H \quad (1)$$

Burada, L_{net}: dolu savağın net uzunluğu (= savağın brüt uzunluğu − savak köprüsü ayaklarının toplam genişliği), Np: ayak adedi, kp: 0, 0,01, 0,02 değerlerinden biri olarak tavsiye edilen ayak kayıp katsayısı, ka: 0, 0,1, 0,2 değerlerinden biri olarak tavsiye edilen yaklaşım kanalı giriş mahmuzu kayıp katsayısı, H: savak eşik kotuna göre net su yüküdür [1]. Şekil 1'in her iki kısmında *Design of Small Dams* kitabının 1973 baskısındaki yönteme göre radyal kapaklı ogee savağından yarı açık kapak durumunda geçen debinin analitik ifadesi bulunmaktadır. Aşağıda, aynı hal için *Design of Small Dams* kitabının 1987 baskısındaki ifade verilmektedir.

$$Q = C\times D\times L_{net}\times(2g\times H)^{1/2} \quad (2)$$

Burada, C: kapak alt noktasında kapak profiline teğet ile savak yüzünde kapak alt noktasına en yakın noktada savak profiline teğet arasındaki θ açısına bağlı olarak 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitabının "Figure 9-31."inden alınan debi katsayısı, D: kapak alt ucu ile savak yüzü arasındaki en kısa mesafe, H: kapak altı açıklığının orta noktasına göre net su yüküdür [2].

Bu bildirinin birinci amacı, yukarıda özetlenen bu üç bilgisayar programından ilk ikisinin uygulamasını Yamula Barajı dolusavağı örneğinde sunmaktır. İkinci amaç, üçüncü programın uygulamasını DSİ TAKK Dairesi Başkanlığınca tamamlanmış olan 'YUSUFELİ BARAJI VE HES PROJESİ DOLUSAVAK MODEL ÇALIŞMASI ARA RAPORU I'den [6] elde edilen ölçülmüş savak debilerinden hesaplanan katsayılar ile 1973 ve 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitaplarındaki teorik yöntemlerle hesaplanmış olanları karşılaştırarak sunmaktır. Arzu eden herkese, anılan bu üç programın kaynak kodları ve EXE dosyaları, birkaç örnek giriş datası dosyaları ile birlikte verilecektir.

Bu bildiride dolusavak laboratuvar model deneylerinde ölçek etkisinden dolayı oluşabilecek nicel hataları irdelemek amaçlanmamıştır. Açık kanal akımı olduğundan dolayı, ülkemizde DSİ TAKK Dairesinde ve

ABD'de USBR ve USACE'nin ilgili laboratuvar tesislerinde ve Dünyanın diğer ülkelerinde dolusavak model çalışmalarında Froude Benzeşimi prensibi ile modelde ve prototipte oluşacak kuvvetlerin oransal benzeşimi yapılmakta, model üzerinde ölçülen uzunluk, hız, debi gibi büyüklükler prototip üzerine ilgili oranlar kullanılarak yansıtılmaktadır.

Yukarıda özetlenen klasik yöntemlerin yanısıra, 2026'da yayınlanan makalelerinde, yarı açık radyal kapaklı savaktan geçen debinin hesabı için deneysel çalışmaların ve CFD (Computational Fluid Dynamics) analizlerin birlikte değerlendirilmesi ile Aydın ve arkadaşları yarı açık kapak durumunda debinin hesabı için boyutsuz parametrelere bağlı olarak belirlenen iki adet katsayı içeren bir formül geliştirmiştir [7]. Makale 2026'da yayınlandığı için bu yeni yöntemin irdelenmesi bu bildiri kapsamında yapılamamıştır. Yakın bir zamanda, ölçümü olan radyal-kapaklı savaklar için *Design of Small Dams* yöntemleri ile karşılaştırılması yararlı olacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Materyal olarak, radyal-kapaklı Ogee profilli dolusavağı olan ülkemizde birkaç barajın ve internette genel kullanıma açık olarak sunulmuş birçok barajın verileri kullanılmıştır. Programların gerektirdiği giriş verisi dosyaları text dosyaları olup NOTEPAD editör programı ile hazırlanacaktır. Anılan ilk iki programın analitik modeli ve Türkiye'de bir, ABD'de iki, Hindistan'da bir baraj dolusavakları üzerinde uygulamaları 'Kaynaklar' kısmındaki [4] nolu makalede, üçüncü programın, Türkiye'de altı laboratuvar modeli ve bir gerçek baraj dolusavağında, ABD'de 15 laboratuvar modeli üzerinde uygulaması da [5] nolu makalede açıklanmaktadır.

Bu bildiride, kapakların yarı açık durumu için savaklanan debinin hesabı vurgulanmakta ise de anılan bilgisayar programları, kapakların tam açık halinde savaktan geçen debiyi de hesaplamaktadır. [2] nolu kaynaktaki "Figure 9-31." [3] nolu kaynaktaki "HYDRAULIC DESIGN CHART 311-1"in aynısıdır. Anılan programlarda, ogee savağın tam açık halinde debi katsayıları için *Design of Small Dams* kitabının 1973 ve 1987 baskılarında verilen şekillerdeki eğrilere tarafımızdan uygun polinomlar uydurulmuştur. Bunların analitik ifadeleri bu üç programın kaynak kodlarında görülebilir.

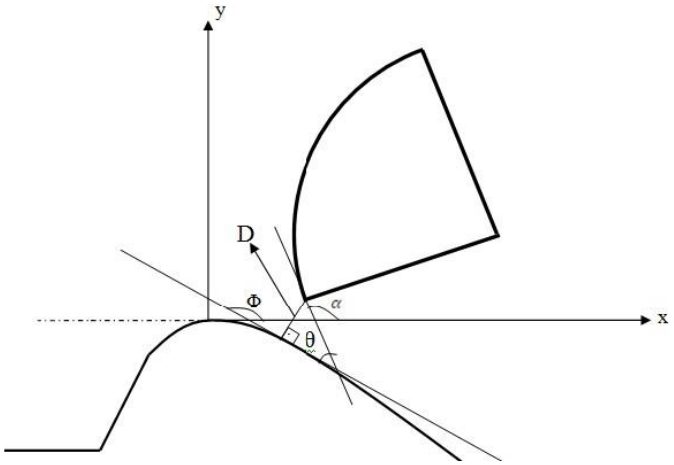
3. Değerlendirme

Çizelge 1'de anılan birinci bilgisayar programının Yamula Barajı dolusavağı için [8] nolu kaynaktan elde edilen giriş verisi dosyası sunulmaktadır. Bu program kullanıcı ile interaktif bir biçimde çalışmakta, savak eşik kotu ile maksimum göl kotu arasında herhangi bir göl su kotunda ve herhangi bir kapak altı açıklığında savaktan geçen debiyi hesaplamaktadır. Programın çalışması esnasında kullanıcı tarafından girilen veriler ve ara hesapları ile birlikte hesaplanan debiler monitör ekranında verilmekte ve aynı zamanda çıktı dosyasına da kaydedilmektedir. Her bir hal için hesap yapıldıktan sonra program kullanıcıya devam edip etmeme arzusunu sormakta, "evet" yanıtı sonrası başka bir kombinezon için debiler hesaplanmaktadır. Çizelge 2'de anılan birinci bilgisayar programının Yamula Barajı dolusavağı için çalıştırılmış birkaç kombinezonun çıktı dosyasının kopyası, Çizelge 3'te de ikinci programın yine Yamula Barajı dolusavağı için çalıştırılmış çıktı dosyasının kopyası verilmektedir. Çizelge 2'deki ALFA (α), FİY (ϕ), THETA (θ) açıları ve Çizelge 3'teki "theta" (θ) açısı aşağıdaki Şekil 2'de şematik olarak gösterilmektedir.

Çizelge 1. Yamula Barajı dolusavağı için [8] nolu kaynaktan elde edilen giriş verisi dosyasının kopyası

COMPUTATION OF SPILLWAY DISCHARGES FROM YAMULA DAM FOR PARTIAL AND FULL
GATE OPENINGS BY 1973 and 1987 EDNS OF THE BOOK: DESIGN OF SMALL DAMS
42. 45 net spillway width (m), angle with vertical of upstream face
6.0 4.93 sill height (m), elvn diffr between upstrm and downstr toes
1086.0 16.5 1100. spillway apex elvtn (m), design H (m), active st. (m)
3 0.01 0.10 # of piers, pier contr loss coef, abutment contr loss coeff
100. 50. 1 0.016 0.1 length, width, z, Manning n, contr coeff
1 discharge for fully open gates is computed by the method in DSD
1 methods in 1973 and 1987 edtns of DSD are used for partial openings
18.0 8.2 radius of radial gate (m), radius of 1st upstream circle (m)
0.54 1.76 K and n coefficients of downstream crest curve
1093.0 1085.85 1100.50 elvns of trunnion (m), gate seat (m), gate top

9.81 gravitational acceleration (m/s^2)



Şekil 2. Radyal-kapaklı Ogee savağının yarı açık kapak hali için *Design of Small Dams* kitabının 1987 baskısındaki yönteme göre α, ϕ, θ açılarının ve 2 nolu eşitlikteki D açıklığın şematik tanımları

Çizelge 2. Birinci bilgisayar programının Yamula Barajı dolusavağı için çalıştırılmış birkaç kombinezonun çıktı dosyasının kopyası

```
 COMPUTATION OF SPILLWAY DISCHARGES FROM YAMULA DAM FOR PARTIAL AND FULL
 GATE OPENINGS BY 1973 and 1987 EDTNS OF THE BOOK: DESIGN OF SMALL DAMS
 All lengths are in meters and discharges are in m3/s
 As the origin of the Cartesian coordinates is at the spillway apex,
 the gate trunnion coordinates (y, x) are:   7.000  18.140
 the gate seat coordinates     (y, x) are:  -0.150   1.621
 ---------------------------------------------------------------------
 Lake water surface elevation =  1087.80 and gate opening =    .100
 Intermediate values for Orifice Flow Eqtn in DSD (1987):
 Coordinates of gate lip of partially-opened gate  (y, x):    .100   1.515
 Coordinates of point on crest closest to gate lip (y, x):  -0.128   1.480
 Shortest distance between gate lip and crest curve:   .230
ALFA = 112.54°  FIY = 171.35°  THETA =  58.81°
Discharge coefficient in Orifice Flow Eqtn, C = 0.6724
---------------------------------------------------------------------
Iterations for true H1 and Q by DSD (1987):
1 As discharge =    38.83, the total head loss =   .000
 2 As discharge =    38.83, the total head loss =   .000
Head to the center of the orifice, H =  1.814
---------------------------------------------------------------------
Iterations for true H1 and Q by DSD (1973):
 1 As discharge =    40.00, the total head loss =   .000
 2 As discharge =    40.00, the total head loss =   .000
```

```
Intermediate values for Low-head Orifice Eqtn in DSD (1973):
H1 w.r.t. spillway apex elevation              =  1.800  and  d =   .100
H1 w.r.t. point on crest curve closest to gate lip=  1.928  and  d =   .228
As d/H1 = 0.1182,
discharge coefficient in Low-head Orifice Eqtn, C = 0.7091
Spillway discharge by DSD (1973), Q(1973)     =     40.0
Spillway discharge by DSD (1987), Q(1987)     =     38.8
Relative difference of Q(1973) w.r.t. Q(1987) =    3 %
--------------------------------------------------------------------------------
Lake water surface elevation =  1088.90 and gate opening =   1.250
Intermediate values for Orifice Flow Eqtn in DSD (1987):
Coordinates of gate lip of partially-opened gate  (y, x):   1.250   1.083
Coordinates of point on crest closest to gate lip (y, x):  -0.058    .942
Shortest distance between gate lip and crest curve:  1.315
ALFA = 108.63°  FIY = 173.84°  THETA =  65.22°
Discharge coefficient in Orifice Flow Eqtn, C = 0.6754
--------------------------------------------------------------------------------
Iterations for true H1 and Q by DSD (1987):
 1 As discharge =   250.85, the total head loss =   .001
 2 As discharge =   250.79, the total head loss =   .001
Head to the center of the orifice, H =  2.303
--------------------------------------------------------------------------------
Iterations for true H1 and Q by DSD (1973):
 1 As discharge =   243.10, the total head loss =   .001
 2 As discharge =   243.04, the total head loss =   .001
Intermediate values for Low-head Orifice Eqtn in DSD (1973):
H1 w.r.t. spillway apex elevation              =  2.899  and  d =  1.250
H1 w.r.t. point on crest curve closest to gate lip=  2.957  and  d =  1.308
As d/H1 = 0.4423,
discharge coefficient in Low-head Orifice Eqtn, C = 0.6729

Spillway discharge by DSD (1973), Q(1973)     =    243.0
Spillway discharge by DSD (1987), Q(1987)     =    250.8
Relative difference of Q(1973) w.r.t. Q(1987) =   -3 %
--------------------------------------------------------------------------------
Lake water surface elevation =  1099.50 and gate opening =   5.600

Intermediate values for Orifice Flow Eqtn in DSD (1987):
Coordinates of gate lip of partially-opened gate  (y, x):   5.600    .194
Coordinates of point on crest closest to gate lip (y, x):  -0.001    .091
Shortest distance between gate lip and crest curve:  5.602
ALFA =  94.46°  FIY = 178.95°  THETA =  84.49°
Discharge coefficient in Orifice Flow Eqtn, C = 0.6942
--------------------------------------------------------------------------------
Iterations for true H1 and Q by DSD (1987):
 1 As discharge =  2366.48, the total head loss =   .016
2 As discharge =  2364.76, the total head loss =   .016
 3 As discharge =  2364.76, the total head loss =   .016
Head to the center of the orifice, H = 10.685
--------------------------------------------------------------------------------
Iterations for true H1 and Q by DSD (1973):
 1 As discharge =  2104.89, the total head loss =   .012
 2 As discharge =  2103.72, the total head loss =   .012

Intermediate values for Low-head Orifice Eqtn in DSD (1973):
H1 w.r.t. spillway apex elevation              = 13.488  and  d =  5.600
```

```
H1 w.r.t. point on crest curve closest to gate lip= 13.489  and  d =  5.601
As d/H1 = 0.4152,
discharge coefficient in Low-head Orifice Eqtn, C = 0.6758

Spillway discharge by DSD (1973), Q(1973)     =   2103.7
Spillway discharge by DSD (1987), Q(1987)     =   2364.8
Relative difference of Q(1973) w.r.t. Q(1987) =  -11 %
--------------------------------------------------------------------------------
Lake water surface elevation =  1099.50 and gates are fully open.

Iterations for true H1 and Q by DSD (1973):
P/Ho =   .3636  Co = 2.0717 , mya = 45°  Cmya/Co = 1.0209
H1/Ho =  .8182  Ch/Co =  .9758 , (H1+P+dP)/H1 = 1.8096  Cap/Co = 1.0000
Cnet = 2.0640
 1 As discharge =  3940.54, the total head loss =   .043
P/Ho =   .3636  Co = 2.0717 , mya = 45°  Cmya/Co = 1.0209
H1/Ho =  .8156  Ch/Co =  .9754 , (H1+P+dP)/H1 = 1.8122  Cap/Co = 1.0000
Cnet = 2.0632
 2 As discharge =  3921.29, the total head loss =   .043
P/Ho =   .3636  Co = 2.0717 , mya = 45°  Cmya/Co = 1.0209
H1/Ho =  .8156  Ch/Co =  .9754 , (H1+P+dP)/H1 = 1.8122  Cap/Co = 1.0000
Cnet = 2.0632
 3 As discharge =  3921.48, the total head loss =   .043
P/Ho =   .3636  Co = 2.0717 , mya = 45°  Cmya/Co = 1.0209
H1/Ho =  .8156  Ch/Co =  .9754 , (H1+P+dP)/H1 = 1.8122  Cap/Co = 1.0000
Cnet = 2.0632

As H1 = 13.46 and the gates are fully open,
the spillway discharge =   3921.5
```

Çizelge 3. İkinci programın Yamula Barajı dolusavağı için çalıştırılmış çıktı dosyasının kopyası

```
COMPUTATION OF SPILLWAY DISCHARGES FROM YAMULA DAM FOR PARTIAL AND FULL
GATE OPENINGS BY 1973 and 1987 EDITIONS OF THE BOOK: DESIGN OF SMALL DAMS
All lengths are in m and discharges are in m3/s

As the origin of the Cartesian coordinates is at the spillway apex,
the gate trunnion coordinates (y, x) are:   7.00   18.14
the gate seat coordinates     (y, x) are:  -0.15    1.62

As maximum lake water surface elevation is: 1102.50
spillway apex elevation is              : 1086.00
and actual lake water surface elevation is: 1100.00  (H1 = 14.00)
variations of angle theta, orifice coefficient, and discharges by
1973 & 1987 edtns of DESIGN OF SMALL DAMS versus vertical gate opening:

dsa(1)  dbo(2)  theta  Corifice  Q-1973   Q-1987  Rel.Diff.
   .2    .32    59    0.673      151      151      0 %
   .5    .60    61    0.673      276      281     -1 %
  1.0   1.07    64    0.675      480      497     -3 %
  1.5   1.55    67    0.676      680      713     -4 %
  2.0   2.03    69    0.678      879      928     -5 %
  2.5   2.52    72    0.680     1073     1141     -6 %
  3.0   3.01    74    0.681     1261     1353     -6 %
  3.5   3.51    76    0.684     1445     1563     -7 %
  4.0   4.01    78    0.686     1623     1771     -8 %
  4.5   4.50    80    0.688     1795     1977     -9 %
  5.0   5.00    82    0.691     1961     2180    -10 %
  5.5   5.50    84    0.694     2120     2380    -10 %
  6.0   6.00    86    0.697     2272     2578    -11 %
  6.5   6.50    88    0.700     2417     2774    -12 %
```

7.0	7.00	89	0.704	2556	2966	-13 %
7.5	7.50	91	0.707	2687	3153	-14 %
8.0	8.00	92	0.710	2811	3336	-15 %
8.5	8.50	94	0.713	2928	3517	-16 %
9.0	9.00	95	0.717	3037	3694	-17 %
9.5	9.50	97	0.721	3139	3866	-18 %
10.0	10.00	98	0.724	3233	4034	-19 %
11.0	11.00	101	0.731	3396	4356	-22 %
12.0	12.01	104	0.735	3524	4634	-23 %
Fully open		---	-----	4146	4146	----

(1): vertical gate opening w.r.t. spillway apex elevation
(2): vertical gate opening w.r.t. bottom of orifice

As maximum lake water surface elevation is: 1102.50
spillway apex elevation is : 1086.00
and actual lake water surface elevation is: 1101.25 (H1 = 15.25)
variations of angle theta, orifice coefficient, and discharges by
1973 & 1987 edtns of DESIGN OF SMALL DAMS versus vertical gate opening:

dsa(1)	dbo(2)	theta	Corifice	Q-1973	Q-1987	Rel.Diff.
1.0	1.07	64	0.675	499	520	-4 %
1.5	1.55	67	0.676	707	746	-5 %
2.0	2.03	69	0.678	914	971	-5 %
2.5	2.52	72	0.680	1118	1196	-6 %
3.0	3.01	74	0.681	1314	1419	-7 %
3.5	3.51	76	0.684	1509	1641	-8 %
4.0	4.01	78	0.686	1698	1861	-8 %
4.5	4.50	80	0.688	1881	2080	-9 %
5.0	5.00	82	0.691	2057	2296	-10 %
5.5	5.50	84	0.694	2228	2509	-11 %
6.0	6.00	86	0.697	2392	2721	-12 %
6.5	6.50	88	0.700	2550	2932	-13 %
7.0	7.00	89	0.704	2701	3138	-13 %
7.5	7.50	91	0.707	2846	3341	-14 %
8.0	8.00	92	0.710	2984	3540	-15 %
8.5	8.50	94	0.713	3115	3736	-16 %
9.0	9.00	95	0.717	3239	3930	-17 %
9.5	9.50	97	0.721	3356	4121	-18 %
10.0	10.00	98	0.724	3466	4307	-19 %
11.0	11.00	101	0.731	3665	4667	-21 %
12.0	12.01	104	0.735	3832	4985	-23 %
13.0	13.01	106	0.735	3966	5256	-24 %
14.0	14.02	109	0.735	4061	5503	-26 %
Fully open		---	-----	4723	4723	----

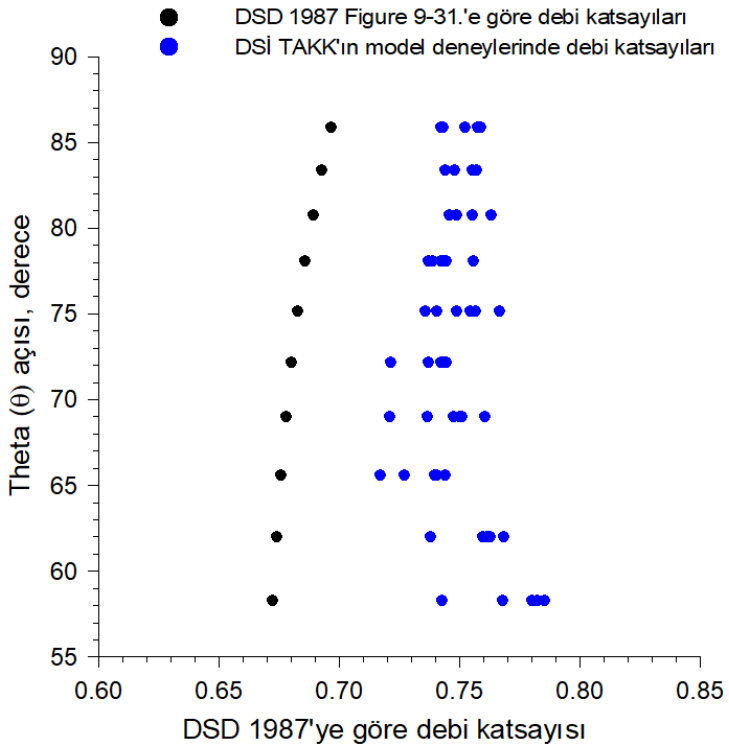
(1): vertical gate opening w.r.t. spillway apex elevation
(2): vertical gate opening w.r.t. bottom of orifice
As maximum lake water surface elevation is: 1102.50
spillway apex elevation is : 1086.00
and actual lake water surface elevation is: 1102.50 (H1 = 16.50)
variations of angle theta, orifice coefficient, and discharges by
1973 & 1987 edtns of DESIGN OF SMALL DAMS versus vertical gate opening:

dsa(1)	dbo(2)	theta	Corifice	Q-1973	Q-1987	Rel.Diff.
2.0	2.03	69	0.678	947	1013	-6 %
2.5	2.52	72	0.680	1159	1248	-7 %
3.0	3.01	74	0.681	1366	1482	-7 %
3.5	3.51	76	0.684	1569	1715	-8 %
4.0	4.01	78	0.686	1767	1947	-9 %
4.5	4.50	80	0.688	1959	2177	-10 %
5.0	5.00	82	0.691	2146	2406	-10 %
5.5	5.50	84	0.694	2328	2631	-11 %
6.0	6.00	86	0.697	2503	2857	-12 %
6.5	6.50	88	0.700	2672	3081	-13 %

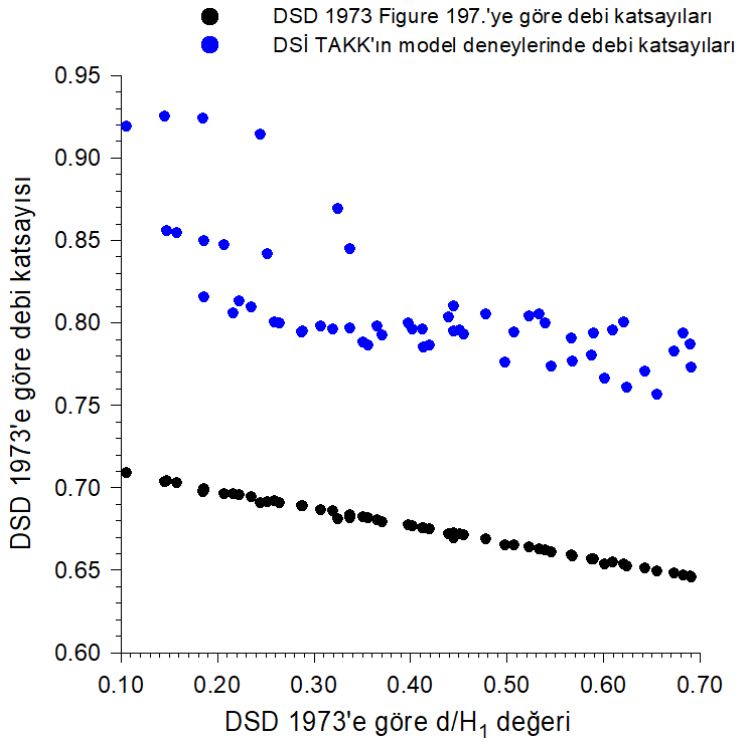
7.0	7.00	89	0.704	2835	3301	-14 %
7.5	7.50	91	0.707	2991	3518	-14 %
8.0	8.00	92	0.710	3142	3732	-15 %
8.5	8.50	94	0.713	3286	3944	-16 %
9.0	9.00	95	0.717	3423	4153	-17 %
9.5	9.50	97	0.721	3555	4360	-18 %
10.0	10.00	98	0.724	3679	4563	-19 %
11.0	11.00	101	0.731	3908	4959	-21 %
12.0	12.01	104	0.735	4109	5313	-22 %
13.0	13.01	106	0.735	4281	5621	-23 %
14.0	14.02	109	0.735	4421	5908	-25 %
15.0	15.03	111	0.735	4525	6172	-26 %
Fully open		---	-----	5269	5269	----

(1): vertical gate opening w.r.t. spillway apex elevation
(2): vertical gate opening w.r.t. bottom of orifice

Şekil 3'te üçüncü bilgisayar programının koşturulmasından elde edilen, Yusufeli Barajı dolusavağı için DSİ TAKK Dairesince yapılan model deneylerindeki θ açılarına karşılık gelen 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitabındaki Figure 9-31.de verilen teorik debi katsayıları ile deneylerde ölçülmüş debilerden hesaplanan debi katsayıları görülmektedir. Şekil 4'te yine üçüncü bilgisayar programının verdiği, Yusufeli Barajı dolusavağı için DSİ TAKK Dairesince yapılan model deneylerindeki d/H_1 değerlerine karşılık gelen 1973 baskılı *Design of Small Dams* kitabındaki Figure 197.de verilen teorik debi katsayıları ile deney ölçümlerinden elde edilen debi katsayıları görülmektedir. Şekil 4'ün apsis eksenindeki d/H_1 teriminin d ve H_1 büyüklükleri Şekil 1'de tanımlandığı gibidir. Çizelge 4'te üçüncü bilgisayar programının Yusufeli Barajı dolusavağı için DSİ TAKK Dairesi Başkalığınca yapılan çalışmanın raporundaki [6] birçok kombinezonda ölçülmüş savak debilerinden hesaplanan katsayılar ile 1973 ve 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitaplarındaki teorik yöntemlerle hesaplanmış olanların karşılaştırmasını veren çıktı dosyasının kopyası sunulmaktadır.



Şekil 3. Yusufeli Barajı dolusavağı için DSİ TAKK Dairesi Başkanlığınca yapılan model deneylerindeki θ açılarına karşılık gelen 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitabında Figure 9-31'de verilen teorik debi katsayıları ile deney ölçümlerinden elde edilen debi katsayıları



Şekil 4. Yusufeli Barajı dolusavağı için DSİ TAKK Dairesi Başkanlığınca yapılan model deneylerindeki d/H_1 değerlerine karşılık gelen 1973 baskılı *Design of Small Dams* kitabında Figure 197.'de verilen teorik debi katsayıları ile deney ölçümlerinden elde edilen debi katsayıları

Çizelge 4. Yusufeli Barajı dolusavağı için DSİ TAKK Dairesi Başkanlığınca yapılan deneysel çalışmanın raporundaki [6] birçok kombinezon için ölçülmüş savak debileri katsayıları ile 1973 ve 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitaplarındaki teorik yöntemlerle hesaplanmış olanların karşılaştırmasını veren çıktı dosyasının kopyası

SPILLWAY DISCHARGE COEEFICIENTS FOR THE FULLY-OPEN AND PARTIALLY-OPEN RADIAL-GATED SPILLWAY OF YUSUFELİ DAM BY 1973 AND 1987 EDTNS OF D.S.D

All lengths are in m and discharges are in m3/s

Gate trunnion coordinates (y, x): 5.79 13.30
Gate seat coordinates (y, x): -0.29 2.04

The discharge coefficients and their relative differences for
the free flow case:

Hmeasured	Qmeasured	C by DSD(*)	Cexperiment	RD of Cs
1.98	262.	1.810	1.653	10 %
2.42	376.	1.833	1.758	4 %
2.90	505.	1.857	1.806	3 %
3.52	697.	1.886	1.869	1 %
4.10	893.	1.912	1.910	0 %
4.89	1211.	1.944	1.998	-3 %
5.61	1519.	1.973	2.042	-3 %
6.27	1822.	1.997	2.081	-4 %
7.53	2462.	2.039	2.151	-5 %
8.03	2737.	2.054	2.178	-6 %
8.68	3103.	2.074	2.202	-6 %
9.70	3717.	2.102	2.246	-6 %
10.64	4291.	2.126	2.269	-6 %

11.77 5085. 2.153 2.323 -7 %

(*): In 'Spillways' chapter of the book: Design of Small Dams

The discharge coefficients and their relative differences for
the case of flow under partially-opened gates:

Hmsrd	dmsrd	Qmsrd	C-73	Cexpt-73	RD-C-73	C-87	Cexpt-87	RD-C-87
3.08	1.0	350.	.6812	.8692	-22 %	.6722	.7424	-9 %
4.10	1.0	433.	.6909	.9144	-24 %	.6722	.7801	-14 %
5.42	1.0	508.	.6980	.9241	-24 %	.6722	.7853	-14 %
6.90	1.0	576.	.7036	.9256	-24 %	.6722	.7820	-14 %
9.52	1.0	671.	.7092	.9194	-23 %	.6722	.7676	-12 %
3.38	1.5	492.	.6700	.8105	-17 %	.6738	.7378	-9 %
4.46	1.5	607.	.6821	.8449	-19 %	.6738	.7681	-12 %
5.96	1.5	712.	.6917	.8418	-18 %	.6738	.7615	-12 %
7.28	1.5	798.	.6968	.8475	-18 %	.6738	.7625	-12 %
8.09	1.5	845.	.6986	.8501	-18 %	.6738	.7620	-12 %
9.52	1.5	922.	.7031	.8550	-18 %	.6738	.7613	-12 %
10.22	1.5	956.	.7045	.8558	-18 %	.6738	.7595	-11 %
3.33	2.0	582.	.6541	.7668	-15 %	.6757	.7167	-6 %
4.02	2.0	671.	.6654	.7764	-14 %	.6757	.7267	-7 %
5.40	2.0	823.	.6794	.7925	-14 %	.6757	.7397	-9 %
7.57	2.0	1005.	.6910	.8003	-14 %	.6757	.7405	-9 %
9.26	2.0	1126.	.6963	.8059	-14 %	.6757	.7399	-9 %
10.75	2.0	1229.	.6994	.8160	-14 %	.6757	.7438	-9 %
4.01	2.5	782.	.6525	.7611	-14 %	.6779	.7210	-6 %
4.41	2.5	854.	.6586	.7768	-15 %	.6779	.7364	-8 %
5.70	2.5	1046.	.6725	.8039	-16 %	.6779	.7605	-11 %
8.16	2.5	1280.	.6868	.7979	-14 %	.6779	.7475	-9 %
10.67	2.5	1499.	.6946	.8099	-14 %	.6779	.7499	-10 %
11.27	2.5	1548.	.6960	.8133	-14 %	.6779	.7508	-10 %
4.58	3.0	982.	.6495	.7570	-14 %	.6801	.7211	-6 %
5.50	3.0	1143.	.6613	.7736	-15 %	.6801	.7371	-8 %
7.26	3.0	1385.	.6756	.7853	-14 %	.6801	.7443	-9 %
8.44	3.0	1515.	.6818	.7868	-13 %	.6801	.7422	-8 %
10.47	3.0	1723.	.6892	.7944	-13 %	.6801	.7424	-8 %
11.58	3.0	1830.	.6921	.8004	-14 %	.6801	.7440	-9 %
5.45	3.5	1273.	.6512	.7706	-16 %	.6827	.7355	-7 %
6.19	3.5	1430.	.6594	.7908	-17 %	.6827	.7545	-10 %
7.33	3.5	1630.	.6689	.8057	-17 %	.6827	.7664	-11 %
8.81	3.5	1809.	.6775	.8000	-15 %	.6827	.7566	-10 %
10.37	3.5	1978.	.6839	.7973	-14 %	.6827	.7488	-9 %
12.17	3.5	2150.	.6892	.7950	-13 %	.6827	.7402	-8 %
5.79	4.0	1473.	.6462	.7730	-16 %	.6857	.7371	-7 %
6.81	4.0	1674.	.6573	.7804	-16 %	.6857	.7441	-8 %
7.89	4.0	1881.	.6658	.7947	-16 %	.6857	.7556	-9 %
9.53	4.0	2091.	.6752	.7866	-14 %	.6857	.7432	-8 %
11.41	4.0	2324.	.6825	.7886	-13 %	.6857	.7388	-7 %
12.52	4.0	2467.	.6859	.7961	-14 %	.6857	.7419	-8 %
6.69	4.5	1809.	.6482	.7829	-17 %	.6891	.7454	-8 %
7.63	4.5	2017.	.6571	.7939	-17 %	.6891	.7552	-9 %
8.61	4.5	2215.	.6642	.8041	-17 %	.6891	.7629	-10 %
10.91	4.5	2536.	.6760	.7964	-15 %	.6891	.7487	-8 %
12.33	4.5	2725.	.6810	.7984	-15 %	.6891	.7457	-8 %
7.25	5.0	2082.	.6464	.7873	-18 %	.6926	.7476	-7 %

8.21	5.0	2305.	.6550	.7957	-18 %	.6926	.7550	-8 %
9.28	5.0	2518.	.6625	.7999	-17 %	.6926	.7568	-8 %
11.09	5.0	2800.	.6719	.7958	-16 %	.6926	.7477	-7 %
12.45	5.0	2997.	.6772	.7965	-15 %	.6926	.7438	-7 %
8.06	5.5	2434.	.6472	.7942	-19 %	.6966	.7519	-7 %
8.87	5.5	2631.	.6539	.8006	-18 %	.6966	.7573	-8 %
10.33	5.5	2933.	.6632	.8053	-18 %	.6966	.7585	-8 %
12.09	5.5	3185.	.6715	.7934	-15 %	.6966	.7420	-6 %
12.37	5.5	3236.	.6726	.7954	-15 %	.6966	.7429	-6 %

4. Sonuçlar

Analitik karmaşıklığından dolayı, ülkemizde yapılan birçok baraj tasarımında, yarı açık durumda radyal-kapaklı Ogee savaktan geçen debinin hesabı, *Design of Small Dams* kitabının son baskısı yerine bir önceki baskısında verilen yöntemle yapılmaktadır. Bu bildiride sunulanlardan ilk iki bilgisayar programı her iki yönteme göre savak debisini hesaplamaktadır. Üçüncü bilgisayar programı, laboratuvar model deneyleri yapılmış bir barajın dolusavağının model üzerinde ölçülen değerlerden hesaplananlar ile her iki yönteme göre belirlenen savak debi katsayılarını ve bunların bağıl farklarını hesaplamaktadır. Ülkemizde ve Dünyada laboratuvar modelleri üzerinde yapılan benzeri deneylerde, prototip ve model arasında Froude Sayısı Benzerliliği prensibine göre modelde ölçülmüş değerler benzerliliğin gerektirdiği oranlarda gerçek yapı için de kabul edilmektedir.

Burada sunulan iki örnekte, ve [5] nolu yayındaki toplam 21 faklı baraj örneğinde, *Design of Small Dams* kitabının 1973 ve 1987 baskılarındaki yöntemle hesaplanan ogee savağından serbest halde geçen debi ile model deneylerinde ölçülen debiler arasındaki bağıl farklar çoğunlukla %5'ten küçüktür.

Bu bildiride ülkemizdeki Yamula ve Yusufeli Barajları üzerinde verilen örnekte ve birkaç benzeri örnekte, yarı açık kapak durumunda savaklanan debi için *Design of Small Dams* kitabının 1987 baskısındaki yöntemle hesaplanan değerin 1973 baskısındaki yöntemle hesaplanandan daima daha fazla olduğu gözlenmiştir. Dikkat çeken diğer bir husus, tam açık haline yakın büyük kapak altı açıklıklarda 1987 yöntemi, aynı su yükünde tam açık durumundaki debiden daha büyük bir debi hesaplamaktadır. Yamula Barajı örneğinde bu durum Çizelge-3'teki tabloların son satırlarında da görülmektedir. Burada verilmeyen diğer barajlarda da benzer değerler gözlenmiştir. Mantıken, aynı su yükü altında yarı açık kapak altından geçen akım daralmış bir alandan geçeceği, serbest akım ise doğrudan savaklanacağı için, aynı su yükü altında yarı açık kapak halindeki debinin serbest durumdaki debiden daha küçük olması beklenir. 1987 yönteminde bunun tersi bir durum oluşması 1987 yöntemi hakkında kuşku vericidir. Bunun bir nedeni, [3] nolu kaynaktaki "HYDRAULIC DESIGN CHART 311-1"in aynısı olan 1987 baskılı *Design of Small Dams* kitabının "Figure 9-31."i olabilir. [3] nolu kaynaktaki anılan şeklin yanında, bu eğrinin sadece 3 adet model deneyi ve 3 adet gerçek baraj savağı üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilen katsayıların ortalaması olarak çizildiği belirtilmektedir. [3] nolu kaynaktaki anılan şekil incelendiğinde, bu 3 model ve 3 prototip üzerindeki ölçümlerden elde edilen noktaların "tasarım eğrisi" olarak verilen eğri etrafında yaygınlıklarının geniş olduğu, eğri üzerine yakın düşmedikleri görülmektedir. 1987 yöntemi hakkında böyle kuşkulu bir durum varken, 1973 yönteminin 1987 yönteminden küçük açıklıklar için % 5, büyük açıklıklar için % 20 civarında daha küçük savak debisi değerleri vermesinin emniyetli tarafta olduğu düşünülebilir. Özetle, (1) hesap yönteminin analitik olarak çok daha sade olması, (2) debi değerlerinin biraz küçük hesaplanmasıyla emniyetli tarafta olması, (3) 1987 yöntemi ile büyük kapak-altı açıklıklarındaki debilerin tam açık haldekinden daha büyük değerli çıkması düşünüldüğünde 1973 yönteminin kullanılmasının sakıncalı olmadığı sonucuna varılabilir.

İlerdeki bir çalışmada, [5] nolu yayında ele alınan 21 örnek üzerinde veya ilgili ölçümleri olan başka barajlarda yarı açık durumda radyal kapaklı savaktan geçen debinin hesabı için burada irdelenen iki klasik yöntemlerin verdiği değerler, Aydın ve arkadaşlarının 2026'da yayınlanan makalelerinde [7] sundukları yeni yöntemin vereceği değerler ile karşılaştırılabilir.

5. Kaynaklar

[1] USBR (1973). Design of Small Dams, Spillways, 201. Discharge Over Gate-Controlled Ogee Crests, Second edition, US Department of The Interior, Bureau of Reclamation, US Government Printing Office, Washington DC.

[2] USBR (1987). Design of Small Dams, Ch.9 Spillways, 9.16. Discharge Over Gate-Controlled Ogee Crests, A Water Resources Technical Publication, Third edition, US Department of The Interior, Bureau of Reclamation, US Government Printing Office, Washington DC.

[3] USACE (1987) Hydraulic Design Criteria, Volume 2, Tainter Gates on Spillway Crests, Sheets 311-1 to 311-5, Department of the Army, Corps of Engineers, Mississippi River Commission, Waterways Experimentation Station, Vicksburg, Mississippi, 1987.

[4] Haktanir T, Citakoglu H, Kucukgoncu H (2016) An efficient algorithm for ogee spillway discharge with partially-opened radial gates by the method of Design of Small Dams and comparison of current and previous methods. The International Journal of Engineering and Science (IJES), 5(7), 13−26, ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 2319−1805, www.theijes.com.

[5] Haktanır T and Khalaf M A (2021) Discharge coefficients for radial-gated ogee spillways by laboratory data and by Design of Small Dams. Teknik Dergi, Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers, 32(4), Paper 618, 10919–10945, DOI: 10.18400/tekderg.540640.

[6] DSİ (2015) YUSUFELİ BARAJI VE HES PROJESİ DOLUSAVAK MODEL ÇALIŞMASI ARA RAPORU I (pdf). DSİ TAKK DAİRESİ BAŞKANLIĞI, Hidrolik Model Laboratuvarı Şube Müdürlüğü, Ankara.

[7] Aydin İ, Köken M, Tanyeri M (2026) Explicit formulation for free orifice flowrate under partially opened radial gates. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 110, 103319.

[8] Anonim (2000) Yamula Hydroelectric Project, Yamula Dam Contract between Kay seri Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret A.S¸ and Aydıner İnşaat A. Ş.¸ *Volume 4*. Kayseri, Türkiye.

Jeoteknik Parametrelerin Su Yapıları Tasarımlarına Etkisi: DSİ Projelerinden Uygulama Örnekleri

Kübra GÖLBAŞI*
Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, 0009-0004-4071-163X
kubra.k@dsi.gov.tr

Cemal YILDIZ
Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, 0009-0001-5529-4603
cemalyildiz@dsi.gov.tr

Ayhan KOÇBAY
Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, 0000-0001-9048-0316
akocbay@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* Jeoteknik etüt, baraj tasarımı, yerinde deneyler, mühendislik jeolojisi

1. Amaç

Baraj projelerinde tasarım güvenilirliği, temel ortamının mühendislik davranışını temsil eden jeoteknik parametrelerin doğruluk düzeyine doğrudan bağlıdır. Temel kaya ve zemin ortamına ilişkin dayanım, deformasyon, geçirgenlik ve süreksizlik özelliklerinin doğru belirlenmesi; yalnızca uygun baraj tipinin seçilmesini değil, aynı zamanda gövde geometrisinin optimize edilmesini, temel iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesini ve uygulama sürecinde ortaya çıkabilecek jeoteknik belirsizliklerin yönetilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, mühendislik jeolojisi çalışmaları, sondajlar, yerinde deneyler ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi, güvenli ve ekonomik baraj tasarımlarının oluşturulmasında kritik öneme sahiptir.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı tarafından yürütülen jeoteknik etüt çalışmaları kapsamında elde edilen mühendislik verileri, farklı jeolojik koşullara sahip baraj projelerinde tasarım sürecinin çeşitli aşamalarında karar verici nitelikte kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Akçalı, Salıpazarı, Sarıçay ve Gölecik Barajı projelerinde gerçekleştirilen jeoteknik araştırmalar örnek uygulamalar olarak ele alınmış; yerinde ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin tasarıma esas mühendislik parametrelerinin belirlenmesi, uygun baraj tipinin seçimi, gövde geometrisinin optimize edilmesi ve uygulama aşamasındaki tasarım revizyonları üzerindeki etkileri değerlendirilerek, bu süreçlerin güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir baraj tasarımına katkısının ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. Metaryal ve Yöntem

Bu çalışmada, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı tarafından farklı jeolojik koşullarda yürütülen Akçalı, Salıpazarı, Sarıçay ve Gölecik Barajı projelerine ait jeoteknik etüt ve uygulama aşaması çalışmaları incelenmiştir. Proje sahalarında gerçekleştirilen mühendislik jeolojisi haritalamaları, karotlu sondajlar, yerinde deneyler ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek temel kaya ve zemin ortamının mühendislik davranışı ortaya konulmuştur.

Arazi çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen Menard presiyometre, kaya presiyometresi (Probex), Goodman Jack kaya dilatometresi, Basınçlı/Basınçsız Su Testi ve Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) gibi yerinde deneylerden elde edilen sonuçlar; laboratuvar deneyleri, mühendislik jeolojisi gözlemleri ve kaya kütlesi değerlendirmeleri ile birlikte yorumlanmıştır. Bu veriler kullanılarak tasarıma esas dayanım, deformasyon ve geçirgenlik parametreleri belirlenmiş, gerekli görülen projelerde sayısal analizler güncellenerek tasarım kararları yeniden değerlendirilmiştir.

İncelenen örnek projeler, jeoteknik çalışmaların baraj tasarım sürecindeki farklı rollerini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Bu kapsamda; Akçalı Barajı'nda yerinde deneylerin tasarım parametrelerinin belirlenmesine katkısı, Salıpazarı Barajı'nda temel koşullarının baraj tasarım kararlarına etkisi, Sarıçay Barajı'nda jeoteknik değerlendirmeler doğrultusunda gövde geometrisinde gerçekleştirilen revizyon ve

Gölecik Barajı'nda uygulama aşamasında yürütülen ilave jeoteknik araştırmaların tasarım revizyonlarına katkısı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, jeoteknik parametrelerin planlama aşamasından uygulama sürecine kadar mühendislik kararlarını nasıl yönlendirdiği gerçek proje örnekleri üzerinden ortaya konulmuştur.

3. Değerlendirme

İncelenen örnek projeler, jeoteknik araştırmaların yalnızca tasarıma esas mühendislik parametrelerinin belirlenmesini sağlamadığını, aynı zamanda baraj tasarımına ilişkin mühendislik kararlarını doğrudan yönlendirdiğini göstermektedir. Yerinde ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler; tasarım parametrelerinin belirlenmesi, uygun baraj tipinin seçimi, gövde geometrisinin optimize edilmesi ve uygulama sürecinde ortaya çıkan jeoteknik belirsizliklerin yönetilmesinde farklı düzeylerde belirleyici olmuştur. Bu bölümde, söz konusu katkılar örnek projeler üzerinden değerlendirilmiş; incelenen projelerde öne çıkan jeoteknik bulgular ile bu bulguların tasarım kararlarına yansımaları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İncelenen projelerde jeoteknik çalışmaların tasarım kararlarına etkisi

Proje	Belirleyici Jeoteknik Bulgu/Değerlendirme	Tasarım Kararına Etkisi
Akçalı Göleti	Yerinde deneyler ile görgül yöntemlerden elde edilen deformasyon modülleri arasındaki farklılık	Tasarıma esas deformasyon parametrelerinin ve Baraj tipinin güncellenmesi
Salıpazarı Barajı	Heterojen temel koşulları	Başlangıçta öngörülen SSB yerine Hardfill baraj tipinin seçilmesi
Sarıçay Barajı	Güncellenen jeoteknik parametreler ve stabilite değerlendirmeleri	Memba şev geometrisinin revizyonu
Gölecik Barajı	Uygulama aşamasında elde edilen ilave jeoteknik veriler	Gövde tasarımının revize edilmesi

3.1 Yerinde Deneylerin Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesindeki Rolü

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) barajlarda, gövdenin rijit davranışı nedeniyle temel kaya kütlesinin deformasyon özelliklerinin güvenilir şekilde belirlenmesi tasarımın en kritik aşamalarından birini oluşturmaktadır. Bu nedenle, temel kaya ortamına ait deformasyon modülünün doğru belirlenmesi, gövde-temel etkileşiminin gerçekçi olarak modellenebilmesi ve tasarım analizlerinin güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Akçalı Barajı örneğinde, temel kaya kütlesinin deformasyon davranışı hem laboratuvar deneylerinden elde edilen elastisite modülü ve jeomekanik sınıflama sistemleri kullanılarak görgül yaklaşımlarla tahmin edilmiş hem de açılan sondaj kuyularında gerçekleştirilen Goodman Jack kaya dilatometresi deneyleri ile yerinde belirlenmiştir.

Karşılaştırmalı değerlendirmeler sonucunda, laboratuvar verileri ve Hoek–Diederichs (2006) yaklaşımı kullanılarak tahmin edilen kaya kütlesi deformasyon modülü değerlerinin, yerinde Goodman Jack kaya dilatometresi deneylerinden elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu farklılığın; kaya kütlesindeki süreksizliklerin, ayrışma derecesinin ve heterojen yapının laboratuvar numuneleri üzerinde tam olarak temsil edilememesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Akçalı Barajı örneği, jeomekanik sınıflamalardan türetilen görgül parametrelerin tek başına kullanılmasının, özellikle heterojen ve süreksizlik içeren kaya ortamlarında tasarım açısından belirsizlik oluşturabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, yerinde gerçekleştirilen Goodman Jack kaya dilatometresi deneyleri, kaya kütlesinin proje yükü altındaki gerçek deformasyon davranışını doğrudan yansıttığından, tasarıma esas deformasyon parametrelerinin belirlenmesinde daha güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bu nedenle, yerinde deneylerin laboratuvar verileriyle birlikte değerlendirilmesi, SSB baraj tasarımlarında mühendislik güvenilirliğinin artırılması ve tasarım belirsizliklerinin azaltılmasına, gövde-temel etkileşiminin daha gerçekçi modellenmesine ve güvenli baraj tasarımının oluşturulmasına önemli katkı sağlamaktadır.

3.2 Jeoteknik Parametrelerin Baraj Tipi ve Gövde Geometrisinin Belirlenmesindeki Rolü

Jeoteknik araştırmaların tasarıma katkısı, yalnızca mühendislik parametrelerinin belirlenmesi ile sınırlı olmayıp, uygun baraj tipinin seçilmesi ve gövde geometrisinin temel koşullarına göre optimize edilmesinde de belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle kaya ortamının heterojen yapısı, süreksizlik

özellikleri, deformasyon davranışı ve temel kaya kalitesi gibi jeoteknik unsurlar, tasarım alternatiflerinin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılabilmektedir.

Salıpazarı Barajı'nda gerçekleştirilen ayrıntılı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar sonucunda, temel kaya ortamının heterojen yapısı ve mühendislik davranışının başlangıçta öngörülen Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) baraj tipinin uygulanabilirliğini sınırlandırdığı değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda tasarım yeniden ele alınmış ve jeoteknik veriler doğrultusunda Hardfill baraj tipine geçilmiştir. Bu değişiklik, temel ortamının mühendislik özelliklerinin uygun baraj tipinin belirlenmesinde doğrudan belirleyici olduğunu göstermektedir.

Sarıçay Barajı'nda ise jeoteknik araştırmalar sonucunda baraj tipinin değiştirilmesine ihtiyaç duyulmamış, ancak güncellenen jeoteknik parametreler doğrultusunda gerçekleştirilen stabilite analizleri sonucunda gövde geometrisi yeniden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, memba şev eğimi revize edilerek temel koşulları ile daha uyumlu ve güvenli bir tasarım oluşturulmuştur. Bu örnek, jeoteknik çalışmaların yalnızca baraj tipi seçiminde değil, gövde stabilitesinin artırılması, yapım güvenliğinin sağlanması ve mevcut tasarımın mühendislik açısından optimize edilmesinde de kritik rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

Salıpazarı ve Sarıçay Barajı örnekleri birlikte değerlendirildiğinde, jeoteknik çalışmaların tasarım sürecindeki katkısının yalnızca mühendislik parametrelerinin belirlenmesiyle sınırlı olmadığı; uygun baraj tipinin seçilmesi veya mevcut tasarımın revize edilmesi gibi kritik mühendislik kararlarını doğrudan yönlendirdiği görülmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen tasarım değişiklikleriyle temel koşullarına daha uyumlu, uygulanabilir ve uzun dönem performansı açısından daha güvenilir mühendislik çözümleri geliştirilmiştir. Salıpazarı ve Sarıçay Barajlarının genel görünümleri Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Salıpazarı Barajı (a) ve Sarıçay Barajı (b) genel görünümleri

3.3 Uygulama Aşamasında Jeoteknik Verilerin Tasarım Revizyonundaki Rolü

Baraj projelerinde jeoteknik araştırmaların önemi yalnızca planlama ve kesin proje aşamalarıyla sınırlı olmayıp, uygulama sürecinde elde edilen yeni jeoteknik verilerin değerlendirilerek tasarımın gerektiğinde revize edilmesini de kapsamaktadır. Gölecik Barajı, uygulama aşamasında gerçekleştirilen ilave jeoteknik çalışmaların tasarım kararlarını doğrudan etkilediği örnek projelerden biridir.

Baraj gövde temelinde yürütülen kazı çalışmaları sırasında elde edilen jeolojik gözlemler doğrultusunda temel kaya ortamının mühendislik davranışının yeniden değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda ilave laboratuvar deneyleri, kaya presiyometresi deneyleri, deneme konsolidasyon enjeksiyonları ve büyük ölçekli yerinde kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiş; elde edilen sonuçlar doğrultusunda temel kaya kütlesinin deformasyon ve kayma dayanımı parametreleri yeniden belirlenmiştir. Deneme konsolidasyon enjeksiyonları sonrasında gerçekleştirilen değerlendirmelerde, enjeksiyon uygulamalarının kaya kütlesinin deformasyon özelliklerinde beklenen düzeyde bir iyileşme sağlamadığı belirlenmiş ve mühendislik hesaplarında uygulama aşamasında elde edilen revize jeoteknik parametrelerin kullanılması uygun görülmüştür.

Revize edilen jeoteknik parametreler esas alınarak gerçekleştirilen stabilite analizleri sonucunda gövde tasarımı yeniden değerlendirilmiş; memba şev eğimi, gövde altı temel kazısı ve diş betonu geometrisi

güncellenmiştir. Böylece uygulama sürecinde elde edilen jeoteknik veriler doğrultusunda gövde tasarımı revize edilmiş ve proje güvenilirliğini artırmaya yönelik mühendislik çözümleri geliştirilmiştir.

Gölecik Barajı örneği, jeoteknik araştırmaların yalnızca tasarım parametrelerinin belirlenmesinde değil, uygulama sürecinde ortaya çıkan yeni verilerin değerlendirilerek tasarımın geliştirilmesinde de kritik rol üstlendiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, jeoteknik tasarımın dinamik bir mühendislik süreci olduğunu ve güvenli baraj tasarımlarının oluşturulmasında uygulama aşamasında elde edilen verilerin tasarıma yansıtılmasıyla daha gerçekçi mühendislik çözümleri geliştirilmesine, güvenli baraj işletmesine ve uzun dönem performansının artırılmasına önemli katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Uygulama aşamasında elde edilen jeoteknik veriler doğrultusunda Gölecik Barajı gövde kesitinde gerçekleştirilen tasarım revizyonu Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Gölecik Barajı gövde kazılarının revizyon öncesi (a) ve revizyon sonrası (b) görünümü

4. Sonuçlar

Bu çalışmada incelenen Akçalı, Salıpazarı, Sarıçay ve Gölecik Barajı örnekleri, jeoteknik araştırmaların baraj tasarım sürecindeki rolünün yalnızca tasarıma esas mühendislik parametrelerinin belirlenmesiyle sınırlı olmadığını; uygun baraj tipinin seçilmesi, gövde geometrisinin optimize edilmesi ve uygulama aşamasında tasarımın revize edilmesi gibi kritik mühendislik kararlarını doğrudan yönlendirdiğini ortaya koymuştur. Yerinde ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesiyle temel kaya ve zemin ortamının mühendislik davranışı daha gerçekçi şekilde tanımlanabilmekte, böylece tasarım belirsizlikleri azaltılarak daha güvenli ve ekonomik çözümler geliştirilebilmektedir. Bu kapsamda, jeoteknik çalışmaların planlama aşamasından başlayarak uygulama süreci boyunca güncellenebilen bir mühendislik yaklaşımıyla yürütülmesi; güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir barajların projelendirilmesi ile uzun dönem performansının sağlanması açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma jeoteknik araştırmaların yalnızca zemin ve kaya ortamının mühendislik özelliklerini belirlemekle sınırlı olmadığını; baraj tasarımına ilişkin kritik mühendislik kararlarını yönlendiren temel bir mühendislik aracı olduğunu gerçek proje örnekleri üzerinden ortaya koymuştur.

5. Kaynaklar

[1] DSİ Genel Müdürlüğü. (2020). Adıyaman Akçalı-1 Göleti Uygulama Aşaması Revize Jeoteknik Etüt Raporu. Ankara.

[2] DSİ Genel Müdürlüğü. (2020). Bursa Gölecik Barajı İnşaatı Yeni GövdeTasarımına Göre Kazı Stabiliteleri, Destekleme Önerileri ve Jeolojik Durum ile Gövde Revizyonu Gerekçe Raporu. Ankara.

[3] DSİ Genel Müdürlüğü. (2021). Aydın Söke Sarıçay Barajı Gövde Kazısı Jeoteknik Değerlendirme Raporu. Ankara."

[4] DSİ Genel Müdürlüğü. (2021). Samsun Salıpazarı Barajı Uygulama Aşaması Gövde Jeoteknik Etüt Raporu. Ankara.

Atık Barajlarının Tasarımında Yükseltim Yöntemleri ve Atık Malzeme Özelliklerinde Göz Önünde Bulundurulması Gereken Bazı Hususlar

Recep ÇETİN*
DSİ 41. Şube Müdürlüğü, Konya Orcid no: 0009-0009-7010-858X
recepcetin@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: atık barajları, jeoteknik özellikler, baraj stabilitesi, yükseltim yöntemleri, bakır madeni atıkları

1. Amaç

Madencilik faaliyetlerinin çoğu, özellikle metalik cevher faaliyetleri sonrasında, atık malzemeleri çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla barajlarda toplar. Barajlar, yüksek su içeriğine sahip atıklar içerir. Atık barajlarının iki ana amacı vardır; bunlar, büyük miktarda atık malzemeyi depolamak için geniş bir hacim sağlamak ve atık malzemenin sıkıştırıldığı bir alan sağlamaktır [4]. Barajların stabilitesi ve güvenliği, maden çevresinin ve maden yakınındaki doğal kaynakların sürdürülebilirliği için çok önemlidir. Atık barajlarının sürdürülebilirliğini sağlamak için stabilite analizi ve düzenli izleme gereklidir.

Bu çalışmanın amacı, maden atık barajlarının tasarım ve işletme süreçlerinde dikkate alınması gereken temel mühendislik unsurlarını bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmek ve memba, mansap ile merkez hattı yükseltim yöntemlerinin farklılıklarını ortaya koymaktır. Çalışmada ayrıca, özellikle bakır madeni atıklarının tane boyu dağılımı, yoğunluk, boşluk oranı, geçirgenlik, kayma dayanımı ve konsolidasyon gibi jeoteknik özelliklerinin baraj davranışı üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Çalışmanın farklı kaynaklarda ayrı ayrı incelenen yükseltim yöntemleri, malzeme özellikleri, sızma ve stabilite hususlarını ortak bir mühendislik çerçevesinde bir araya getirerek uygulamaya yönelik genel bir değerlendirme sunarak literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle atık malzeme özelliklerinin çökelme düzeni, derinlik, drenaj koşulları ve yükseltme hızına bağlı olarak değişebildiğinin vurgulanması, atık barajlarının değerlendirilmesinde saha koşullarının ve malzeme değişkenliğinin birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Atık Barajları Yükseltim Metotları

İnşaatında kullanılan malzeme türünden bağımsız olarak, yükseltilmiş dolgular üç kategoriye ayrılır: memba ve, mansap yöntemi ve merkez hattı yöntemi. Bu yöntemlerin her birinin depreme duyarlılık ve kısa-uzun vadeli istikrar hususları gibi kendi inşa yöntemine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yükseltilmiş dolgular, kabaca ilk 2-3 yıl boyunca atık malzeme depolamasını sağlamak için bir başlangıç setiyle başlar. Yükseltilmiş dolguların faydaları arasında, sermaye maliyetlerinin dağıtılması, harcamaların uzun bir süreye yayılması ve maden işletmeye alma ile ilgili diğer finansal konular da dahil edilebilir.

Maden atık depolama yöntemi olan memba yönteminde, yeni setler önceki setlerin memba tarafında ve depolanmış atıkların üzerine doğru ilerleyecek şekilde inşa edilir; bu yöntem düşük dolgu ihtiyacı ve düşük maliyet avantajına sahip olmakla birlikte su depolaması ve sismik koşullar açısından daha sınırlıdır. Mansap yönteminde, baraj yükseltmeleri mansap yönüne doğru genişletilir ve yeni setler daha kontrollü dolgu malzemesi üzerine inşa edildiği için dayanım ve sıvılaşma güvenliği genellikle daha yüksektir. Merkez hattı yönteminde ise yükseltmeler yaklaşık aynı düşey eksen boyunca sürdürülür ve bu nedenle memba ile mansap yöntemleri arasında dolgu miktarı, maliyet ve güvenlik bakımından ara bir çözüm sunar. Tablo 1 de atık barajlarının dolgu tiplerine göre bazı özelliklerinin kıyaslaması verilmektedir. Genel olarak yöntem seçimi atığın özellikleri, su depolama gereksinimi, sismik koşullar, yükseltme hızı ve ekonomik kriterler birlikte değerlendirilerek yapılır [6].

Özellikle memba ve merkez hattı yöntemlerinde, depolanan atıkların mekanik davranışı bütün yapının stabilitesinde belirleyici olabilmektedir. Bu nedenle yükseltim yönteminin değerlendirilmesinde, gövde geometrisi ve dolgu gereksiniminin yanında atıkların dayanım ve deformasyon özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir [1].

Tablo 1. Yüzey su tutma dolgusu tiplerinin karşılaştırılması [6]

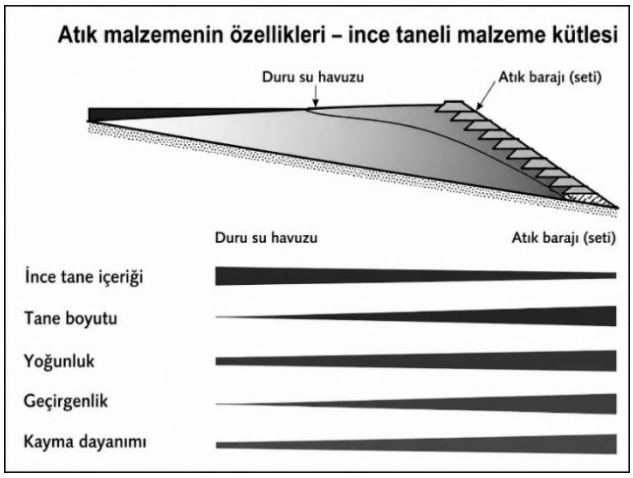
Dolgu / Baraj Tipi	Maden Atığı (Tailings) Gereksinimleri	Deşarj Gereksinimleri	Su Depolamaya Uygunluk	Sismik Dayanım	Yükseltme Hızı Kısıtlamaları	Dolgu Malzemesi Gereksinimi	Dolgu Maliyeti
(1) Toprak - Dolgu Baraj (Water-Retention)	Her tür maden atığı için uygundur.	Herhangi bir deşarj yöntemi uygulanabilir.	İyi	İyi	Dolgunun tamamı başlangıçta inşa edilir.	Doğal zemin, malzeme	Yüksek
(2)Memba Yöntemi (Upstream)	Toplam atık içerisinde en az %40–60 kum bulunmalıdır.	Çevresel deşarj ve iyi kontrol edilen bir plaj (beach) oluşumu gereklidir.	Önemli miktarda su depolaması için uygun değildir.	Yüksek sismik aktiviteye sahip bölgelerde zayıf	Yıllık yükseltmenin 15–30 ft/yıl (≈4,6–9,1 m/yıl) altında olması tercih edilir.	Doğal zemin, kumlu atıklar veya maden pasa malzemesi	Düşük
(3)Mansap Yöntemi (Downstream)	Her tür maden atığı için uygundur.	Tasarım ayrıntılarına bağlı olarak değişir.	İyi	İyi	Kısıtlama yoktur.	kumlu atıklar, maden pasa malzemesi; veya doğal zeminler	Yüksek
(4)Merkez Hat Yöntemi (Centerline)	Kumlu atıklar veya düşük plastisiteli ince taneli şlamlar uygundur.	En azından belirli bir plaj oluşmasını sağlayacak şekilde çevresel deşarj gereklidir.	Uygun tasarım durumunda geçici taşkın suyu depolaması	Kabul edilebilir	Her bir yükseltme kademesinin yüksekliğine ilişkin sınırlamalar uygulanabilir.	Üretim yeterli ise iri atıklar, maden pasa malzemesi; veya doğal zeminler	Orta

3. Değerlendirme

3.1. Bakır Madeni Atık Barajının Fiziksel Yönleri

Bakır madeni atıkları, çoğunlukla açık ocak işletmelerinde madencilik, öğütme ve işleme işlemlerinden sonra depolanır. Genellikle atık barajları aşamalar halinde inşa edilir ve malzemeler arasında bir iletim bölgesi bulunan hem daha iri hem de daha ince malzemelerden oluşur. Bu malzemeler genellikle kum ve çamur olmak üzere iki malzeme türüne ayrılır. Kum malzemelerin 200 No.lu elekten geçen bölüm ince taneli fraksiyondur, ancak madenden madene farklılıklar beklenebilir. Bununla birlikte, çamurların 200 No.lu elekten geçen bölüm ince taneli fraksiyondur. Neredeyse tüm atıklar her iki bileşeni de içerir, ancak oranları büyük ölçüde değişir. Jeoteknik özelliklerin karakteristikleri, inşaat yöntemine ve atıkların yerleştirilmesine bağlı olmaktadır. Atık paşalarının çökeltmesi esnasında, iri taneler ile ince taneliler gölette yerleşim noktaları değişiklik göstermektedir. Bu nedenle bazı mühendislik parametreleri gölet içerisinde farklı olabilmektedir. Şekil 1 ince ve iri taneli malzeme kütlelerinin konumlarını ve bunların atıkların bazı özelliklerine etkisini göstermektedir.

Şekil 1'e göre atık barajlarında bazı özelliklerden bazıları arasında: Yogunluk, geçirgenlik, geçirgenliğin yanal anizotropisi, sıkıştırılabilirlik, konsolidasyon ve kayma dayanımı gibi malzeme özellikleri bulunmaktadır.



Şekil 1. Bazı atık malzeme özelliklerinin birikme konumuna bağlı olarak karakterizasyonu [6]

Maden atıkları, bazı temel özellikler bakımından doğal zeminlerden farklılaşabilmektedir. Bu farklılıklar, doğal zeminler için geliştirilmiş jeoteknik bağıntıların atıklara uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla atıkların mekanik özellikleri değerlendirilirken tane özellikleri dikkate alınmalı ve standart bağıntıların uygunluğu malzemeye özgü olarak sorgulanmalıdır [1].

Atıkların tane boyu dağılımı, atık kütlesinin farklı bölgelerinde yoğunluk, boşluk oranı, geçirgenlik ve dayanım gibi temel jeoteknik özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, atıkların mühendislik davranışının değerlendirilmesinde kuru yoğunluk, özgül ağırlık, boşluk oranı, hidrolik iletkenlik ve konsolidasyon özellikleri gibi temel malzeme parametrelerinin birlikte dikkate alınması önem taşımaktadır.

Genel olarak, atık malzemenin derinliği arttıkça üst tabakaların oluşturduğu gerilmelerin etkisiyle malzeme daha sıkı bir yapıya ulaşabilmektedir. Bu nedenle daha derin kesimlerde boşluk oranının azalması ve kuru yoğunluğun artması beklenirken, yüzeye yakın kesimlerde daha gevşek yapı nedeniyle boşluk oranı daha yüksek ve kuru yoğunluk daha düşük olabilmektedir. Dolayısıyla, aynı atık depolama alanı içerisinde dahi derinliğe bağlı olarak farklı yoğunluk ve sıkılık koşullarıyla karşılaşılabilmektedir.

Atıkların diğer bazı malzeme özellikleriyle karşılaştırıldığında, geçirgenlik değerlerinin genelleştirilmesi daha güçtür. Geçirgenlik, temiz siklonlanmış atıklar için 10^{-2}' cm/sn den, düşük plastisiteli çamurlar için 10^{-7} cm/sn'ye kadar 5'ten fazla büyüklük mertebesini kapsayabilir.

Atık barajları, konsolidasyonun gerçekleşmesine ve oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının zaman içerisinde sönümlenmesine olanak sağlamak amacıyla genellikle kademeli olarak yükseltilmektedir. Bu yaklaşım hem temel zemininin hem de depolanan atık malzemenin stabilitesinin korunması açısından önem taşımaktadır. Yükseltme hızının yaklaşık 4,5–9 m/yıl değerlerini aşması durumunda, baraj gövdesi ve atık kütlesi içerisinde aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişme olasılığı artabilmektedir [2].

Yukarıda açıklanan hususlar birlikte değerlendirildiğinde, atık barajlarındaki malzeme özelliklerinin yalnızca atığın mineralojik veya tane boyu özelliklerine değil; depolama yöntemi, çökelme düzeni, derinlik, sıkılık, drenaj koşulları ve barajın yükseltme hızına da bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu kapsamda, genel nitelikte bir değerlendirme yapılması amacıyla atık barajlarının bazı karakteristik malzeme ve mühendislik özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Bakır madeni atıkları genel olarak nispeten iri taneli bir yapı göstermekte olup, malzemenin yaklaşık %45'i 200 No.lu elekten geçerken %55'i elek üzerinde kalmaktadır.
- Boşluk oranı, kumlu atıklar için yaklaşık 0,9, çamur niteliğindeki ince taneli atıklar için ise yaklaşık 1,0 olarak alınabilir.
- Dolgu amacıyla kullanılan kumlu atıkların geçirgenlik değerleri 10^{-2} cm/sn ile 10^{-3} cm/sn arasında değişebilmektedir [6].
- Kumlar ve çamurlar arasındaki yanal geçirgenlik anizotropisi 0,1 olarak kabul edilebilir.
- Kayma dayanımı parametreleri açısından hem kumlu hem de çamurlu atıklarda kohezyonun 0–10 kPa, içsel sürtünme açısının ise yaklaşık 33°–37° aralığında değişebileceği değerlendirilmektedir.

Atık barajlarının izlenmesinde, deformasyon ve boşluk suyu basıncı ölçümleri sismik yöntemlerle desteklenebilmektedir. Ouellet vd., ortam sismik gürültüsünün analiziyle belirlenen dalga hızı değişimlerini, gölet seviyesi ve sismik koni penetrasyon deneyi verilerine dayanan efektif gerilme modeliyle birlikte değerlendirmiştir [3]. Bahse mevzu çalışma, bu yaklaşımın barajın iç yapısındaki rijitlik değişimlerinin izlenmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte yazarlar, yöntemin mekânsal çözünürlük sınırlılığı nedeniyle piyezometre, uydu radar interferometrisi ve inklinometre ölçümleriyle birlikte kullanılmasını önermektedir.

4. Sonuçlar

Atık barajlarının güvenli ve sürdürülebilir biçimde işletilebilmesi, yalnızca uygun baraj tipinin seçilmesine değil, aynı zamanda atık malzemenin jeoteknik özelliklerinin doğru belirlenmesine ve işletme süresince düzenli olarak izlenmesine bağlıdır. Memba, mansap ve merkez hattı gibi farklı yükseltme yöntemlerinin her biri; dolgu ihtiyacı, su depolama kapasitesi, sismik performans ve maliyet açısından farklı avantaj ve

sınırlamalara sahip olduğundan, yöntem seçiminin saha koşullarına ve atık karakteristiklerine göre yapılması uygun bir yaklaşımdır. Bu kapsamda maden atıklarının malzeme özelliklerinden bazıları: tane boyu dağılımı, kuru yoğunluk, boşluk oranı, hidrolik iletkenlik, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve konsolidasyon özellikleri; barajın stabilitesi, drenaj davranışı ve boşluk suyu basıncı gelişiminin hususları değerlendirilmiştir.

Atık barajlarının güvenli şekilde işletilebilmesi için olası yenilme mekanizmalarının erken belirlenmesi ve baraj davranışının düzenli olarak izlenmesi büyük önem taşımaktadır. Mevsimsel ve iklimsel değişiklikler, operasyonel faaliyetlerle ilgili yerinde incelemelerle birlikte dikkate alınmalıdır. Atık barajları gibi dinamik ortamların sık sık ve değişen koşullar (Maden atık üretimi, su depolanması malzeme karakterizasyonu vb.) hususların ve sonra baraj stabilite ve sızma durumlarının periyodik olarak kontrol edilmesi uygun olacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Macedo, J. ve Vergaray, L. (2022). Properties of mine tailings for static liquefaction assessment. Canadian Geotechnical Journal, 59, 667–687. DOI: 10.1139/cgj-2020-0600.

[2] Mittal, H., & Morgenstern, N. (1976). Seepage Controls in Tailings Dams. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, pp. 277-293.

[3] Ouellet, S. M., Dettmer, J., Olivier, G., DeWit, T. ve Lato, M. (2022). Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models. Communications Earth & Environment, 3, 301. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00629-w

[4] Oyanguren, P. R., Nicieza, C. G., Fernández, M. Á., & Palacio, C. G. (2008).Stability analysis of Llerin Rockfill Dam: An in situ direct shear test.Engineering Geology, 100(3-4), 120-130.

[5] Shamsai, A., Pak, A. ve Bateni, S. M. (2007). Geotechnical characteristics of copper mine tailings: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering, 25*, 591–602.

[6] Vick, S. (1983). Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. Boston: Massachutesetts Institue of Technology.

Sucul Ortamlarda Mikroplastik–Radyonüklit Etkileşimleri ve Radyonüklit Taşınımındaki Rolü

Gözde Ümmühan ALPER*
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ), Ankara, Türkiye
ORCID iD: 0009-0007-3087-463X
gozdealper@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* mikroplastikler; radyonüklitler; sorpsiyon; dağılım katsayısı (Kd); sucul ortamlar.

1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, sucul ortamlarda yaygın olarak bulunan mikroplastiklerin (PVC, PS ve PA6), çevresel açıdan önemli radyonüklitleri (^234Th, ^210Pb, ^210Po, ^226Ra ve ^137Cs gibi) adsorplama ve katı-sıvı fazlar arasındaki dağılım davranışını (Kd) incelemek ve pH, tuzluluk ile temas süresi gibi çevresel parametrelerin bu etkileşim üzerindeki etkilerini belirlemektir.

Çalışmada, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel bir kirletici olmadığı, aynı zamanda radyonüklitlerin çevresel taşınımı ve dağılımında aktif bir taşıyıcı faz olarak rol oynayabileceği değerlendirilmiştir. Özellikle ^210Po'nun mikroplastiklere yüksek oranda bağlanmasına karşılık ^137Cs'nin daha düşük afinite göstermesi, farklı radyonüklitlerin mikroplastiklerle etkileşimlerinin önemli ölçüde farklılaşabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, mikroplastik–radyonüklit etkileşimlerine ilişkin sınırlı mevcut bilgilerin genişletilmesine katkı sağlamakta; çevresel radyokimya, radyoekoloji ve mikroplastik kirliliği alanlarında önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Ayrıca elde edilen bulgular, radyonüklitlerin çevresel taşınım ve kaderinin modellenmesinde mikroplastiklerin potansiyel taşıyıcı faz olarak dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Metodoloji

Açık okyanuslardan doğrudan mikroplastik örneklerinin toplanması; örnekleme koşullarının zorluğu, lojistik gereksinimler ve mikroplastiklerin küresel ölçekte heterojen özellik göstermesi nedeniyle önemli sınırlılıklar içermektedir. Mikroplastiklerin farklı kaynaklara, yaşlara ve maruz kaldıkları çevresel koşullara bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişebilmesi de deneysel sonuçların karşılaştırılabilirliğini güçleştirmektedir. Bu nedenlerle çalışmada, saha örneklemesi yerine kontrollü laboratuvar deneyleri tercih edilmiştir.

Deneylerde, doğal denizel ve tatlı su ortamlarında bulunabilecek mikroplastik özelliklerini temsil etmek üzere üç farklı polimer türü, yani polivinil klorür (PVC), polistiren (PS) ve poliamid 6 (PA6) kullanılmıştır.

Çalışmanın metodolojik yaklaşımı kapsamında, denizel ve tatlı su sistemlerinde izleyici ve jeokronometre olarak kullanılan çeşitli radyonüklitlerin (^234Th/^238U, ^210Po/^210Pb ve ^137Cs gibi) katı-sıvı fazlar arasındaki dağılım davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda, çözünmüş fazda bulunan radyonüklitler ile partikül reaktif radyonüklitler arasındaki bölümlenme davranışları esas alınmıştır.
Mikroplastiklerin radyonüklitleri yüzeylerinde ne ölçüde tutabildiği ve bu etkileşimin çevresel taşınım süreçlerine olası katkısı, kontrollü deney koşullarında değerlendirilmiştir. Radyonüklitlerin mikroplastiklere olan ilgisi, katı-sıvı dağılım katsayısı (Kd) kullanılarak nicel olarak ifade edilmiştir.

2.2. Polimer Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmada polistiren (PS), polivinil klorür (PVC) ve poliamid 6 (PA6) olmak üzere üç farklı mikroplastik türü kullanılmıştır. Söz konusu polimerler; kimyasal yapıları, elementel bileşimleri, polariteleri, kristallilik dereceleri ve moleküler etkileşim özellikleri bakımından birbirlerinden farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar, polimerlerin çevresel kirleticileri tutma ve sorplama kapasitelerini doğrudan etkileyebilmektedir.

PS ve PVC genel olarak amorf yapıya sahipken, PA6 yarı kristalin yapıda bir polimerdir. Polimerlerin kirleticileri tutma kapasitesini belirleyen temel parametrelerden biri kristallilik derecesidir. Amorf bölgelerde polimer zincirlerinin daha düzensiz olması ve serbest hacmin daha yüksek bulunması, kirletici moleküllerin polimer matrisi içerisine difüzyonunu ve nüfuzunu kolaylaştırabilmektedir. Buna karşılık kristalin bölgelerde zincirlerin daha düzenli ve sıkı paketlenmiş olması, kirleticilerin polimer içerisine nüfuzunu sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle kristallilik derecesindeki artış, özellikle absorpsiyona dayalı sorpsiyon mekanizmalarında kirletici tutulumunu azaltabilmektedir.

Polimerlerin cam geçiş sıcaklığı (Tg) da sorpsiyon davranışı açısından önemli bir parametredir. Tg'nin altında polimerin amorf bölgeleri daha rijit ve camsı bir yapı gösterirken, Tg'nin üzerinde zincir hareketliliği artmakta ve yapı daha kauçuksu bir davranış sergilemektedir. PS ve PVC gibi camsı polimerlerde daha düşük zincir hareketliliği nedeniyle yüzey etkileşimleri ve adsorpsiyon mekanizmaları önem kazanırken, PE ve PP gibi kauçuksu polimerlerde daha yüksek serbest hacim ve zincir hareketliliği nedeniyle absorpsiyon mekanizmasının daha belirgin olması beklenmektedir.
Dolayısıyla polimerin kimyasal yapısı, polaritesi, kristallilik derecesi, Tg değeri ve yüzey özellikleri; mikroplastiklerin çevresel kirleticileri tutma kapasitesini ve sorpsiyon mekanizmasını belirleyen temel fizikokimyasal parametrelerdir.

2.3. Deneysel Uygulama

Bu çalışmada, PVC, PS ve PA6 türü mikroplastiklerin ^210Pb, ^210Po, ^137Cs ve ^207Bi gibi çevresel açıdan önemli radyonüklitlerle etkileşimi ve bu radyonüklitlerin katı-sıvı fazlar arasındaki dağılım davranışı (Kd) incelenmiştir.

Mikroplastikler, Çin'de üretilen katkısız 3 mm çapındaki peletlerden elde edilmiştir. Peletler mekanik öğütme yöntemiyle <63 µm boyut fraksiyonuna indirgenmiş ve deneylerde bu fraksiyon kullanılmıştır. Söz konusu boyut fraksiyonunun tercih edilmesinin temel nedeni, küçük partikül boyutlarının doğal sucul sistemlerdeki askıda partikül maddelerle etkileşim açısından çevresel açıdan önemli olması ve yüksek özgül yüzey alanları nedeniyle kirleticilerin taşınımında etkin rol oynayabilmeleridir.

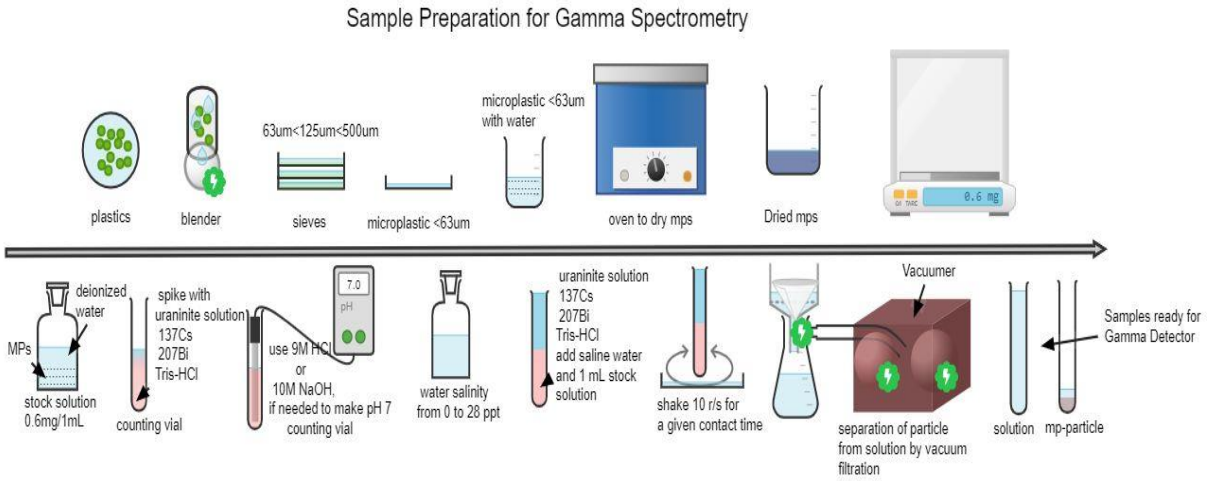
Kullanılan polimerler yapısal ve fizikokimyasal özellikleri bakımından farklılık göstermektedir. PS amorf ve hidrofobik bir polimer olup yaklaşık 95 °C cam geçiş sıcaklığına sahiptir. PVC, klor içeriğine bağlı polar karakter gösteren amorf bir polimer olup yaklaşık 65–85 °C aralığında Tg değerlerine sahiptir. PA6 ise polar amid grupları içeren yarı kristalin bir polimerdir ve Tg değeri yaklaşık 40–60 °C aralığında değişebilmektedir.

Deneysel süreç Şekil 1'de gösterilmiştir. Her bir mikroplastik türünden 100 g alınarak mekanik olarak öğütülmüş, su içerisinde süspanse edilmiş ve elek serilerinden geçirilmiştir. Deneylerde özellikle <63 µm boyutundaki fraksiyon kullanılmıştır. Elde edilen mikroplastikler 24 mg/40 mL oranında hazırlanarak 0,6 g/L konsantrasyonunda stok süspansiyon oluşturulmuş ve homojenliğin sağlanması amacıyla çalkalanmıştır.

Stok süspansiyondan alınan örneklere Tris-HCl tamponu, uranyum ve toryum serisine ait radyonüklitler (^234Th, ^226Ra, ^210Pb ve ^210Po) ile birlikte ^137Cs ve ^207Bi eklenmiştir. Deney ortamının pH değeri hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak ayarlanmış ve toplam hacim 9 mL'ye tamamlanmıştır. Bu koşullarda mikroplastik konsantrasyonu yaklaşık 63 mg/L olarak belirlenmiştir.

Deneylerde pH, tuzluluk ve temas süresi bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. pH değeri 5–9, tuzluluk 0–28 ppt ve temas süresi 0–24 saat aralıklarında sistematik olarak değiştirilmiştir. Her bir parametrenin etkisinin bağımsız olarak değerlendirilebilmesi amacıyla, diğer deney koşulları sabit tutulmuştur.

Deney sonunda katı ve sıvı fazlar 0,45 µm gözenek çapına sahip membran filtre kullanılarak ayrılmıştır. ^210Pb, ^207Bi ve ^137Cs aktiviteleri yüksek saflıklı germanyum (HPGe) gama spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. ^210Po analizinde ise ^209Po izleyicisi kullanılmış, kimyasal ayırma işleminin ardından polonyum gümüş disk üzerine kendiliğinden çöktürülerek alfa spektrometrik ölçüm gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Numune hazırlama ve deneysel uygulama şeması

Partikül madde stok çözeltisi, 24 mg < 63 µm boyutundaki mikroplastik katının 40 mL damıtılmış suya eklenmesiyle hazırlanmış ve partikül konsantrasyonu 0,6 mg mL^{-1} (veya 0,6 g L^{-1}) olacak şekilde ayarlanmıştır. Stok çözelti, partikül konsantrasyonunun homojenliğini sağlamak amacıyla 30 dakika boyunca sürekli olarak çalkalanmıştır. Daha sonra, 10 mL'lik polistiren gama sayım vialine alınan 1 mL stok çözeltisine aşağıdaki çözeltiler eklenmiştir:

- 0,5 mL kompleks oluşturmayan Tris-HCl tampon çözeltisi (pH = 8,0),
- 0,5 mL uraninit çözeltisi (21 Bq mL^{-1}; ^{238}U'nin tüm bozunma ürünleri seküler denge hâlindedir ve bunlar arasında ^{234}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb ve ^{210}Po bulunmaktadır),
- 0,1 mL ^{137}Cs çözeltisi (39 Bq mL^{-1}),
- 0,1 mL ^{207}Bi çözeltisi (71 veya bazı durumlarda 453 Bq mL^{-1}).

Numunelerin pH değerleri, 10 M sodyum hidroksit (NaOH) ve 9 M hidroklorik asit (HCl) çözeltileri kullanılarak ayarlanmış ve son hacim 9 mL'ye tamamlanmıştır. Böylece, nihai partikül konsantrasyonu 63 mg L^{-1} olarak elde edilmiştir. Bu konsantrasyon, birçok haliç ve kıyı sularında rapor edilen partikül konsantrasyonlarıyla karşılaştırılabilir düzeydedir. Örneğin, Changjiang (Yangtze) Haliçi'nde 5–288 mg L^{-1} arasında partikül konsantrasyonları bildirilmiştir. Benzer partikül konsantrasyonları Amazon Nehri'nin ağız kesiminde ve gölsel, akarsusal ve denizel ortamlardaki sediman-su ara yüzeyi ile dip nepheloid tabakalarında da rapor edilmiştir.

Dolayısıyla bu çalışma, partikül konsantrasyonlarının çalışmada kullanılan seviyelerle karşılaştırılabilir olduğu denizel kıyı ve haliç bölgeleri ile tatlı su gölleri ve nehirlerdeki çevresel koşulları temsil etmektedir. ^234Th ve ^226Ra, deneysel sistemde ortaya çıkan kütle dengesi problemleri nedeniyle nihai değerlendirmeye dâhil edilmemiştir. Gama spektrometrik analizlerde IAEA tarafından sertifikalandırılmış referans materyaller kullanılarak enerji ve verim kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Ultra düşük arka plan özellikli HPGe dedektörler kullanılarak yüksek duyarlılıkta aktivite ölçümleri gerçekleştirilmiştir.
Alfa spektrometrik analizlerde ise polonyumun gümüş disk üzerine kendiliğinden çöktürülmesi esas alınmış ve düşük arka planlı, 2–3 günlük sayım süreleri kullanılarak ^210Po aktiviteleri belirlenmiştir.
Elde edilen aktivite verilerinden radyonüklitlerin mikroplastik ve çözeltinin oluşturduğu katı-sıvı sistem içerisindeki dağılımı değerlendirilmiş ve dağılım katsayısı (Kd) kullanılarak nicel olarak ifade edilmiştir.

3. Değerlendirme

Çalışmada PVC, PS ve PA6 mikroplastiklerinin sucul ortamlarda ^210Po, ^207Bi, ^210Pb ve ^137Cs ile etkileşimleri ve bu radyonüklitlerin katı-sıvı fazlar arasındaki dağılım davranışları (Kd), pH, tuzluluk ve temas süresinin bir fonksiyonu olarak incelenmiştir.

Kontrollü laboratuvar deneylerinde <63 µm boyutundaki mikroplastik fraksiyonunun kullanılmasıyla, doğal sucul sistemlerdeki ince askıda partikül koşullarına benzer deneysel koşullar oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, mikroplastik türünün ve çevresel koşulların radyonüklitlerin sorpsiyon davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

İncelenen radyonüklitler arasında mikroplastiklere yönelik en yüksek sorpsiyon eğilimi ^210Po için gözlenirken, bunu sırasıyla ^207Bi, ^210Pb ve ^137Cs izlemiştir. Bu sonuç, radyonüklitlerin mikroplastiklerle etkileşimlerinin yalnızca partikül boyutu veya yüzey alanı tarafından değil, aynı zamanda radyonüklitin kimyasal özellikleri ile polimer yüzeyinin fizikokimyasal özellikleri arasındaki etkileşimler tarafından da kontrol edildiğini göstermektedir.

^210Po için sorpsiyon kapasitesi bakımından mikroplastikler PVC > PS > PA6 şeklinde sıralanmıştır. Buna karşılık ^207Bi, ^210Pb ve ^137Cs için sorpsiyon eğilimi genel olarak PS > PVC > PA6 şeklinde belirlenmiştir. Bu farklılıklar, radyonüklitlerin kimyasal özellikleri ile mikroplastiklerin yüzey özellikleri ve fonksiyonel grupları arasındaki etkileşimlerin önemini ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda mikroplastiklerin, sucul sistemlerde radyonüklitlerin çözünmüş faz ile partiküler faz arasındaki dağılımını değiştirebilecek potansiyel bir taşıyıcı faz olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

4. Sonuçlar

^210Po–PVC etkileşimi: ^210Po için PVC mikroplastiğinde pH koşullarına bağlı olarak belirlenen en yüksek dağılım katsayısı (Kd) 3,37 × 10^6 L/kg olarak bulunmuştur. Bu değerin denizel partikül madde için raporlanan değerlerle benzerlik göstermesi, PVC mikroplastiklerinin denizel ortamda radyonüklitlerin partiküler faza aktarılmasında önemli bir rol oynayabileceğine işaret etmektedir.

pH'ın etkisi: PVC mikroplastikleri için pH 7'nin üzerine çıktıkça Kd(^210Po) değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum, daha yüksek pH koşullarında ^210Po'nun mikroplastik partiküllerine olan afinitesinin artabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla pH değişimleri, ^210Po'nun çözünmüş ve partiküler fazlar arasındaki dağılımını ve buna bağlı olarak çevresel taşınımını etkileyebilecek önemli bir parametre olarak değerlendirilebilir.

Tuzluluğun etkisi: Tuzluluğun artmasıyla birlikte PVC için Kd(^210Po) değerlerinde artış gözlenmiştir. Tuzluluk 10 ppt olduğunda Kd değeri yaklaşık 1,1 × 10^4 L/kg, 28 ppt olduğunda ise 2,1 × 10^4 L/kg olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, özellikle nehir ağzı ve kıyısal geçiş bölgelerinde bulunan PVC mikroplastiklerinin ^210Po'nun partiküler faza aktarılmasında potansiyel bir substrat olarak işlev görebileceğini düşündürmektedir.

PS'nin davranışı: PS mikroplastiklerinde de PVC'ye benzer şekilde pH 8 ve 9 koşullarında daha yüksek Kd(^210Po) değerleri elde edilmiştir. Ortalama deniz suyu pH'sının yaklaşık 8,2 olması dikkate alındığında, PS mikroplastiklerinin denizel ortamlarda ^210Po ve benzer kimyasal davranış gösteren elementlerin tutulmasına katkıda bulunabileceği değerlendirilmektedir.

PA6'nın davranışı: PA6 mikroplastikleri, PVC ve PS'ye kıyasla daha düşük Kd(^210Po) değerleri göstermiştir. Bu durum, PA6'nın kimyasal yapısı, yarı kristalin morfolojisi ve yüzey özelliklerinin ^210Po ile etkileşimini diğer iki polimere göre sınırlandırdığını düşündürmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sonuçlar mikroplastiklerin sucul ortamlarda radyonüklitlerin çevresel kaderi açısından dikkate alınması gereken önemli bir partiküler faz olduğunu göstermektedir. Özellikle ^210Po gibi partikül reaktif radyonüklitlerin mikroplastiklere yüksek oranda bağlanabilmesi, mikroplastiklerin radyonüklitlerin taşınımı, yeniden dağılımı ve çevresel birikim süreçlerinde potansiyel bir taşıyıcı olarak rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 62, 1596–1605.

[2] Bianchi, T. S., Baskaran, M., DeLord, J., & Ravichandran, M. (1997). Carbon cycling in a shallow turbid estuary of Southeast Texas: The use of plant pigment biomarkers and water quality parameters. Estuaries, 20(2), 404–415. https://doi.org/10.2307/1352353

[3] Choy, C. A., & Drazen, J. C. (2013). Plastic for dinner? Observations of frequent debris ingestion by pelagic predatory fishes from the central North Pacific. Marine Ecology Progress Series, 485, 155–163.

[4] Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Ubeda, B., Hernández-León, S., Palma, Á. T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M. L., & Duarte, C. M. (2014). Plastic debris in the open ocean. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(28), 10239–10244.

[5] Cózar, A., Martí, E., Duarte, C. M., García-de-Lomas, J., van Sebille, E., Ballatore, T. J., Eguíluz, V. M., González-Gordillo, J. I., Pedrotti, M. I., Echevarría, F., Troublè, R., & Irigoien, X. (2017). The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the thermohaline circulation. Science Advances, 3, e1600582.

[6] Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: Sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects.EnvironmentalSciencesEurope, 28, 2.

[7] Gensac, E., Martinez, J.-M., Vantrepotte, V., & Anthony, E. J. (2016). Seasonal and interannual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon River: The role of continental and oceanic forcing, and implications for coastal geomorphology and mud bank formation. Continental Shelf Research, 118, 49–62.

[8] Huang, D., Du, J., Moore, W. S., & Zhang, J. (2013). Particle dynamics of the Changjiang Estuary and adjacent coastal region determined by natural particle-reactive radionuclides (^7Be, ^210Pb, and ^234Th). Journal of Geophysical Research: Oceans, 118, 1736–1748.

[9] Johansson, L. Y. (2008). Determination of Pb-210 and Po-210 in aqueous environmental samples (Doctoral dissertation). Gottfried Wilhelm Leibniz University, Hannover, Germany.

[10] Kim, G., Kim, T. H., & Church, T. M. (2012). Po-210 in the environment: Biogeochemical cycling and bioavailability. In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry (pp. 271–284). Springer, Berlin, Heidelberg.

[11] Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., et al. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. The Lancet, 391, 462–512. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0

[12] Law, K. L., & Thompson, R. C. (2014). Microplastics in the seas. Science, 345(6193), 144–145.

[13] Li, Y.-H., Burkhardt, L., Buchholtz, M., O'Hara, P., & Santschi, P. H. (1984). Partition of radiotracers between suspended particles and seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48, 2011–2019.

[14] Missimer, T. M., Teaf, C., Maliva, R. G., Danley-Thomson, A., Covert, D., & Hegy, M. (2019). Natural radiation in the rocks, soils, and groundwater of Southern Florida with a discussion on potential health impacts. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(10), 1793. https://doi.org/10.3390/ijerph16101793

[15] Niedermiller, J., & Baskaran, M. (2019). Comparison of the scavenging intensity, remineralization, and residence time of ^210Po and ^210Pb at key zones (biotic, sediment–water and hydrothermal) along the East Pacific GEOTRACES transect. Journal of Environmental Radioactivity, 198, 165–188.

[16] Nyffeler, U. P., Li, Y.-H., & Santschi, P. H. (1984). A kinetic approach to describe trace element distribution between particles and solution in natural aquatic systems. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48, 1513–1522.

[17] Rutgers van der Loeff, M. M., & Geibert, W. (2008). U- and Th-series nuclides as tracers of particle dynamics, scavenging and biogeochemical cycles in the oceans. In Radioactivity in the Environment (pp. 227–268).

[18] Rutgers van der Loeff, M., Kühne, S., Wahsner, M., Höltzen, H., Frank, M., Ekwurzel, B., Mensch, M., & Rachold, V. (2003). ^228Ra and ^226Ra in the Kara and Laptev Seas. Continental Shelf Research, 23, 113–124.

[19] Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G., & Zhang, P. (2019). Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. Science of the Total Environment, 691, 848–857. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209

[20] Wang, J., Zhong, Q., Baskaran, M., & Du, J. (2019). Investigations on the time-series partitioning of ^210Pb, ^207Bi and ^210Po between marine particles and solution under different salinity and pH conditions. Chemical Geology, 528, 119275. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119275

[21] Wang, W., Ndungu, A. W., Li, Z., & Wang, J. (2017). Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China. Science of the Total Environment, 575, 1369–1374. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.213

[22] Plastics Europe. (2015). Plastics – The Facts 2014/15. Plastics Europe, Brussels.

[23] The Lancet Planetary Health. (2018). Can Europe lead the transformation of the plastic pollution crisis? The Lancet Planetary Health, 2, e274. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30142-6

Koruyucu Toprak İşleme ve Doğrudan Ekimin Silajlık Mısırda Su Verimliliğine Etkileri

Mesut Cemal ADIGÜZEL*
DSİ 8. Bölge Müdürlüğü, Arazi Toplulaştırma ve TİGH Şubesi, Erzurum-Türkiye, Orcid no: 0009-0003-2287-5297
mesutcemal@yahoo.com

Üstün ŞAHİN
Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü Öğretim Üyesi, Erzurum-Türkiye, Orcid no: 0000-0002-1924-1715
ussahin@atauni.edu.tr

Zinnur GÖZÜBÜYÜK
Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Tarımsal Mekanizasyon ve Bilişim Teknolojileri Bölümü, Erzurum-Türkiye, Orcid no:: 0000-0003-1085-6067
zinnur.gozubuyuk2001@tarimorman.gov.tr

Anahtar Kelimeler: koruyucu toprak işleme, doğrudan ekim, silajlık mısır, su kullanım etkinliği, yarı kurak iklim, sürdürülebilir su yönetimi

1. Amaç

Su kaynaklarının giderek azalması, yağışların düzensizleşmesi ve tarımsal sulama maliyetlerinin artması, bitkisel üretimde mevcut suyun daha etkin kullanılmasını zorunlu hâle getirmektedir. Özellikle yağışın sınırlı ve buharlaşmanın yüksek olduğu yarı kurak iklim bölgelerinde, yalnızca sulama suyu miktarının artırılmasına dayanan üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği giderek azalmaktadır. Bu nedenle toprağın su alma, depolama ve bitkiye iletme kapasitesini geliştiren, yüzey akışı ve buharlaşma kayıplarını azaltan üretim yöntemlerinin yaygınlaştırılması önem taşımaktadır [1].

Geleneksel toprak işleme sistemlerinde pulluk ve ikincil toprak işleme aletleriyle gerçekleştirilen çok sayıdaki işlem, kısa dönemde uygun bir tohum yatağı oluşturabilmesine rağmen toprağın aşırı karıştırılmasına, agregat yapısının bozulmasına, organik maddenin daha hızlı ayrışmasına ve erozyon riskinin artmasına yol açabilmektedir. Toprak yüzeyinin bitki artıklarından arındırılması, yağış ve sulama suyunun yüzey akışına geçmesini kolaylaştırırken toprağın doğrudan güneş ve rüzgâr etkisine açık kalması buharlaşma kayıplarını artırabilmektedir. Ayrıca yoğun toprak işleme yakıt tüketimini, iş gücü gereksinimini, makine kullanım süresini, tarla trafiğini ve üretim maliyetlerini yükseltmektedir [2, 3].

Koruyucu toprak işleme, toprağa yapılan mekanik müdahaleyi azaltan ve bitki artıklarının önemli bir bölümünü yüzeyde bırakan üretim sistemlerini kapsamaktadır. Yüzeyde korunan bitki artıkları yağmur damlalarının toprağa doğrudan çarpma hızını, yüzey kabuklaşmasını ve erozyonu azaltmakta, suyun toprağa girişini kolaylaştırarak toprak neminin daha uzun süre korunmasına katkı sağlamaktadır. Toprak işlemenin azaltılması, tarla geçiş sayısını ve yakıt tüketimini düşürerek enerji kullanım etkinliğini artırmaktadır. Uzun dönemde bu uygulamalar toprak organik maddesinin korunmasına, agregat stabilitesinin ve biyolojik aktivitenin geliştirilmesine ve toprak kalitesinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunabilmektedir [2–5].

Doğrudan ekim, koruyucu toprak işleme sistemlerinin toprağa en az müdahale edilen biçimidir. Bu yöntemde toprak önceden işlenmeden, tohum özel ekim makineleriyle anızla kaplı toprağa doğrudan ekilmektedir. Böylece tohum yatağı hazırlamak amacıyla yapılan sürüm işlemleri ortadan kaldırılmakta iş gücü, zaman, yakıt ve makine giderlerinden tasarruf sağlanabilmektedir. Doğrudan ekimin silajlık mısırda çıkış oranı ve tarla işlem etkinliği bakımından olumlu sonuçlar verdiğini ve azaltılmış toprak işleme sistemleriyle birlikte uygulanabileceğini bildirmiştir [6]. Bununla birlikte doğrudan ekimin etkileri toprak bünyesi, iklim koşulları, anız miktarı, yabancı ot yönetimi, ekim makinesinin özellikleri ve uygulama süresine göre değişebilmektedir [6, 7].

Silajlık mısır, yüksek biyokütle ve enerji içeriği nedeniyle hayvancılık işletmelerinin kaliteli kaba yem ihtiyacının karşılanmasında önemli bir üründür. Ancak yüksek biyokütle üretimi nedeniyle yetişme dönemi boyunca yeterli ve zamanında suya ihtiyaç duymaktadır. Yarı kurak iklim koşullarında silajlık mısırın su tüketimi, yeşil ot verimi ve su kullanım etkinliğinin sulama düzeyinden önemli ölçüde etkilendiğini belirlemiştir [8]. Doğu Anadolu Bölgesi'nin yüksek rakımı, kısa yetişme dönemi, düzensiz yağışları ve sınırlı sulama olanakları dikkate alındığında, toprak nemini koruyan ve kullanılan her birim sudan daha fazla ürün elde edilmesini sağlayan yöntemlerin belirlenmesi önem kazanmaktadır [8].

Bu çalışmanın amacı, yüksek rakımlı yarı kurak iklim koşullarında geleneksel toprak işleme, azaltılmış toprak işleme ve doğrudan ekim yöntemlerinin silajlık mısırın mevsimlik su tüketimi, sulama suyu kullanım etkinliği, su kullanım etkinliği, silajlık verimi ve kuru madde verimi üzerindeki etkilerini belirlemektir. Ayrıca farklı yöntemlerin toprak neminin korunması ile toprağın fiziksel ve hidrolik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilerek, su kaynaklarının daha etkin kullanılmasına olanak sağlayan uygun üretim yönteminin ortaya konulması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Araştırma Alanı

Araştırma, Erzurum ili Pasinler ilçesinde bulunan Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü Pasinler Araştırma İstasyonu'nda 2015-2016 yılları arasında yürütülmüştür. Araştırma alanı yaklaşık 1800 m rakıma sahip olup tipik karasal iklim özellikleri göstermektedir. Deneme yetiştirme sezonu boyunca toplam 62,6 mm yağış gerçekleşmiştir.

2.2 Deneme Deseni ve Uygulamalar

Deneme tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Araştırmada üç farklı toprak işleme–ekim yöntemi karşılaştırılmıştır:

- GT: Geleneksel toprak işleme (pulluk + diskli tırmık + kombikürüm + ekim makinesi)
- AT: Azaltılmış toprak işleme (dik rotovatör + ekim makinesi)
- DE: Doğrudan ekim (anıza doğrudan ekim makinesi)

2.3 Sulama Uygulamaları

Toprak nemi, bitkinin 0–90 cm etkili kök bölgesinde 30 cm'lik katmanlar hâlinde gravimetrik yöntemle izlenmiştir. Ölçümler sezon başlangıcında, her ayın 10, 20 ve 30/31. günlerinde, her sulamadan önce ve hasat döneminde yapılmış, belirlenen nem değerleri katman kütle yoğunlukları kullanılarak milimetre su yüksekliğine dönüştürülmüştür. Sezon başlangıcında 0–90 cm toprak profilinde yaklaşık 236 mm su bulunduğu belirlenmiştir. Deneme alanında aynı profil için tarla kapasitesi 261,97 mm, solma noktası 138,04 mm ve toplam yarayışlı su kapasitesi 123,93 mm olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Sulamalar, yarayışlı suyun yaklaşık %50'si tüketildiğinde, başka bir ifadeyle profil nemi yaklaşık 200 mm düzeyine düştüğünde sulamalar yüzey üstü damla sulama sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Yetişme dönemi boyunca beş sulamada toplam 169,6 mm sulama suyu verilmiştir.

Tablo 1. Deneme öncesinde belirlenen toprak su sabiteleri

Toprak derinliği (cm)	Kütle yoğunluğu (g/cm³)	Tarla kapasitesi (mm)	Solma noktası (mm)	Yarayışlı su (mm)
0–30	1,30	87,75	46,02	41,73
30–60	1,35	87,48	46,98	40,50
60–90	1,39	86,74	45,04	41,70
0–90	—	261,97	138,04	123,93

2.4 Ölçüm ve Değerlendirmeler

Bitki su tüketimi su bütçesi yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) ve su kullanım etkinliği (WUE) belirlenmiştir [9]. Ayrıca bitki gelişim özellikleri, silaj verimi ve kuru madde verimi ölçülerek değerlendirilmiştir.

3. Değerlendirme

Bitki su tüketimi su bütçesi yöntemiyle hesaplanmıştır. Yetiştirme döneminde 62,6 mm yağış gerçekleşmiş ve 169,6 mm sulama suyu uygulanarak toplam 232,2 mm dış su girdisi sağlanmıştır. Taban suyunun derinde, yağışın düşük ve sulamanın kontrollü damla sulama yöntemiyle yapılması nedeniyle kapilar yükselme, derine sızma ve yüzey akışı ihmal edilmiştir. Sezon başlangıcı ile hasat arasındaki 0–90 cm toprak su deposu azalması geleneksel, azaltılmış ve doğrudan ekim yöntemlerinde sırasıyla 57,8, 48,2 ve 41,0 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin yağış ve sulama suyu toplamına eklenmesiyle mevsimlik bitki su tüketimi sırasıyla 290,0, 280,4 ve 273,2 mm olarak hesaplanmıştır. Doğrudan ekim yöntemi, geleneksel yönteme göre yaklaşık %5,8 daha düşük su tüketimi sağlayan uygulama olmuştur.

Bitki gelişim parametrelerinde doğrudan ekim uygulamasında daha yüksek bitki boyu, ilk boğum uzunluğu ve yaprak oranı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca tarla filizi çıkışı ve çıkış derecesi bakımından da doğrudan ekim uygulaması diğer yöntemlerden daha başarılı bulunmuştur.

Silajlık verim, geleneksel toprak işleme, azaltılmış toprak işleme ve doğrudan ekim yöntemlerinde sırasıyla 77,8, 76,9 ve 85,0 t ha^{-1}, kuru madde verimi ise aynı sırayla 15,4, 16,2 ve 18,3 t ha^{-1} olarak belirlenmiştir. Doğrudan ekim yöntemi, geleneksel ve azaltılmış toprak işlemeye göre silajlık verimde sırasıyla yaklaşık %9,3 ve %10,5, kuru madde veriminde ise %18,8 ve %13,0 artış sağlamıştır. Doğrudan ekimde en yüksek silajlık ve kuru madde verimlerinin, aynı zamanda en düşük mevsimlik su tüketimiyle birlikte elde edilmesi, bu yöntemin mevcut suyu daha etkin biçimde ürüne dönüştürdüğünü ve silajlık mısır üretiminde önemli bir üstünlük sağladığını göstermektedir.

4. Sonuçlar

Su dengesi ve araştırma koşulları: Araştırmada geleneksel toprak işleme (GT), azaltılmış toprak işleme (AT) ve doğrudan ekim (DE) yöntemleri yüksek rakımlı yarı kurak iklim koşullarında karşılaştırılmıştır. Yetiştirme döneminde 62,6 mm yağış ve 169,6 mm sulama suyu olmak üzere toplam 232,2 mm su girişi gerçekleşmiştir. Mevsimlik su tüketiminin 273,2–290,0 mm arasında değişmesi, bitkilerin yağış ve sulamanın yanında ekim öncesinde toprak profilinde depolanmış sudan da yararlandığını göstermiştir.

Mevsimlik su tüketimi: Silajlık mısırın mevsimlik su tüketimi GT, AT ve DE uygulamalarında sırasıyla 290,0, 280,4 ve 273,2 mm olmuştur. Doğrudan ekimde tüketim GT'ye göre 16,8 mm, yani %5,8, AT'ye göre 7,2 mm, yani %2,6 daha düşük gerçekleşmiştir. Bu sonuç, DE uygulamasında yüzeyde korunan anızın buharlaşmayı sınırlandırdığını ve topraktaki suyun yetişme dönemi boyunca daha kontrollü kullanılmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Toprakta depolanan suyun kullanımı: Yağış ve sulama toplamı ile mevsimlik su tüketimi arasındaki fark GT, AT ve DE uygulamalarında sırasıyla 57,8, 48,2 ve 41,0 mm olarak hesaplanmıştır. Su bütçesine göre bu fark, büyük ölçüde başlangıçta kök bölgesinde bulunan suyun bitki tarafından kullanılmasından kaynaklanmıştır. GT'de depolanmış suyun daha fazla tüketilmesi, hasatta daha düşük toprak nemi kalmasıyla uyumludur.

Hasat dönemi toprak nemi: Hasat dönemindeki ortalama toprak nemi GT, AT ve DE uygulamalarında sırasıyla yaklaşık %14,7, %15,5 ve %16,1 olarak belirlenmiştir. Doğrudan ekimde GT'ye göre 1,4 yüzde puan daha fazla nem kalmıştır. Bu durum, anız örtüsünün toprağı doğrudan güneş ve rüzgâr etkisinden koruması, yüzey buharlaşmasını azaltması ve suyun toprak profilinde daha uzun süre tutulmasını desteklemesiyle açıklanabilir.

İnfiltrasyon özellikleri: En yüksek kararlı ve ortalama infiltrasyon hızları doğrudan ekimde elde edilmiştir. Bu uygulamada kararlı infiltrasyon hızı yaklaşık 135 mm h^{-1}, ortalama infiltrasyon hızı ise 175 mm h^{-1} olarak belirlenmiştir. GT ve AT değerleri daha düşük kalmıştır. DE'de eski kök kanallarının, biyolojik gözeneklerin ve sürekli makro gözeneklerin korunması, suyun profile girişini kolaylaştırmış yüzey akışı ve erozyon riskinin azaltılması bakımından avantaj sağlamıştır.

Toprağın su tutma özellikleri: Toprak pF eğrileri genel olarak birbirine yakın seyretmiş ve yöntemler toprağın temel su tutma karakteristiğinde belirgin bir ayrışma oluşturmamıştır. Buna karşılık DE'de daha yüksek hasat nemi ve infiltrasyon değerlerinin elde edilmesi, yöntemin kısa dönemde su tutma

eğrisinden çok suyun toprağa girişi, yüzeyde korunması ve profil içindeki dağılımı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.
Tarla filizi çıkışı: Tarla filizi çıkış oranları GT, AT ve DE uygulamalarında sırasıyla yaklaşık %87, %97 ve %99 olmuştur. DE uygulaması GT'ye göre çıkışı 12, AT'ye göre 2 yüzde puan artırmıştır. Tohumun nemli bölgeye yerleştirilmesi ve anız örtüsü sayesinde tohum çevresindeki nemin korunması, doğrudan ekimde daha düzenli çıkış ve uygun bir bitki sıklığı elde edilmesine katkıda bulunmuştur.

Silajlık mısır verimi: Silajlık verimler GT, AT ve DE uygulamalarında sırasıyla 77,8, 76,9 ve 85,0 t ha^{-1} olarak belirlenmiştir. En yüksek verim DE'de elde edilmiş ve yöntemler arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. DE, GT'ye göre 7,2 t ha^{-1} ve %9,3, AT'ye göre 8,1 t ha^{-1} ve %10,5 daha yüksek verim sağlamıştır. Bu üstünlük, başarılı çıkış, yüksek toprak nemi, gelişmiş infiltrasyon ve suyun daha etkin kullanılmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Kuru madde verimi: Kuru madde verimleri GT, AT ve DE'de sırasıyla 15,4, 16,2 ve 18,3 t ha^{-1} olmuştur. DE uygulaması GT'ye göre 2,9 t ha^{-1} ve %18,8, AT'ye göre 2,1 t ha^{-1} ve %13,0 daha yüksek kuru madde verimi vermiştir. AT de GT'den %5,2 daha yüksek değer sağlamıştır. Böylece doğrudan ekimin yeşil ürün veriminin yanında yem değeri açısından önemli kuru madde üretimini de artırdığı belirlenmiştir.

Su kullanım etkinliği: Su kullanım etkinliği (WUE) GT, AT ve DE uygulamalarında sırasıyla 0,268, 0,274 ve 0,311 t ha^{-1} mm^{-1} olarak hesaplanmıştır. Bu değerler 26,8, 27,4 ve 31,1 kg m^{-3} suya karşılık gelmektedir. DE'nin WUE değeri GT'den yaklaşık %16,0, AT'den %13,4 daha yüksek olmuştur. Dolayısıyla doğrudan ekim daha düşük mevsimlik su tüketimine rağmen birim tüketilen su başına daha fazla silaj üretmiştir.

Sulama suyu kullanım etkinliği: Tüm yöntemlere 169,6 mm sulama suyu verilmiştir. Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) GT, AT ve DE'de sırasıyla 0,459, 0,453 ve 0,501 t ha^{-1} mm^{-1}, başka bir ifadeyle 45,9, 45,3 ve 50,1 kg m^{-3} olarak belirlenmiştir. DE, birim sulama suyundan elde edilen silaj miktarını GT'ye göre %9,3, AT'ye göre %10,5 artırarak sulama suyundan en yüksek ekonomik ve biyolojik yararı sağlamıştır.

Azaltılmış toprak işlemenin genel performansı: AT, GT'ye göre mevsimlik su tüketimini %3,3 azaltmış, hasat nemini, tarla çıkışını ve kuru madde verimini artırmıştır. Bununla birlikte bu iyileşmeler silajlık verim ve IWUE'ye aynı düzeyde yansımamıştır. Bu nedenle AT, geleneksel işlemeye göre toprağı daha az bozan ve nemi daha iyi koruyan bir uygulama olmakla birlikte, doğrudan ekime geçemeyen işletmeler için ara seçenek olarak değerlendirilebilir.

Genel değerlendirme: Bulgular birlikte değerlendirildiğinde DE daha düşük su tüketimi, daha yüksek hasat nemi ve infiltrasyon, başarılı tarla çıkışı, yüksek silajlık ve kuru madde verimi ile daha yüksek WUE ve IWUE değerleri sağlayarak en avantajlı yöntem olmuştur.

Uygulamaya yönelik sonuç: Uygun anız yönetimi, yabancı ot kontrolü ve ekim makinesi kullanılması koşuluyla doğrudan ekimin yüksek rakımlı yarı kurak iklim koşullarında sürdürülebilir bir seçenek olarak yaygınlaştırılması önerilebilir. Ancak sonuçların farklı yıllar ve toprak koşullarındaki uzun süreli çalışmalarla doğrulanması gerekmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J. ve Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. Agricultural Water Management, 97(4), 543–550. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.009

[2] Hobbs, P. R., Sayre, K. ve Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1491), 543–555. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169

[3] Dahiya, R., Ingwersen, J. ve Streck, T. (2007). The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling. Soil and Tillage Research, 96(1–2), 52–63. https://doi.org/10.1016/j.still.2007.02.004

[4] Lipiec, J., Kuś, J., Słowińska-Jurkiewicz, A. ve Nosalewicz, A. (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. Soil and Tillage Research, 89(2), 210–220. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.012

[5] Wang, X., Dai, K., Zhang, D., Zhang, X., Wang, Y., Zhao, Q., Cai, D., Hoogmoed, W. B. ve Oenema, O. (2011). Dryland maize yields and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China. Field Crops Research, 120(1), 47–57. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.08.010

[6] Bayhan, Y., Kayışoğlu, B., Gönülol, E., Yalçın, H. ve Sungur, N. (2006). Possibilities of direct drilling and reduced tillage in second crop silage corn. Soil and Tillage Research, 88(1–2), 1–7. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.04.012

[7] Chen, Y., Liu, S., Li, H., Li, X. F., Song, C. Y., Cruse, R. M. ve Zhang, X. Y. (2011). Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China. Soil and Tillage Research, 115–116, 56–61. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.007

[8] Kiziloglu, F. M., Sahin, U., Kuslu, Y. ve Tunc, T. (2009). Determining water–yield relationship, water use efficiency, crop and pan coefficients for silage maize in a semiarid region. Irrigation Science, 27(2), 129–137. https://doi.org/10.1007/s00271-008-0127-y

[9] Howell, T. A., Cuenca, R. H. ve Solomon, K. H. (1990). Crop yield response. İçinde G. J. Hoffman, T. A. Howell ve K. H. Solomon (Ed.), Management of Farm Irrigation Systems (ss. 93–122). American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA.

Sulama Şebekelerinde Deterministik Yöntemlerle BKV Konumlandırma ve Tam Maliyet Optimizasyonu

Gökhan AYNA*
DSİ 11. Bölge Müdürlüğü, DSİ 113. Şube Müdürlüğü Tekirdağ, https://orcid.org/0000-0001-6047-1291
gokhanayna@dsi.gov.tr

Hayrullah AĞAÇCIOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi İstanbul, https://orcid.org/0000-0002-1860-9848
agacci@yildiz.edu.tr

Anahtar Kelimeler: sulama sistemleri, basınç kırıcı vana, optimizasyon, tasarım optimizasyonu

1. Amaç

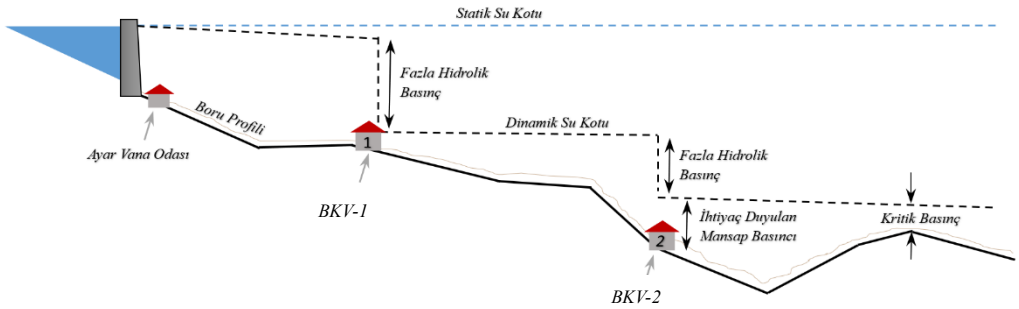
Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kullanılabilir suyun büyük çoğunluğu tarımsal sulama sektörü tarafından kullanılmaktadır. İklim değişikliğinin ezici etkilerinin hissedildiği son yıllarda yapılan yatırımlar ile açık kanallı sulama sistemlerinin yerini hızla kapalı sulama sistemleri almaktadır. Kapalı sulama sistemleri şebekenin basınç sınıfına göre alçak basınçlı, orta basınçlı ve yüksek basınçlı olarak kategorize edilmektedir. Orta ve yüksek basınçlı sulama sistemlerinin tasarımında, şebeke ilk yatırım maliyetini çok fazla arttırmadan basınç taleplerini karşılamak için tüm şebekenin bütünleşik bir bakış açısıyla değerlendirilmesi gerekir. Büyük ve karmaşık sulama sistemlerinde bu ancak bilgisayar yazılımları sayesinde yürütülen optimizasyon algoritmaları ile mümkün olmaktadır.

Çalışmanın amacı, sulama sistemleri tasarımında kullanılmak üzere, basınç kırıcı vana odalarının optimum konumlarını ve sayısını belirlerken aynı zamanda şebekenin statik basınç sınıflarına göre tanımlanan gerçekçi birim fiyatlar ile tam bir şebeke minimum maliyet analizini yaparak en uygun boru çaplarını belirleyen bir optimizasyon aracı geliştirmektir. Bu amaçla Python programlama dili [1] ve PYOMO [2] optimizasyon paketi kullanılarak kapsamlı bir tasarım aracı geliştirilmiştir. Bu tasarım aracı CPLEX çözücüsünü kullanarak en karmaşık dal sulama şebekelerini bile herhangi bir düğüm noktası sınırlaması olmadan verimli bir sürede çözebilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

Sulama sistemleri optimizasyonunda en önemli parametreler maksimum ve minimum su seviyeleridir. Maksimum su seviyesine göre şebeke basınç sınıfları belirlenir. Minimum su seviyesinden vana odası yersel yük kaybı düşülerek başlangıç piyezometre kotu belirlenir. Şebekenin kritik basınç bölgelerindeki dinamik basınçlar, başlangıç piyezometre kotundan boru hattı boyunca meydana gelen sürekli yük kayıplarının çıkarılmasıyla belirlenir. Şekil 1'de temsili bir şebeke profilinde statik ve dinamik su seviyelerinin değişimleri gösterilmiştir. Doğal olarak, tüm şebeke genelindeki dinamik basınç seviyelerini hesaplamak için, şebekenin kritik düğüm noktalarına ait topografik verilerin yanı sıra, projede kullanılacak başlıca boru tiplerinin listesi, ticari boru iç çapları ve bunlara karşılık gelen birim maliyetleri önceden belirlenmelidir. Bunlara ilave olarak hidrant debisi ve teorik parsel alanı, sulama modülü, günlük sulama süresi ve net sulama alanı, düğüm noktası debilerinin hesaplanması için kullanılan Clement metodunun [3], [4] önemli parametreleridir. Tüm bu parametreler oluşturulan data dosyasında tanımlanır.



Şekil 1. Temsili şebeke profili [5]

2.2 Yük Kayıplarının Hesaplanması

Bu çalışmada Hazen-Williams sürekli yük kaybı ifadesinden faydalanılmıştır. Su dağıtım şebekelerinin yük kaybı hesaplarında sıklıkla kullanılan denklem, yapısı nedeniyle karmaşık sistemlerin çözümünde önemli avantajlar sağlamaktadır.

2.3 Matematiksel Model ve Optimizasyon Algoritması

2.3.1 Maliyet kriterleri

Sulama şebekelerinde maliyet hesaplamalarında en büyük pay boru birim fiyatlarına aittir. Bu çalışmada kullanılan birim maliyetler Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan 2025 yılı birim fiyat kılavuzundan alınmıştır [6]. Ticari boru çaplarının kullanılabilecek tüm basınç sınıfları ve bunların iç çapları ile birim maliyetleri data dosyasında bir kütüphane olarak tanımlanmaktadır. BKV odaları için ise boru çapına bağlı olarak aşağıdaki (Eşitlik 1) ifade kullanılmıştır [7, 8].

$$C_{BKV} = 6{,}7D_{BKV}^{1{,}3} \tag{1}$$

D_{BKV} BKV odasının bağlı bulunduğu boru çapı, C_{BKV} BKV birim maliyetidir. Şebekenin BKV olmadan toplam maliyeti için bir başlangıç optimizasyonu yapılır. Bu optimizasyon sonucunda elde edilen maliyet değeri, BKV'siz durumda meydana gelebilecek yüksek basınçların yol açacağı işletme ve bakım masrafları göz önüne alınarak, ikincil optimizasyon döngülerinde %10 arttırılmış olarak kullanılır. BKV odalarının konumlarına karar verildiği ikincil optimizasyon döngülerinde BKV'siz ilk maliyet kıyaslaması yapılarak BKV odalarının oluşturduğu ilave yatırım maliyeti de değerlendirilmektedir.

2.3.2 Optimizasyon parametreleri

Optimizasyon algoritmalarında 3 temel parametre bulunmaktadır. Bunlar karar değişkenleri, sınırlamalar ve amaç fonksiyonudur. Optimizasyon modellerinin en temel parametresi karar değişkenleridir.

Bu çalışmada her iki düğüm noktası arasında önceden tanımlanmış bir listeden seçilen $B_{s,j}$ birim maliyet değeri ile ikili sayı sistemi ile belirlenen $K_{s,j}$ karar değişkenlerinin çarpımı olarak boru birim maliyeti (B_s) hesaplanır (Eşitlik 2).

$$B_s = \sum_{j=1}^{N} K_{s,j}.\ B_{s,j} \tag{2}$$

Burada B_s, s düğüm noktası ile bir önceki $s-1$ düğüm noktası arasındaki boru segmenti için optimizasyon tarafından belirlenen hidrolik eğimi oluşturan boru çapının birim maliyet değeridir. s indisi $s = 1, \dots, S$ olarak tanımlanmış olup, burada S ilgili hat üzerindeki toplam düğüm sayısıdır. j indisi ise $j = 1, \dots, N$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca N, herhangi iki düğüm noktası arasındaki bir boru segmenti için hesaplanan hidrolik eğimlerin toplam sayısını temsil eder [9]. Amaç fonksiyonunda yer almasa da mansap basınç taleplerini kontrol etmede kullanılan sınırlamalarda yer alan J_s değişkeni benzer şekilde hesaplanmaktadır.

Sınırlamalar optimizasyonun global minimum veya maksimuma ulaşmasında arama alanını daraltan çok önemli parametrelerden biridir [10]. Sulama sistemleri tasarımı optimizasyonlarında sınırlamaların olmadığı durumda çözüme ulaşmak mümkün olmayacaktır. Bunun en temel nedeni boru içi akış hızlarının boru çapı ve yük kaybı ile üstel bir ilişkisinin olmasıdır.
Bu nedenle minimum basınç taleplerinin karşılanması için aşağıdaki ifade (Eşitlik 3) sınırlama olarak tanımlanmıştır [9]:

$$P_s = MWL - \sum J_s.L_s - \sum H_w \geq minP_s \tag{3}$$

Burada; MWL minimum su seviyesi (m), L_s s düğüm noktası ile bir önceki düğüm noktası arasındaki boru uzunluğu (m), H_w w konum kombinasyonundaki türbinde elektrik üretimi yoluyla oluşan yük kaybı (m) ve $minP_S$ S düğüm noktasındaki minimum basınç talebidir (m).
Ayrıca, membadan mansaba doğru boru çaplarının küçülerek seçilmesi için aşağıdaki ifade (Eşitlik 4) sınırlama olarak tanımlanmıştır:

$$D_{s-1} \geq D_s \tag{4}$$

Son olarak ikili karar değişkeni $K_{s,j}$ 'nin aldığı değerler ile her düğüm aralığında sadece bir birim maliyet veya hidrolik eğim değerinin seçildiğini garanti etmek için aşağıdaki ifade (Eşitlik 5) sınırlama olarak tanımlanmıştır:

$$\sum_{j=1}^{N} K_{s,j} = 1 \tag{5}$$

Her iki düğüm noktası arasında daha önceden hesaplanan listeden sadece 1 hidrolik eğim değerinin (J_s) seçilmesi için her boruda "binary" olarak seçilen karar değişkenlerinin ($K_{s,j}$) toplamının 1 olması gerekmektedir [9].

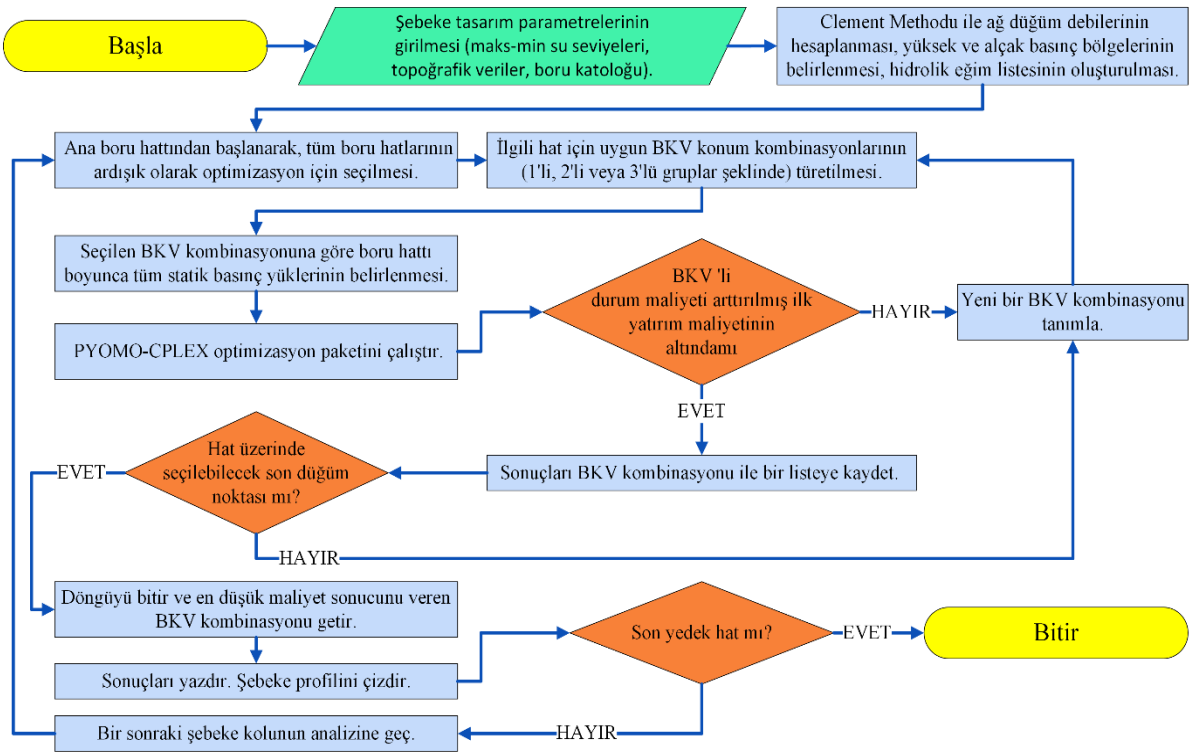
Amaç fonksiyonu ise BKV'lerin toplam maliyeti ve boru maliyetlerinin toplamı şeklinde aşağıdaki ifade (Eşitlik 6) ile tanımlanmıştır:

$$minimize \left\{ F_1 = \sum_{s=1}^{S} (B_s \cdot L_s) + \sum_{v=1}^{V} (C_V) \right\} \tag{6}$$

Burada; F_1 amaç fonksiyonu, S ilgili hattaki toplam düğüm sayısı, B_s boru birim maliyeti (TL/m), L_s iki düğüm noktası arasındaki boru uzunluğu (m), C_V BKV maliyeti ve V toplam BKV sayısıdır.

2.3.2 Optimizasyon algoritması

Optimizasyon algoritmaları, karar değişkenlerini kullanarak tanımlanan sınırlamalar çerçevesinde amaç fonksiyonunu global minimum veya maksimuma ulaştırma yollarını tarif eden mantıksal direktifler bütünüdür. BKV odalarının en uygun konumları ve basınç sınıflarına göre tanımlanan optimum iç çapların belirlenmesinde Şekil 2'de gösterilen akış şeması kullanılmıştır. Şema özetle, basınç kırıcı vana odalarına ait kombinasyonları, boruların o kombinasyona göre belirlenen statik basınç sınıflarındaki iç çapları ile birlikte PYOMO optimizasyon fonksiyonuna gönderen döngüsel bir metodu göstermektedir.



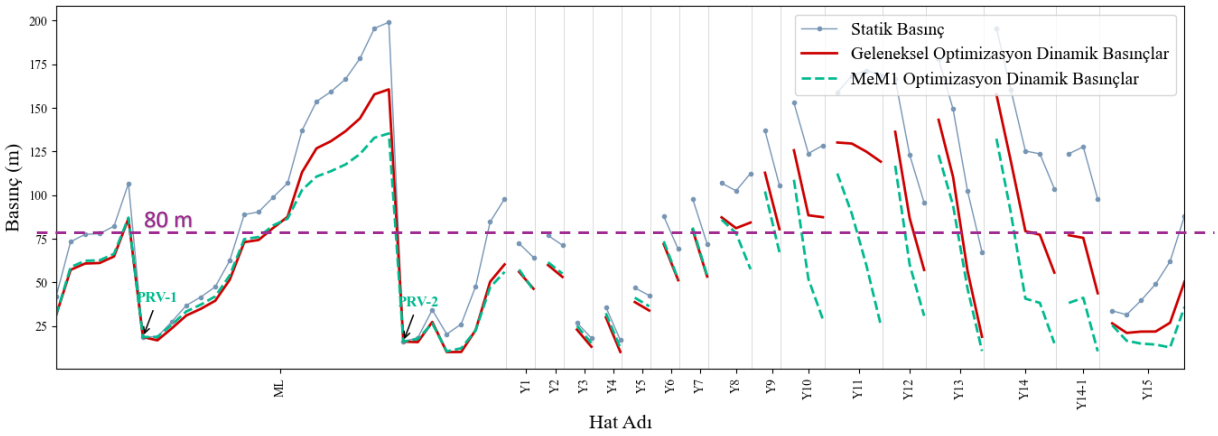
Şekil 2. Akış şeması

2.4. Model Uygulanması

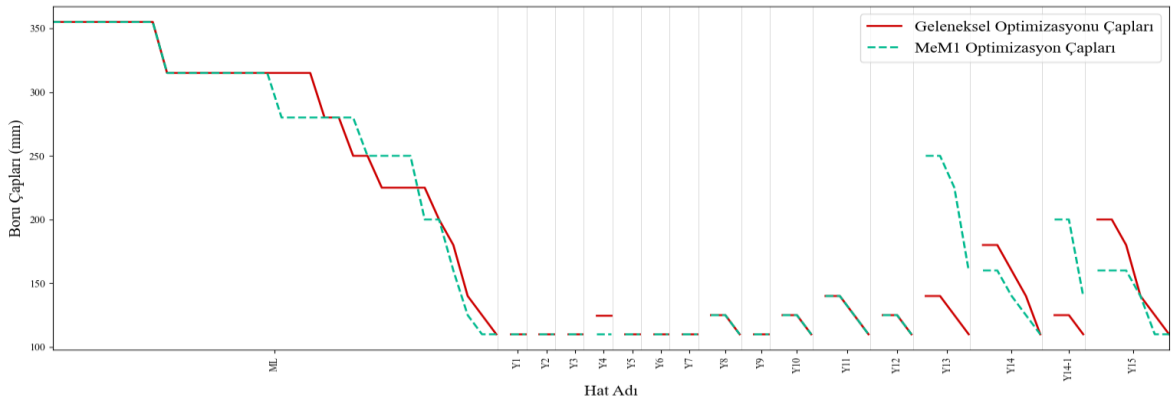
Bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon metodu 79 düğüm noktası ile temsil edilen 40 adet sulama hidrantına sahip yüksek basınçlı olarak planlanan temsili bir sulama sisteminde uygulanmıştır. Yapılan uygulamada hat başı statik su kotu 1564,82 m, başlangıç piyezometre kotu 1554,60 m olarak belirlenmiş ve sulama modülü 0,71 lt/s/ha olarak seçilmiştir. Ayrıca borularda hız kriteri minimum 0,5 m/s, maksimum 2,5 m/s olarak belirlenmiştir. Bu örnek sulama sistemine uygulanan yeni metoda ait sonuçlar, PN8 basınç sınıfındaki boruların iç çapları ve birim fiyatları kullanılarak gerçekleştirilen geleneksel optimizasyon uygulamasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular Şekil 3'te ve Şekil 4'te gösterilmektedir.

Buna göre; statik basıncı 80 metre altında olan bölgelerde boru çap seçimleri büyük oranda benzerlik göstermekte iken 80 metre üzerindeki basınçlarda çap seçimlerinin değiştiği görülmüştür (Şekil 4). Geleneksel yöntemle yapılan optimizasyon sonuçları basınç sınıfına uygun iç çaplar ile kontrol edildiğinde statik basıncın yüksek olduğu bölgelerde maksimum hız kriterini ihlal ettiği görülmüştür. Bu ihlal sonucunda, yüksek basınç bölgelerinde dinamik yük kayıpları, geleneksel yöntemde PN8 boruların iç çapları ile hesaplandığı için olması gerektiğinden daha düşük kaldığı dolayısıyla piyezometre kotunun daha yüksek hesaplandığı görülmüştür (Şekil 3). Sonuç olarak, Geleneksel çözümde basınç sınıfına uygun iç çaplar ile yapılan kontroller, Y13 hattının uç hidrantında gerekli çıkış basıncını sağlamadığını göstermiştir.

Yeni metot ile yapılan uygulamada yüksek basınç bölgelerinde ve düşük basınç bölgelerinde uygun basınç sınıflarının iç çapına ve birim fiyatlarına göre hesaplamalar yapılarak optimizasyon gerçekleştirildiğinden bu tür kontrollere ihtiyaç duymayan güvenli bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Buna göre, yeni metot sonuçlarında hattın yüksek basınç bölgelerinde de hız kriterlerine aynen uyulduğu, dinamik kayıpların aslına uygun olarak hesaplandığı görülmüştür. Ayrıca, Y13 hattı kritik uç hidrantında, bu hatta daha yüksek çaplar seçilerek gerekli çıkış basıncının sağlandığı görülmüştür.



Şekil 3. Sulama sistemi karşılaştırmalı optimizasyon sonuçları, basınç değişimi



Şekil 4. Sulama sistemi karşılaştırmalı optimizasyon sonuçları, boru çaplarının değişimi

3. Değerlendirme

Sulama sistemlerinin bulunduğu coğrafik özellikler ve su kaynağının konumuna göre farklı basınç sınıflarında sistemler tasarlanabilmektedir. Ülkemizde, bu sistemler hidrant çıkışındaki basınç yüksekliğine göre alçak basınçlı, orta basınçlı ve yüksek basınçlı sistemler olarak isimlendirilmektedir. Yüksek basınçlı sulama sistemlerinde basınç yönetimi basınç kırıcı vana (BKV) odaları tarafından sağlanmaktadır. BKV'ler boruların basınç sınıflarını düşürerek birim maliyetlerin önemli derecede azalmasını sağlamaktadır. Böylece ilk yatırım maliyetlerinde önemli bir kazanç sağlamaktadırlar. Ayrıca, şebekenin işletme basınçlarını düşürerek kayıp kaçakların ve basınç dalgalanması kaynaklı boru hasarlarının önüne geçmektedir. Bu anlamda BKV'ler sulama sistemleri tasarımında önemli bir rol oynamaktadır [11].

Buna karşın, BKV odaları özellikle büyük çaplı sulama sistemlerinde özel üretim branşman yapıları ve vanalardan dolayı ilave maliyet oluşturmaktadırlar. Sulama sistemlerinin karmaşıklığı göz önüne alındığında şebeke ilk yatırım maliyetlerinin düşürülmesinde önemli rol oynayan BKV'lerin konumları ve yatırım maliyetleri optimizasyon aşamasında ele alınması gereken bir konudur. Bu konuda literatürde ve Türkiye'de yetkin kurum olan Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından kullanılan mevcut ticari yazılımlarda BKV konumları ve sayısı sulama sisteminin tasarımını gerçekleştiren mühendis tarafından manuel olarak belirlenmektedir. Bu yaklaşım, karmaşık sistemlerde BKV'lerin alternatif konumları için manuel olarak tekrarlı çözümleri gerektirdiğinden tam bir maliyet analizi yapılmasını zorlaştırmaktadır.

Mevcut optimizasyon yaklaşımında ayrıca sisteme tek bir basınç sınıfındaki (genellikle 8 atü) boruların iç çapları ve birim maliyetleri tanımlanmaktadır [12, 13]. Bazı çalışmalarda boru birim maliyetinin, boru çapının bir sabit katsayı ile çarpılması yoluyla hesaplandığı görülmektedir [14].

Günümüzde sıklıkla kullanılan HDPE borularda artan basınç sınıflarında boru cidar kalınlığı oldukça artmakta ve bu nedenle birim maliyetleri arttığı gibi iç çapları da oldukça daralmaktadır. Yüksek basınçlı sulama şebekelerinde, sulama alanının bulunduğu arazi yapısına göre şebekenin değişen bölgelerinde farklı basınç sınıfları görülebilmektedir. Güncel ticari optimizasyon yazılımlarında, şebekenin değişen bölgelerindeki basınç sınıflarına ve optimizasyon sonucunda belirlenen çaplara ait önceden tanımlanan bir birim maliyet listesi bulunmadığından alternatifli çözümlerde temsili şebeke maliyetleri kullanılmaktadır. Tek bir basınç sınıfına göre yapılan optimizasyona dayalı karşılaştırmalı analizlerde özellikle yüksek basınçlı şebekelerde, gerçek yük kayıpları ve boru içi akış hızlarında önemli farklar ortaya çıkabilmektedir.

Ayrıca mevcut bu yaklaşımda, HDPE boruların ağırlıklı olduğu yüksek basınçlı şebekelerde kritik basınç bölgeleri mevcutsa, bu bölgelerdeki hidrant dinamik basınçlarının yanlış hesaplanmış olması muhtemeldir. Bunun nedeni, HDPE boruların yüksek basınç sınıflarında iç çaplarının oldukça daralması ve dolayısıyla sürekli yük kayıplarının tek bir basınç sınıfı ile hesaplanandan daha yüksek olmasıdır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yeni metot ve uygulama sayesinde bu tür sorunlar ortadan kalkarak daha güvenli ve kesin sonuçlar elde edilebilmektedir.

4. Sonuçlar

Temelde basınç taleplerini karşılayan minimum boru maliyetlerinin belirlenmesi olan şebeke optimizasyonu, dal şebekelerin karmaşıklığı ve kısıt fonksiyonlarındaki üstel ifadeler nedeniyle doğrusal olmayan bir optimizasyon problemidir. Doğrusal olmayan kısıt fonksiyonlarının matematiksel yaklaşımlar ile doğrusal bir eşitsizlik olarak tanımlandığı bu çalışma, çözüm sürecinde deterministik algoritmaların kullanılmasına olanak tanımış; bu sayede sezgisel yöntemlerin aksine lokal çözümlere takılma riski ortadan kaldırılarak kesin bir şekilde global optimumu elde etme garantisi sağlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon metodolojisi ile mevcut ticari yazılımlardan farklı olarak;

- BKV odalarının getirdiği ilave maliyetleri dikkate alan,
- Döngüsel bir algoritma ile şebekede BKV odaları için tüm konum kombinasyonlarını değerlendirerek en uygun konum kombinasyonunu ve BKV sayısını belirleyen,
- BKV odalarının konumlarına ve mansap basınç taleplerine göre gerçekleştirilen optimizasyonda, belirlenen boru basınç sınıfları ve boru çaplarının getirdiği gerçekçi boru maliyetlerini kullanan,

- Şebeke basınç sınıfına göre seçilen gerçek iç çaplara göre boru içi akış hızı kriterlerine uyan ve sürekli yük kayıplarını daha isabetli şekilde tahmin ederek yüksek basınç bölgelerinde tekrar kontrole ihtiyaç duymayan,
- Kritik bölgelerdeki hidrant çıkış basınçlarını doğru şekilde hesaplayarak sonuçların güvenilirliğini arttıran,
- Python programlama dilinin ve PYOMO optimizasyon paketinin esnek yapısı sayesinde projelendirmede kullanılan farklı tasarım araçlarına (AutoCAD, Excel) entegre edilerek geliştirilebilen,
- Doğrusal bir optimizasyon çözücüsü olan CPLEX çözücüsü sayesinde oldukça hızlı ve etkili bir şekilde global optimum sonucu garanti eden kapsamlı ve güvenilir bir maliyet analizi gerçekleştirilebilmektedir.

5. Kaynaklar

[1] “Python”, Python Software Foundation. Erişim: 14 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.python.org/

[2] “Pyomo”, Sandia National Laboratories. Erişim: 27 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/#

[3] A. J. Clemmens ve M. Asce, “Canal capacities for demand under surface irrigation”, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, c. 112(4), ss. 331-347, 1986, doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:4(331).

[4] R. Clément, “Calcul des débits dans les réseaux d’irrigation fonctionnant à la demande”, La Houille Blanche, c. 52, sy 5, ss. 553-576, Ağu. 1966, doi: 10.1051/lhb/1966034.

[5] G. Ayna, “Basınçlı sulama şebekelerinden elektrik kazanımı ve optimizasyon modelinin geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2026.

[6] İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları. Ankara: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025. Erişim: 17 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/2025-yili-b-r-m-f-yatlari-200105_1007-20250120090000.pdf

[7] G. Marini, F. Di Menna, M. Maio, ve N. Fontana, “HYPER: Computer-assisted optimal pump-as-turbine (PAT) selection for microhydropower generation and pressure regulation in a water distribution network (WDN)”, Water (Switzerland), c. 15, sy 15, Ağu. 2023, doi: 10.3390/w15152807.

[8] L. Manservigi vd., “Hydraulic and electrical regulations of pumps as turbines for energy recovery in water distribution networks: Energy and economic analysis”, Cambridge Prisms: Water, c. 3, 2025, doi: 10.1017/wat.2025.10004.

[9] G. Ayna ve H. Ağaççıoğlu, “A sustainable approach for energy recovery in branched irrigation networks using an integrated optimization model”, Water Resources Management, c. 40, sy 7, May. 2026, doi: 10.1007/s11269-026-04523-4.

[10] V. Pehlivanoğlu, Optimizasyon temel kavramlar ve yöntemler. Ankara: İzmir Ekonomi Üniversitesi, 2017.

[11] M. M. Koşucu ve M. C. Demirel, “Smart pressure management extension for EPANET: source code enhancement with a dynamic pressure reducing valve model”, Journal of Hydroinformatics, c. 24, sy 3, ss. 642-658, May. 2022, doi: 10.2166/hydro.2022.172.

[12] G. Marím, Y. Darama, ve Z. Bozkuş, “Optimization of pipe irrigation networks”, Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers, c. 29, sy 5, ss. 8631-8650, Eyl. 2018, doi: 10.18400/tekderg.306880.

[13] Can Özkaya ve Yusuf Uçar, “Basınçlı sulama sistemlerinin COPAM yazılımı ile performans analizi: Burdur Çavdır-Küçükalan örneği”, Ziraat Fakültesi Dergisi, c. 18, sy 1, ss. 50-58, Haz. 2023, doi: 10.54975/isubuzfd.1269259.

[14] Alandí P. Planells, Álvarez J. F.Ortega, ve Martín-Benito J. M. Tarjuelo, “Optimization of irrigation water distribution networks, layout included”, Agric. Water Manag., c. 88, sy 1-3, 2007, doi: 10.1016/j.agwat.2006.10.004

Kuraklık Koşullarında Borulu (Basınçlı) ve Açık Kanallı Sulama Şebekelerinin İşletme Performansının Karşılaştırılması: Büyük Menderes Havzası Örneği

Cengiz KÖSE*
DSİ Genel Müdürlüğü, İşletme ve Bakım Dairesi Başkanlığı, ANKARA
ckose@dsi.gov.tr

Hakkı KILAVUZ
DSİ Genel Müdürlüğü, İşletme ve Bakım Dairesi Başkanlığı, ANKARA
hakkik@dsi.gov.tr

Emre ELMALI
DSİ Genel Müdürlüğü, İşletme ve Bakım Dairesi Başkanlığı, ANKARA
eelmali@dsi.gov.tr

Aynur FAYRAP
DSİ Genel Müdürlüğü, İşletme ve Bakım Dairesi Başkanlığı, ANKARA
Orcid no: 0000-0001-5924-6126
aynurf@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* borulu (basınçlı) sulama, açık kanallı sulama, kuraklık, sulama performansı, Büyük Menderes Havzası

1. Amaç

Dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi Türkiye'de de iklim değişikliğinin etkileri, su kaynaklarının miktarı ve kalitesi üzerindeki baskıları artırmaktadır. Su kaynaklarının sektörel kullanımında en büyük pay tarım sektörüne ait olup, Türkiye'de toplam su kullanımının yaklaşık % 79'u tarımsal sulamada kullanılmaktadır [1]. Ülkemizin de içerisinde yer aldığı Akdeniz Havzası, iklim değişikliğine bağlı olarak kuraklık riskinin arttığı ve kuraklık olaylarının daha sık ve şiddetli hale geldiği bölgelerden biridir [2,3] Büyük Menderes Havzası da iklim değişikliği ve kuraklık risklerine karşı hassas havzalardan biri olarak değerlendirilmektedir. Havzada suyun % 79 u tarımsal sulama amaçlı kullanılmaktadır [4].

İklim değişikliğinin etkileri dikkate alındığında su kaynaklarının kalite ve miktar açısından sürdürülebilir yönetimi ve su kullanım verimliliğinin artırılması temel öncelikler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Bu çerçevede, kuraklık dönemlerinde tarımsal sulama suyu arzının etkin yönetilmesi ve sulama şebekelerinin performansının izlenmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, 2025 yılında kuraklık koşullarının yaşandığı Büyük Menderes Havzası'nda borulu(basınçlı) ve açık (klasik/kanaletli) sulama şebekelerinin işletme performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda, DSİ tarafından izlenen sulama tesislerine ait gerçek işletme verileri kullanılarak Sulama Oranı (SO), Sulama Randımanı (SR), Birim Sulanan Alanda Kullanılan Su (BKS) ve İhtiyacı Karşılama Oranı (İKO) göstergeleri bakımından şebeke tiplerinin su kullanım etkinliği karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanını, Büyük Menderes Havzası oluşturmaktadır. Havza, 30°– 32° doğu boylamları ile 38°–39° kuzey enlemleri arasında yer almakta olup yaklaşık 25.966 km² drenaj alanına sahiptir. Türkiye yüzölçümünün yaklaşık % 3,32'sini oluşturmaktadır (Şekil 1).

Ege, İç Anadolu ve Akdeniz bölgeleri arasında geçiş kuşağında bulunan havza, farklı iklim özellikleri göstermektedir. Havzanın doğu ve kuzey kesimlerinde karasal iklim, batı ve güney kesimlerinde ise Akdeniz iklimi etkilidir. Yağışların büyük bölümü kış aylarında gerçekleşmekte olup, kıyı kesimlerinde don ve kar olayları nadir, iç ve yüksek kesimlerde ise kışlar daha soğuk ve kar yağışlı geçmektedir.

Çalışma kapsamında yer alan 22'si borulu(basınçlı) 8'i açık sistemli (klasik ve kanalet) sulama tesisinin genel özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.



Şekil 1. Büyük Menderes Havzası'nın Türkiye'deki yeri ve konumu

Tablo 1. Sulama tesislerinin genel özellikleri

Sulama tesisi	İşletmeye açıldığı yıl	Sulama alanı (ha)	İşletme tipi	Şebeke tipi
Ahat	2008	557	Pompaj	Borulu
Avgan	2013	297	Pompaj	Borulu
Baklan P	1991	45399	Pompaj	Kanaletli
Bayır Barajı	2023	594	Pompaj	Borulu
Bayırköy	2014	317	Cazibe+Pompaj	Borulu
Beyağaç Bövet Göleti	2015	343	Pompaj	Borulu
Bozdoğan-Akçay	2007	5634	Cazibe	Borulu
Dutağacı	2014	335	Pompaj	Borulu
Dinarsaz	2020	1962	Pompaj	Borulu
Gümüşsu P	1994	1600	Pompaj	Kanaletli
Göğem	2014	455	Pompaj	Borulu
Irgıllı C+P	1964	2610	Cazibe+Pompaj	Kanaletli
Isıklı	1965	1650	Cazibe	Klasik
Karacaören	2005	317	Cazibe+Pompaj	Borulu
Karpuzlu	1998	2750	Cazibe	Borulu
Kızık (C)	1999	508	Cazibe	Borulu
Kozviran	2004-2012	663	Cazibe	Borulu
Mesudıye-Altıntas G.(C+Takv.P)	1998	315	Cazibe+Pompaj	Borulu
Nuh	2012	360	Pompaj	Borulu
Nuhtaşoluk	2014	478	Pompaj	Borulu
Örenler	1996	3642	Cazibe+Pompaj	Klasik
Pınarbası	2019	1396	Cazibe	Borulu
Pınarlı	1996	310	Cazibe+Pompaj	Borulu
Serban	1995	895	Cazibe	Borulu
Söke	1981	26000	Cazibe	Klasik
Sütlaç P	1995	4565	Pompaj	Kanaletli
Taşoluk	2018	320	Pompaj	Borulu
Yeşilhisar	2016	261	Cazibe	Borulu
Çal	1994	1730	Cazibe	Kanaletli
Çığrı	2024	464	Cazibe	Borulu

Çalışmada DSİ'ce sulama tesislerinin performans değerlendirmesinde kullanılan performans göstergeleri kullanılmıştır. Kullanılan performans göstergelerinin hesaplanma yöntemleri aşağıda verilmiştir [5, 6, 7].

$$Sulama\ Oranı(SO) = \left(\frac{\text{Toplam Sulanan Alan(ha)}}{\text{Toplam Sulama Alanı(ha)}}\right) * 100 \quad (1)$$

$$Sulama\ Randımanı(SR) = \left(\frac{\text{Net Su İhtiyacı } (\text{m}^3\text{ha}^{-1})}{\text{Toplam Şebekeye Alınan Su } (\text{m}^3\text{ha}^{-1})}\right) * 100 \quad (2)$$

$$\text{İ}htiyacı\ Karşılama\ Oranı(\text{İ}KO) = \left(\frac{\text{Toplam Şebekeye Alınan Su } (\text{m}^3\text{ha}^{-1})}{\text{Brüt Su İhtiyacı } (\text{m}^3\text{ha}^{-1})}\right) * 100 \quad (3)$$

$$Birim\ Sulanan\ Alanda\ Kullanılan\ Su(BKS) = \left(\frac{\text{Toplam Şebekeye Alınan Su } (\text{m}^3)}{\text{Toplam Sulanan Alan (ha)}}\right) \quad (4)$$

Performans göstergelerinin belirlenmesinde DSİ kayıtlı resmi verileri kullanılmıştır [8].

3. Değerlendirme

Yapılan hesaplamaların sonucunda elde edilen performans göstergelerinden SR en düşük % 35 iken, üç sulama tesisinde teorik sınır olan %100 civarında gerçekleşmiştir. Literatürde kuraklık koşullarında uygulanan kısıntılı sulama uygulamalarının su kullanım etkinliğini artırdığını gösteren birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle kısmi kök bölgesi sulaması gibi uygulamaların, ürün veriminde önemli bir azalma oluşturmadan sulama suyunda %20–30'a varan tasarruf sağlayabildiği ve birim su kullanım randımanını yükseltebildiği gösterilmiştir [9]. SO % 3 ile % 97 arasında gerçekleşmiştir. İKO 0.46 ile 2.3 aralığında gerçekleşirken BKS en düşük 2903 m^3ha^{-1} en yüksek 11383 m^3ha^{-1} olarak belirlenmiştir.

Büyük Menderes Havzasında yer alan 30 sulama şebekesinin ortalama performans değerleri ise SO % 68, SR %78, BKS 6207 m^3ha^{-1} ve İKO 0,84 olarak belirlenmiştir. Borulu sistemli sulama tesislerinde ortalama SO % 80, SR % 96, BKS 5738 ve İKO 1,02 hesaplanırken; açık sistem şebekelerde bu değerler sırasıyla SO % 64, SR % 72, BKS 6395 m^3ha^{-1} ve İKO 0,78 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, kuraklık şartlarında borulu sistemlerin özellikle suyun iletimi ve dağıtımı ile bitki su ihtiyacının karşılanması açısından açık sistemlere göre daha yüksek bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir.

Narlı Ovası Kartalkaya Sol Sahil Sulama Birliği alanındaki sulama şebekesinde 2007-2017 yılları için yapılan çalışmada SO % 70.4-96.8, İKO 1-1.37 olarak hesaplanmıştır [10]. Eskişehir ilinde 38 sulama tesisi için yapılan performans değerlendirmesi çalışmasında sulama oranları sulama birliklerinde %74,6, belediyelerde % 44,7 ve kooperatiflerde % 65,8 olarak hesaplanmıştır [11]. 2000-2009 yılları arasında gerçekleştirilen, Aşağı Büyük Menderes Havzası'nda yer alan Akçay Sağ ve Sol Sahil Sulama Birlikleri, Aydın Ovası ve Söke Ovası Sulama Birliği ile Aşağı Gediz Havzası'nda yer alan Menemen Sağ ve Sol Sahil Sulama Birliklerinin performansları değerlendirilmesinde İKO ortalama değeri 1.02-1.60 aralığında değişirken, BKS değeri 5965-11043 m^3 ha^{-1} aralığında hesaplanmıştır [12]. Uluborlu Sulamasının modernizasyon öncesi ve sonrası karşılaştırmasının yapıldığı çalışmada İKO 0.81 den 0.61 e düşerken, BKS 5 913.1 den 4 472.1 m^3 ha^{-1} a düşmüştür [13].

Büyük Menderes Havzasının performans göstergelerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada borulu (basınçlı) sistemlerde SO'nun % 80 ile açık sistemlerdeki % 64'lük değerin üzerinde gerçekleşmesi de dikkat çekicidir. Bu sonuç, borulu sistemlerde sağlanan su tasarrufu ile daha fazla alanın sulanabileceğini göstermektedir. İKO'nun borulu sistemlerde 1,02, açık sistemlerde ise 0,78 olarak gerçekleşmesi, borulu sistemlerde bitki su ihtiyacının daha yüksek düzeyde karşılandığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, literatürdeki su kıtlığı yaşanan bölgelerde sulama sistemlerinin modernizasyonunun, su kullanım etkinliğinin artırılması ve değişken su koşullarına karşı dayanıklılığın güçlendirilmesi amacıyla önemli bir araç olduğu değerlendirilmesiyle uyumludur [14].

Borulu(basınçlı) sistemlerde elde edilen % 96'lık sulama randımanı ve 5738 m^3 ha^{-1} düzeyindeki BKS değeri, sulama suyunun daha etkin kullanılabildiğini göstermektedir. Borulu(basınçlı) sistemlerde % 75–95 arasında değişen sulama randımanı değerleri dikkate alındığında, bu çalışmada borulu sistemler için

elde edilen % 95'lik değer literatürde bildirilen üst sınıra ulaşmaktadır [15]. Buna karşılık, borulu sistemlerle karşılaştırıldığında açık sistemlerde daha düşük olarak belirlenen % 72'lik sulama randımanı, önemli ölçüde açık kanallı sistemlerde ortaya çıkan iletim ve dağıtım kayıplarıyla ilişkilidir. Açık kanallarda sızma, kontrol yapılarındaki kaçaklar ve diğer fiziksel kayıpların sulama suyunun etkin kullanımını sınırlandırdığı bildirilmektedir [15]. Bu durum, borulu sistemlerin yalnızca iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması açısından değil, aynı zamanda mevcut suyun sulama alanlarının su talebine göre daha kontrollü ve planlı biçimde tahsis edilmesi açısından da avantaj sağlayabildiğine işaret etmektedir. Özellikle kurak koşullarda su arzının sınırlandırıldığı dikkate alındığında, daha düşük BKS değeri, su talebinin izlenmesi, sulama programlarının düzenlenmesi ve mevcut suyun ihtiyaçlara göre dağıtılması gibi talep yönetimi uygulamalarının borulu sistemlerde daha etkin yürütülebildiğini düşündürmektedir.

Bu değerlendirme, kuraklık yönetiminde yalnızca sulama altyapısının modernizasyonunun değil, aynı zamanda su talebinin yönetilmesi ve suyun kontrollü tahsis edilmesinin de önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Nitekim kuraklık koşullarında su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için su kullanım etkinliğinin artırılması, sulama sistemlerinin modernizasyonu, kontrollü su tahsisi ve talep yönetimine dayalı yaklaşımların önemi vurgulanmaktadır [16, 17]. Bu çerçevede, mevcut çalışmada borulu sistemlerde daha düşük BKS ile birlikte daha yüksek sulama oranı (% 80), sulama randımanı (% 96) ve ihtiyacı karşılama oranının (1,02) elde edilmiş olması, bu sistemlerde su arzı ile sulama talebi arasındaki uyumun daha etkin sağlanabildiğine işaret etmektedir.

Suyun etkin kullanımı için basınçlı sulama sistemlerinin kullanılması ile birlikte hacimsel su ölçümü, su kullanımına ilişkin kota uygulamaları, çiftçi eğitimi, akıllı sulama teknolojileri, yapay zekâ ve IoT destekli sulama gibi uygulamalar da bu sonuçları tamamlayan diğer su yönetimi araçlarıdır [18]. Bu açıdan değerlendirildiğinde, kuraklık koşullarında sürdürülebilir sulama yönetiminin tek bir önleme dayalı olmadığı; modern sulama altyapısı, optimum sulama programlaması, kontrollü su tahsisi ve akıllı sulama teknolojilerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirdiği söylenebilir.

4. Sonuçlar

Büyük Menderes Havzasında yer alan 30 sulama tesisinin performans göstergelerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada kuraklıkla mücadelede borulu sulama sistemlerinin önemli avantajlar sağladığı belirlenmiştir. Bu sistemlerde iletim ve dağıtım kayıplarının azaltılması, mevcut su kaynağının daha etkin kullanılmasına ve aynı miktardaki su ile daha geniş alanların sulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bunun yanında, suyun daha kontrollü biçimde dağıtılabilmesi, aşırı su kullanımının önlenmesine ve sulama suyunun sulama alanının tamamında talebe göre daha dengeli tahsis edilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle su kıtlığı dönemlerinde, şebekenin memba kesimlerinde suyun gereğinden fazla kullanılması nedeniyle mansap kesimlerinde su yetersizliği oluşmasının önüne geçilmesi, suyun şebeke boyunca daha dengeli dağıtılmasına ve sulanabilir alan miktarının artırılmasına imkân vermektedir. Özellikle kuraklık periyotlarında, sulama yönteminin seçimi su kullanım etkinliğinin artırılması ve mevcut su kaynaklarının daha sürdürülebilir biçimde yönetilmesi açısından önem taşımaktadır. Yüzeysel sulama yöntemleri yerine yağmurlama ve damla sulama gibi basınçlı sulama yöntemlerinin yaygınlaştırılması, sulama suyunun daha kontrollü ve etkin kullanılmasına önemli katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, basınçlı sulama sistemlerinin etkinliği yalnızca sistem altyapısına değil, sulama programının doğru planlanmasına ve işletme koşullarının uygunluğuna da bağlıdır. Kurak dönemlerde alan başına maksimum ürün yerine, birim su başına elde edilebilecek ürün miktarını artırmaya yönelik uygulamaların tarımsal üretimde sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli olduğu değerlendirilmiştir.

Bu çerçevede, çalışmada borulu sistemlerde daha yüksek sulama oranı, sulama randımanı ve ihtiyacı karşılama oranı ile daha düşük birim kullanılan su değerlerinin elde edilmesi, borulu sistemlerin kuraklık koşullarında hem su kullanım etkinliğinin artırılması hem de su talebinin daha etkin yönetilmesi açısından önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Kurak dönemlerde modern sulama altyapısının; optimum sulama programlaması, kontrollü su tahsisi ve alan münavebesi gibi talep yönetimi uygulamalarıyla birlikte yürütülmesinin, sınırlı su kaynaklarının şebeke genelinde daha dengeli kullanılmasına ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Açık kanallı sulama sistemlerinde ise su kullanım etkinliğinin artırılması için kanal ve sanat yapılarındaki iletim kayıplarının azaltılması, bakım ve onarım çalışmalarının düzenli olarak yürütülmesi önem

taşımaktadır. Ayrıca, sulama programlarının bitki su ihtiyacı ve mevcut su miktarı dikkate alınarak hazırlanması, ölçüm ve izleme sistemlerinin yaygınlaştırılması ve su dağıtımının kontrollü biçimde gerçekleştirilmesi su kullanım etkinliğini artıracak diğer önemli uygulamalardır.

5. Kaynaklar

[1] Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). Ulusal Su Planı (2026–2035). Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara. Ulusal Su Planı – Tarım ve Orman Bakanlığı.

[2] IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. Cambridge University Press.

[3] Durmuş, B., & Bulut, İ. (2023). Batı Akdeniz'deki ekstrem kuraklık şartlarının SPEI yöntemiyle belirlenmesi. Türk Coğrafya Dergisi, (84), 41–52. https://doi.org/10.17211/tcd.1327588.

[4] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2016). Büyük Menderes Havzası Kirlilik Önleme Eylem Planı. Ankara.

[5] Burton,M.,D.Molden,andJ.Scutsch.2000.BenchmarkingIrrigationandDrainageSystemPerformance InternationalProgrammeonTechnologyandResearchinIrrigationandDrainage(IPTRID) 49p.

[6] Malano, H., & Burton, M. (2001). Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID), Food and Agriculture Organization of the United Nations.

[7] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2015). Sulama Tesisleri İşletme Talimatı. Ankara.

[8] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2026). 2025 Yılı DSİ ce İşletilen ve Devredilen Sulama Tesisleri Değerlendirme Raporu. Ankara

[9] Chai Q., Gan Y., Zhao C. et al. (2016). Regulated Deficit Irrigation for Crop Production under Drought Stress: A Review. Agronomy for Sustainable Development, 36, 3. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6

[10] Sesveren, S., & Karakaya, F. G. (2019). Kartalkaya Sol Sahil Sulama Birliği Bazı Performans Göstergeleri, Sulama Problemleri ve Çözüm Önerileri. Journal of the Institute of Science and Technology, 9(1), 76-84. https://doi.org/10.21597/jist.408920

[11] Harman, E., & Çakmak, B. (2025). Comparative Analysis of Water Management Practices in Irrigation Facilities: Evidence From Eskişehir Province, Central Anatolia, Türkiye. Water and Environment Journal, 40, 321 - 335.

[12] Akçay, S., & Tunalı, S. P. (2016). Aşağı Büyük Menderes ve Aşağı Gediz Havzası Sulama Birliklerinin Üretim ve Su Kullanım Performanslarının Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 3(1), 64-73. https://doi.org/10.19159/tutad.90748

[13] Fayrap, A. (2026). Benchmarking Irrigation Water Delivery Performance Before and After Irrigation Modernization: A Case Study of the Uluborlu Irrigation Scheme, Türkiye. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 14(9), 2556–2564. https://doi.org/10.24925/turjaf.v14i9.2556-2564.9312

[14] Fernald, A., Tidwell, V., Rivera, J., Rodríguez, S., Guldan, S., Steele, C., Ochoa, C., Hurd, B., Ortiz, M., Boykin, K., Cibils, A., 2012. Modeling sustainability of water, environment, livelihood, and culture in traditional irrigation communities and their linked watersheds. Sustainability 4 (11), 2998–3022. https://doi.org/10.3390/ su4112998.

[15] Phocaides, A. (2007). Handbook on pressurized irrigation techniques (2nd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

[16] Kanber,R.,Baştuğ,R.,Büyüktaş,D.,Ünlü,M.&Kapur,B.(2010).KüreselİklimDeğişikliğininSuKaynaklarıveTarımsalSulamayaEtkileri.TürkiyeZiraat MühendisliğiVII.TeknikKongresi,Ankara, s. 83–118.

[17] Pamuk Mengü, G., Anaç, S. ve Özçakal, E. (2011). Kuraklık yönetim stratejileri. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 48(2), 175-181.

[18] Çetin, Ö. (2025). Tarımda su kullanımı. Y. K. Haspolat, A. Ceylan ve E. A. Akman (Ed.), Su Kirliliği ve Halk Sağlığı, 109–126. Orient Yayınları.

Yağmursuyu Hasadının Kentsel Taşkın Debisine Etkisinin SWMM ile İncelenmesi: İTÜ Ayazağa Kampüsü Örneği

Mehmet Akif AKMAN*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye, 0009-0009-9956-2356
akmanmeh@itu.edu.tr

Erdal KESGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye, 0000-0002-9441-5359
kesgine@itu.edu.tr

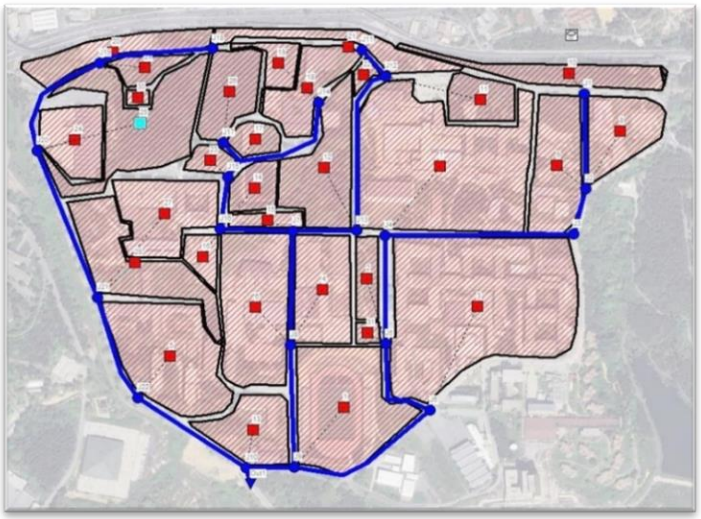
Mehmet Melih KOŞUCU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye, (İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü)
0000-0001-5907-6964
kosucu@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: yağmursuyu hasadı, SWMM, düşük etkili gelişim (LID), kentsel taşkın, pik akım azaltımı.

1. Amaç

Kentleşme arttıkça çatı, yol, otopark ve yaya yolu gibi geçirimsiz yüzeyler yaygınlaşmakta, doğal su döngüsü bozulmakta ve kentsel taşkın riski artmaktadır; bu nedenle yağmursuyu yönetimi şehir planlamasının temel bileşenlerinden biridir [1]. Düşük Etkili Gelişim (LID) yaklaşımları, yağmursuyunu oluştuğu yerde toplayıp yöneterek geleneksel drenaj çözümlerine alternatif oluşturur [2]. Bu yaklaşımlardan biri olan yağmursuyu hasadında çatılara düşen su depolanır; böylece hem taşkın debisi azalır hem de depolanan su yeniden kullanılarak su kaynakları korunur [3].

Bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa Kampüsü'nün batı kesimi EPA SWMM (Storm Water Management Model) yazılımı [4] ile modellenmiş, kampüs binalarının çatılarından yapılacak yağmursuyu hasadının kentsel taşkın pik debisi ve akış hacmi üzerindeki etkisi farklı senaryolar altında değerlendirilmiştir (Şekil 1). Kampüs, kentsel yapılaşmanın tipik özelliklerini taşıyan, yeşil alan oranı yüksek ve tümüyle gözlemlenebilir bir alandır; bu da modelleme çıktılarının sahayla karşılaştırılabilmesini sağlamaktadır. Çalışmada hem hasadın taşkın debisini ne ölçüde azalttığı hem de hangi çatı alanlarının hasat için önceliklendirilmesi gerektiği incelenmiştir.



Şekil 1. İTÜ Ayazağa Kampüsü batı kesiminde modellenen 31 alt havza ile boru/baca ağı

2. Materyal ve Yöntem

SWMM, kentsel drenaj sistemlerinde yüzeysel akışı ve boru ağı hidroliğini birlikte simüle eden, yaygın kullanılan bir yağış-akış modelidir [4]. Modelleme çalışmasında alt havzalar, boru/baca ağı, LID kontrolleri ve yağış verileri EPA SWMM 5.2 ortamına aktarılmış; kampüsün mevcut yapılaşma ve peyzaj özellikleri DEM ve halihazır harita verileri üzerinden görsel olarak dijitalleştirilerek modele işlenmiştir [5].

2.1 Çalışma Alanı ve Model Kurulumu

Çalışma alanı, İstanbul'un Sarıyer ilçesinde yer alan İTÜ Ayazağa Kampüsü'nün altyapı verisi yeterli olan batı kesimidir. Alanın yüzölçümü yaklaşık 1,08 km²'dir ve büyük bölümü fakülte binaları, ulaşım yolları ve geniş yeşil alanlardan oluşur (Tablo 1). Model, birbirine boru hatlarıyla bağlı 31 alt havzadan (subcatchment) kurulmuş; her alt havza için konum, alan, genişlik, eğim, geçirimlilik düzeyi ve akış rotası tanımlanmıştır. Sistemin tek çıkış noktası (Out1) alanın güneyindedir. Alt havzalardaki çatı oranları arazi gözlemleriyle belirlenmiş ve LID modülüne yüzde olarak girilmiştir (Tablo 1); 63,17 hektarlık toplam alt havza alanı içinde çatı yüzeylerinin payı ortalama %21'dir.

Tablo 1. Yağmursuyu hasadı senaryolarında öne çıkan alt havzaların alan ve çatı yüzey oranları.

Alt Havza (Bina)	Alan (ha) / Çatı Alanı (%)
SC1 – Stadyum	4,18 ha / %35,0
SC7 – Fen-Edebiyat Fakültesi	7,91 ha / %27,1
SC15 – Restoranlar	0,41 ha / %60,0
SC18 – Rektörlük	1,59 ha / %39,5
SC24 – Hidrolik Laboratuvarı	1,49 ha / %19,3
SC27 – İnşaat Fakültesi	2,36 ha / %89,0
Toplam (31 alt havza)	63,17 ha / %21 (ortalama)

2.2 Yağış Verileri ve Hasat Senaryoları

Zamana bağlı yağış girdisi olarak 10, 20, 30 ve 40 dakikalık yoğunlaşma sürelerine karşılık gelen dört tasarım hiyetografı, SWMM'in Time Series (zamana bağlı değişken) modülüne tanımlanmıştır. Yüzeysel akışın yönlendirilmesinde doğrusal olmayan rezervuar yaklaşımı, sızma hesabında Horton yöntemi kullanılmıştır. Kirlilik ve arazi kullanımına ilişkin parametreler bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş ve program varsayılan değerlerinde bırakılmıştır.

SWMM LID modülünün drenaj sistemi tasarımından çok performans tabanlı çalıştığı göz önünde bulundurularak, çatılardan yağmursuyu hasadı rain barrel (yağmur fıçısı) kontrolüyle temsil edilmiştir. Fıçı yüksekliği sınırsız tanımlanarak çatıya düşen yağışın tamamının hasat edildiği bir üst sınır senaryosu kurulmuştur. Benzer bir yaklaşım, bir üniversite kampüsünde sulama suyu potansiyelinin belirlenmesi amacıyla SWMM ile de kullanılmıştır [6]. Bu varsayım altında üç hasat senaryosu karşılaştırılmıştır:

- (S1) modellenen 31 alt havzanın tamamındaki çatılardan hasat yapılması;
- (S2) uygulanması görece kolay kabul edilen beş alt havzadan, yani stadyum (SC1), kütüphane (SC4), yemekhane (SC6), Fen-Edebiyat Fakültesi (SC7) ve hidrolik laboratuvarından (SC24) hasat yapılması;
- (S3) çatı yüzey oranı en yüksek üç alt havzadan, yani restoranlar (SC15), rektörlük (SC18) ve İnşaat Fakültesinden (SC27) hasat yapılması (Tablo 1, Şekil 1).

Taban durum (LID uygulanmamış) ile birlikte toplam dört senaryo, dört farklı yağış süresi için ayrı ayrı çalıştırılmış; sistemin tek çıkış noktasındaki (Out1) toplam debi (System Runoff) zaman serisi olarak kaydedilmiştir.

2.3 Karşılaştırma Yöntemi

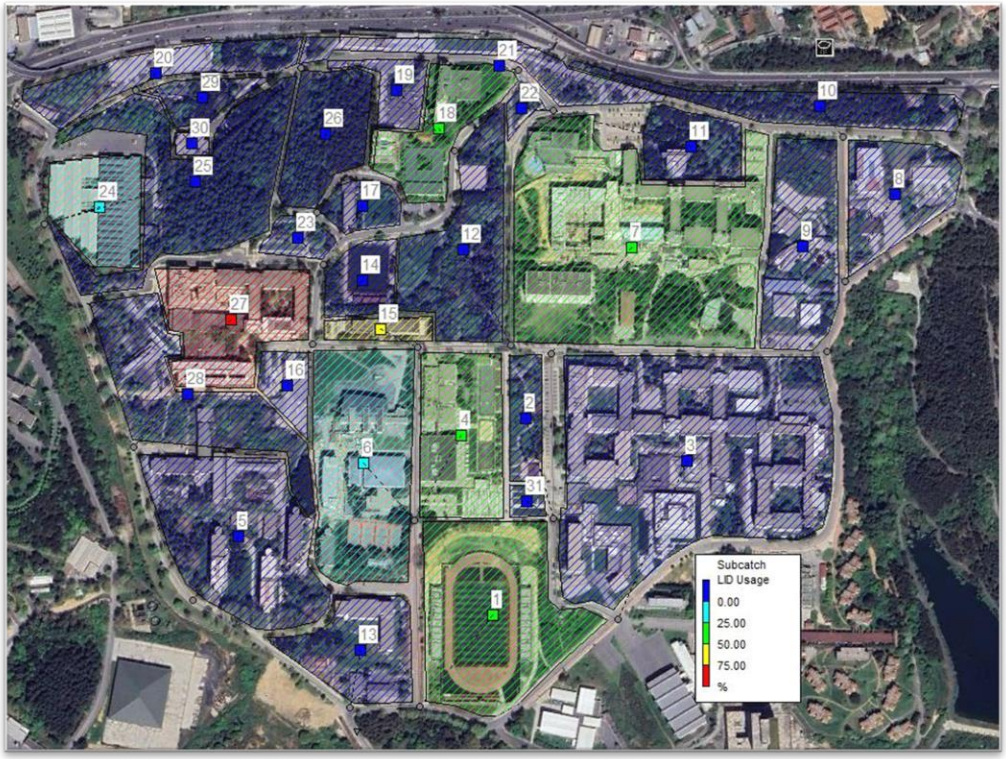
Senaryolar, her yağış süresi için elde edilen çıkış hidrograflarındaki pik debi değerleri okunarak ve bu değerlerin taban duruma göre yüzde azalma oranları hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma saha ölçümlerine dayanmadığından sonuçlar, farklı hasat stratejilerinin göreli etkinliğini ortaya koymaktadır.

3. Değerlendirme

LID uygulanmamış taban durumda sistem çıkışındaki pik debi, tasarım yağmurunun süresine göre değişmektedir: en düşük değer 10 dakikalık yağış için ~14,4 m³/s, en yüksek değer 20 dakikalık yağış için ~19,0 m³/s olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Tüm senaryolarda pik debi, yağışın başlamasından yaklaşık 1-1,3 saat sonra görülmektedir.

Tablo 2. Farklı yağış sürelerinde sistem çıkışındaki pik akım debisi (m³/s) ve taban duruma göre azalma oranları (%).

Yağış Süresi (dk)	Taban Pik Debi (m³/s)	S1: Tüm Çatı, Pik (m³/s) / Azalma	S3: 3 Yoğun Alan, Pik (m³/s) / Azalma
10	14,4	10,4 (%28)	12,5 (%13)
20	19,0	13,5 (%29)	16,2 (%15)
30	15,0	10,7 (%29)	13,0 (%13)
40	14,8	10,7 (%28)	13,0 (%12)
Ortalama azalma	–	~%28	~%13

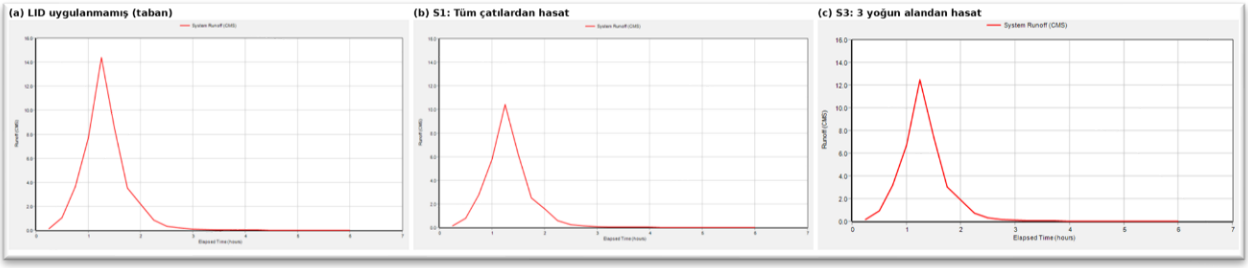


Şekil 2. Alt havzalara göre çatı alanı yüzdesinin (LID kullanım oranının) mekânsal dağılımı.

Şekil 2'de görüldüğü gibi çatı alanı oranı alt havzalar arasında büyük farklılık göstermektedir. S3 senaryosunda seçilen üç alt havzanın (SC15, SC18, SC27) çatı oranı %39,5-%89 aralığındayken, S2 senaryosundaki beş alt havzanın (SC1, SC4, SC6, SC7, SC24) çatı oranı %19,3-%35,0 aralığında kalmaktadır. S3 senaryosunun daha az alt havzayı kapsamasına rağmen daha yüksek pik azaltımı sağlamasının nedeni bu mekânsal dağılımdır.

Tablo 2'ye göre, tüm çatı alanlarından tam hasat yapıldığında (S1) pik debi yağış süresinden bağımsız olarak ortalama %28 azalmaktadır; bu tutarlılık, hasat etkisinin büyük ölçüde toplam hasat edilen çatı

alanıyla orantılı olduğunu düşündürmektedir. Kısıtlı sayıda alt havzayı hedefleyen S2 ve S3 senaryolarında azalma oranları sırasıyla ortalama %9 ve %13 düzeyinde kalmıştır.
Şekil 3'te, 10 dakikalık tasarım yağmuru için taban durum, S1 ve S3 senaryolarının hidrografları karşılaştırılmıştır. Hasat senaryolarında pik debi azalmakta, buna karşılık pikin görüldüğü zaman (~1,2 saat) ve hidrografın genel şekli taban duruma göre büyük ölçüde korunmaktadır. Rain barrel kontrolü akışı geciktirmemekte, yalnızca büyüklüğünü azaltmaktadır.



Şekil 3. 10 dakikalık tasarım yağmurunda taban durum, S1 (tüm çatı) ve S3 (3 yoğun alan) senaryolarına ait çıkış hidrografları.

Bu bulgular, kısıtlı bütçeyle uygulanacak yağmursuyu hasadı projelerinde alan seçiminde alt havza sayısından çok çatı yüzey yoğunluğunun belirleyici olduğunu göstermektedir.
Modelde rain barrel'ın sınırsız yükseklikte tanımlanması, çatıya düşen yağışın tamamının hasat edildiği bir üst sınır senaryosunu temsil etmektedir. Gerçek uygulamalarda depolama hacmi sınırlı olacağından, sahada beklenen pik azaltım oranlarının burada sunulan değerlerin altında kalması olasıdır. Sonuçlar bu nedenle, farklı hasat stratejilerinin göreli etkinliğini karşılaştırmak için bir üst sınır referansı olarak değerlendirilmelidir.

4. Sonuçlar

İTÜ Ayazağa Kampüsü'nün batı kesiminde SWMM ile yapılan bu modelleme çalışmasının temel bulguları ve önerileri şunlardır:

- Modellenen 31 alt havzanın tamamındaki çatı yüzeylerinden (63,17 hektarlık alanın ortalama %21'i) tam kapasiteli yağmursuyu hasadı yapılması, incelenen dört tasarım yağmuru süresinde (10-40 dk) sistem çıkışındaki pik debiyi yağış süresinden bağımsız olarak ortalama %28 azaltmaktadır.

- Kısmi hasat senaryolarında elde edilen azalma oranı, hedeflenen alt havza sayısından çok bu alanların çatı yüzey oranıyla ilişkilidir: çatı oranı yüksek üç alt havzadan yapılan hasat (S3, ortalama %13 azalma), sayıca daha fazla ancak çatı oranı görece düşük beş alt havzadan yapılan hasada (S2, ortalama %9 azalma) kıyasla daha etkili olmuştur.

- Hasat senaryolarında pik debi azalmış, hidrografın zamansal şekli ve pikin görüldüğü an taban duruma göre büyük ölçüde korunmuştur; rain barrel kontrolü akışı geciktirmekten çok büyüklüğünü azaltmaktadır.

- Rain barrel'ın modelde sınırsız yükseklikte tanımlanmış olması bir üst sınır senaryosunu temsil eder; sınırlı depo hacimleriyle yapılacak gerçekçi uygulamalarda beklenen azalma oranlarının burada sunulan değerlerin altında kalması olasıdır.

- Gelecek çalışmalarda, kampüsün altyapı verisi eksik olan doğu kesimini de kapsayan genişletilmiş bir model, sınırlı depo hacimleriyle tanımlanmış gerçekçi LID senaryoları ve gözlenen debi ölçümleriyle model doğrulaması önerilmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Gülcan, N., Suljevic, A. (2022). Yağmur Bahçelerinde Düşük Etkili Uygulamalar.

[2] Low Impact Development Practice: Rooftop Disconnect. Lamoille County Planning Commission. https://www.lcpcvt.org/vertical/Sites/%7B3C01460C-7F49-40F5-B243-0CA7924F23AF%7D/uploads/Rootop_Disconnect.pdf

[3] İncebel, C. (2012). Alternatif Su Kaynaklarının Endüstriyel Kullanıma Kazandırılması İçin Çatı Yağmur Suyu Hasadı.

[4] Rossman, L. A. (2022). Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.2. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

[5] Edin, E. (2023). Şehirlerde Yağmursuyu Drenaj Sisteminin İncelenmesi ve Optimize Edilmesi.

[6] Himat, M. A. (2018). Çatılardan Yağmur Suyu Hasat Potansiyelinin İl Bazında Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi.

Türkiye'de Uydu Tabanlı Yağış Aşındırıcılığı Tahmin Doğruluğunun Günlük Modellerle İyileştirilmesi

Sait Genar YALDIZ*
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul,Orcid: 0000-0001-5394-7108
genar.yaldiz@std.yildiz.edu.tr

Hayrullah AĞAÇCIOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul,Orcid: 0000-0002-1860-9848
agacci@yildiz.edu.tr

Anahtar Kelimeler: yağış aşındırıcılığı, günlük ölçekli modelleme, uydu tabanlı yağış ürünleri, toprak erozyonu, dışsal sürüklenmeli kriging

1. Amaç

Yağış kaynaklı su erozyonu, toprak verimliliğinin azalması, tarımsal üretkenliğin düşmesi ve su kalitesinin bozulması gibi olumsuz sonuçlara neden olan başlıca çevresel tehditlerden biridir [1]. Su erozyonu tahmininde sıklıkla modelleme yaklaşımına başvurulur ve RUSLE modeli en yaygın kullanılan modellerinin başında gelmektedir. Bu modelde uzun vadeli yıllık toprak kaybı (A); yağış aşındırıcılığı (R), toprağın aşınabilirliği (K), eğim uzunluğu (L), eğim dikliği (S), örtü ve yönetim uygulamaları (C) ve destekleyici koruma uygulamaları (P) olmak üzere altı faktörün çarpımı şeklinde tahmin edilmektedir. Yağış aşındırıcılığı (R faktörü), yağışın toprak taneciklerini koparma ve taşıma potansiyelini temsil eder ve yıl içinde en belirgin değişkenliği gösterir [2]. Tek bir sağanağın aşındırıcılığı (EI_{30}), olayın toplam kinetik enerjisi (E) ile maksimum 30 dakikalık yağış şiddetinin (I_{30}) çarpımı olarak tanımlanır ve belirlenmesi kesintisiz yağış verisi gerektirir [3]. Bu nitelikteki istasyonlar dünyanın büyük bölümünde seyrek olduğundan, aşındırıcılığı daha kaba zamansal çözünürlükteki yağış toplamlarına bağlayan basit modeller yaygın bir alternatif haline gelmiştir [4].

Günlük yağış tabanlı modeller hem yüksek ayrıntı düzeyini korur hem de iklim projeksiyonlarında günlük yağışların sıklıkla mevcut olması nedeniyle iklim değişikliğinin etkilerini izlemeye olanak sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek çözünürlükte veri sunan uydu yağış tahminlerinin (UYT), günlük toplamları, kısa süreli ve yüksek şiddetli yağış piklerinden daha iyi temsil etmesi nedeniyle, UYT'den elde edilen R faktörü tahminlerinin doğruluğunu iyileştirme potansiyeli taşır [5]. Türkiye, kıyı kuşakları ile iç plato ve yüksek dağlık alanlar arasında farklılık gösteren yağış rejimi ve karmaşık topoğrafyasıyla bu varsayımın sınanması için elverişli bir çalışma alanıdır [6].

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de günlük yağış aşındırıcılığı modellerini istasyon gözlemlerinden parametrelendirmek, belirlenen parametreleri ülke genelinde 1 km çözünürlüğü enterpole etmek ve parametre yüzeylerinin IMERG ile CMORPH uydu yağış ürünlerinin 30-dk'lık verilerinden elde edilenlere kıyasla aşındırıcılık tahminlerini iyileştirip iyileştirmediğini ortaya koymaktır. Çalışma, ulusal ölçekte 1 km çözünürlüklü model parametre haritalarının üretilmesi ve UYT'nin günlük toplamlarının aşındırıcılık hesabına katkısının nicel olarak değerlendirilmesi bakımından literatüre katkı sunmaktadır.

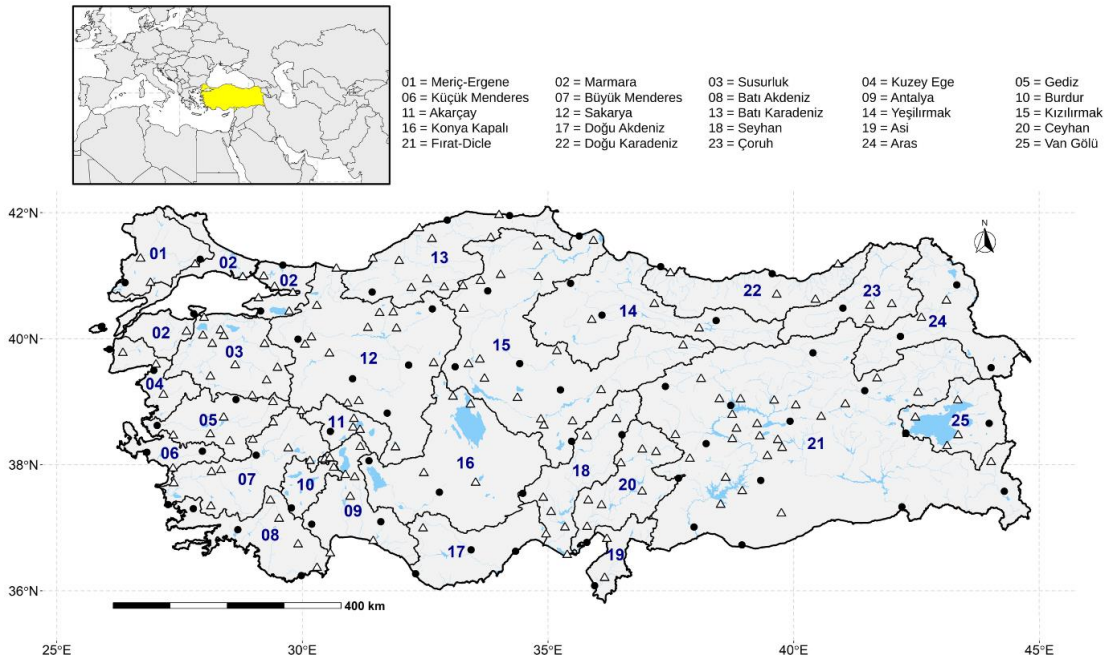
2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veri Setleri

Yaklaşık 780.000 km^2 yüzölçümüne ve 25 hidrolojik havzaya sahip olan Türkiye'nin ortalama yükseltisi 1.132 m'dir (Şekil 1). Batı ve güney kıyılarında Akdeniz iklimi, kuzey kıyısında nemli koşullar egemenken iç kesimlere doğru karasallık artar. Yıllık toplam yağış kuzeydoğuda 2.500 mm'yi aşarken iç bölgelerde yaklaşık 300 mm'ye kadar düşmektedir [6].

Çalışmada Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen ve tüm havzalara dağılmış 222 istasyonun 2010–2024 dönemine ait saatlik yağış verileri kullanılmıştır. İstasyon seçiminde ülke genelinde mümkün olan en az eksik veriye sahip istasyonlar değerlendirmeye alınmış ve ortalama %2,5 eksik veriye sahip istasyonlar çalışmaya dahil edilmiştir. İstasyonlar, her havzada her iki grupta da en az bir istasyon bulunacak biçimde rastgele eğitim (%70) ve test (%30) alt kümelerine ayrılmıştır. Eğitim istasyonlarında kalibre edilen modeller, 1 km çözünürlüğe enterpolasyonu sonrasında, bağımsız test

istasyonlarında doğrulanmıştır. Ayrıca 30 dakikalık çözünürlük sunan iki UYT (IMERG ve CMORPH) değerlendirmeye dahil edilmiş ve günlük modellere kıyasla doğrulukları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır (Tablo 1).



Şekil 1. Türkiye'nin 25 hidrolojik havzasını ve akarsu ağını gösteren çalışma alanı haritası. Beyaz üçgenler eğitim, siyah daireler test istasyonlarını göstermektedir

Tablo 1. Günlük yağış aşındırıcılığı zaman serilerinin hesaplanmasında kullanılan veri setlerinin özellikleri

Veri seti	Zamansal kapsam	Zamansal çözünürlük	Uzamsal çözünürlük	Veri sağlayıcı	Kaynak
Yağış ölçer	2010–2024	1 saat	Nokta	MGM	–
IMERG V07	1998–2024	30 dakika	0,1°	NASA	[7]
CMORPH CDR	1998–2024	30 dakika	8 km	NOAA	[8]

2.2 Yağış Aşındırıcılığının Hesaplanması

Yağış aşındırıcılığı, RUSLE yaklaşımına uygun olarak hesaplanmıştır [3, 9]. Yağış zaman serisi, toplam yağışı 1,27 mm'nin altında kalan en az 6 saatlik kesintilerle ayrı olaylara bölünmüş ve yalnızca toplam yağışı 12,7 mm'yi aşan olaylar dikkate alınmıştır. Her olay için aşındırıcılık indisi, toplam kinetik enerji (E) ile maksimum 30 dakikalık yağış şiddetinin (I_{30}) çarpımıdır (Eşitlik 1).

$$EI_{30} = E \times I_{30} \quad (1)$$

Toplam kinetik enerji, her zaman aralığındaki birim yağış enerjisi ile yağış yüksekliğinin çarpımlarının toplanmasıyla elde edilir. Birim yağış enerjisi için Türkiye'ye özgü bir bağıntı bulunmadığından, RUSLE el kitabında önerilen ve dünya genelinde yaygın biçimde uygulanan bağıntı kullanılmıştır (Eşitlik 2) [10].

$$e_r = 0{,}29[1 - 0{,}72 \exp(-0{,}05\, i)] \quad (2)$$

Burada e_r birim yağış enerjisi (MJ·ha^{-1}·mm^{-1}), i ise yağış şiddetidir (mm·h^{-1}). Saatlik veriden hesaplanan aşındırıcılık 30 dakikalık veriye göre düşük kaldığından, gözlem kaynaklı sonuçlara 1,2974 ile 1,6995 arasında değişen aylık ölçekleme katsayıları uygulanmıştır [11].

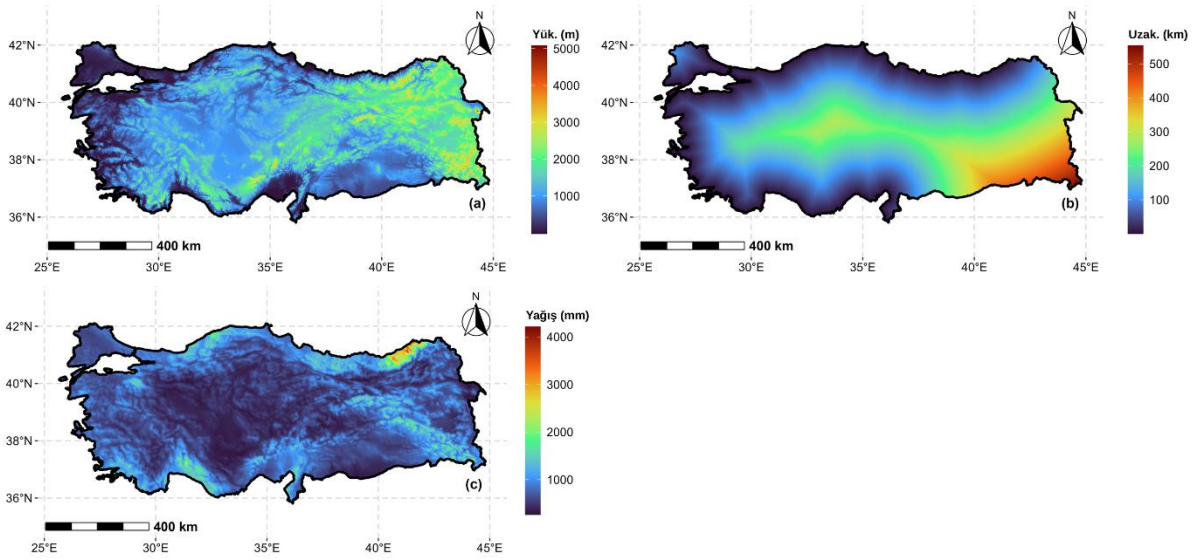
2.3 Günlük Modellerin Kurulması ve Enterpolasyonu

Günlük aşındırıcı yağış yüksekliği $(P_{gün})$ ile günlük aşındırıcılık arasındaki ilişki, üstel bir bağıntıyla tanımlanmıştır (Eşitlik 3) [12].

$$EI_{30,\text{gün}} = \alpha_k \times P_{\text{gün}}^{\beta} \quad (3)$$

Burada α_k soğuk (Ekim–Nisan) ve sıcak (Mayıs–Eylül) dönemler için değişen, β ise sabit olan model parametreleridir. Parametreler, aşındırıcılığın uzun kuyruklu dağılımına daha uygun olduğu için logaritmik bağlantı fonksiyonlu Gama genelleştirilmiş doğrusal modeliyle kalibre edilmiştir [4]. Parametrelerin günlük yağış toplamlarına doğrudan uygulanabilmesi için günlük aşındırıcı yağış eşiği 0,1 mm'lik adımlarla aranmış ve yıllık aşındırıcılığın ortalama bağıl sapmasını (MRD) en aza indiren değer 10,9 mm olarak belirlenmiştir.

Eğitim istasyonlarında elde edilen parametreler, dışsal sürüklenmeli kriging (KED) yöntemiyle 1 km çözünürlüklü sürekli yüzeylere dönüştürülmüştür. KED, birincil değişkenle doğrusal ilişkili yardımcı değişkenlerin tahmin sürecine dahil edilmesine izin verdiği için iklim değişkenlerinin haritalanmasında yaygın olarak tercih edilmektedir [13]. Yardımcı değişken olarak 1 km'ye örneklenmiş SRTM yükseklik verisi, en yakın denize uzaklık ve CHELSA veri tabanından alınan ortalama yıllık yağış kullanılmıştır (Şekil 2). Model performansı belirleme katsayısı (R^2), Kling–Gupta verimliliği (KGE), ortalama bağıl yanlılık (MRB) ve bağıl kök ortalama kare hata (RRMSE) ile test istasyonlarında, enterpolasyon performansı ise 5 katlı çapraz doğrulamayla değerlendirilmiştir.



Şekil 2. KED enterpolasyonunda kullanılan açıklayıcı değişkenlerin Türkiye genelindeki dağılımı: (a) 1 km çözünürlüğe örneklenmiş SRTM yüksekliği, (b) en yakın denize uzaklık ve (c) CHELSA veri tabanından alınan ortalama yıllık yağış

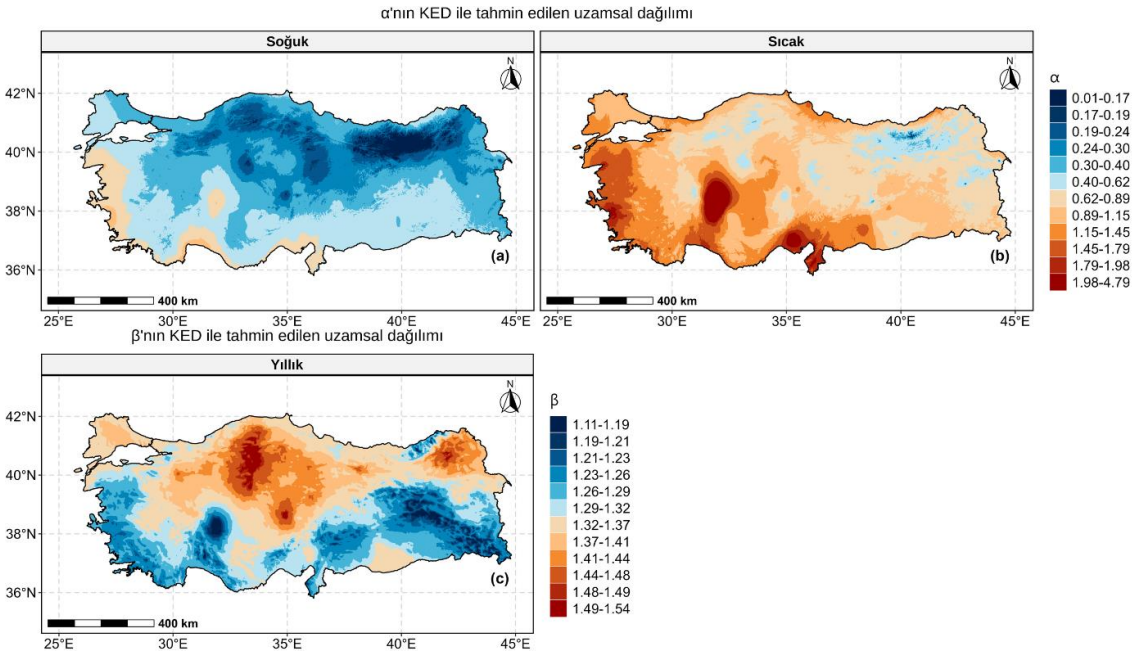
3. Değerlendirme

Günlük modeller için α katsayısı soğuk dönemde ülkenin büyük bölümünde 0,15–0,65 aralığında kalmış, batı ve güney kıyılarında 1,19'a kadar çıkmıştır. Sıcak dönemde değerler ağırlıklı olarak 0,65'in üzerinde seyretmiş, güney ve batı kesimlerde 1,79–4,82'ye ulaşmıştır. β ise belirgin bir konumsal örüntü göstermeksizin 0,92–1,72 aralığında değişmiştir. Yardımcı değişkenlerde yükseklik ve denize uzaklık α ile, ortalama yıllık yağış ise β ile nispeten yüksek korelasyon göstermiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Model parametreleri ile KED yöntemine dahil edilen açıklayıcı değişkenler arasındaki Pearson korelasyon katsayıları

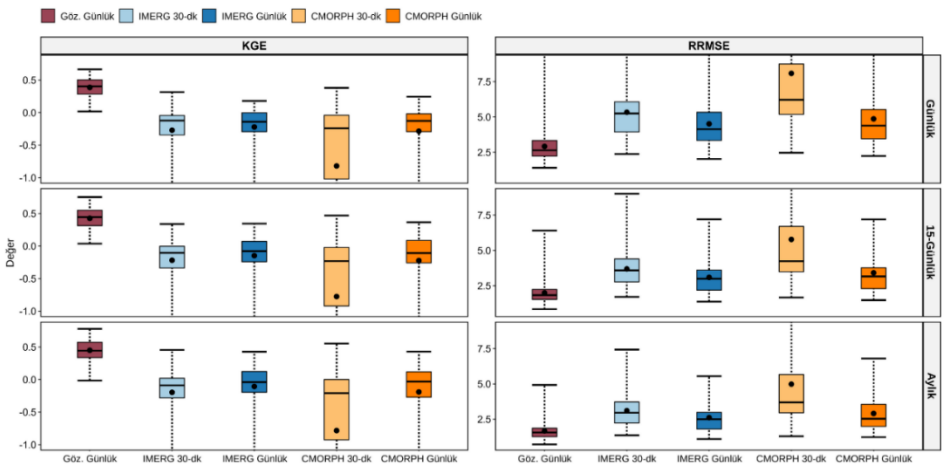
Parametre	Yükseklik	Denize uzaklık	Ortalama yıllık yağış
α (Soğuk dönem)	−0,485	−0,330	0,255
α (Sıcak dönem)	−0,448	−0,333	0,155
β (Yıllık)	0,091	−0,010	−0,216

Çapraz doğrulama sonuçlarına göre KED, soğuk dönem α parametresi için yüksek uyum (R^2 = 0,71; KGE = 0,80) ve düşük hata (RRMSE = 0,23) vermiştir. Sıcak dönem α ve yıllık β için ise performans sırasıyla KGE = 0,49 ve KGE = 0,43 düzeyinde kalmıştır. Elde edilen yüzeylerde α soğuk dönemde genellikle 0,17–0,89 aralığında değişirken sıcak dönemde 4,79'a ulaşmakta, β ise orta ve kuzeydoğu kesimlerde yüksek (≥ 1,41), batı ve güney kesimlerde düşük (≤ 1,29) değerler almaktadır (Şekil 3).



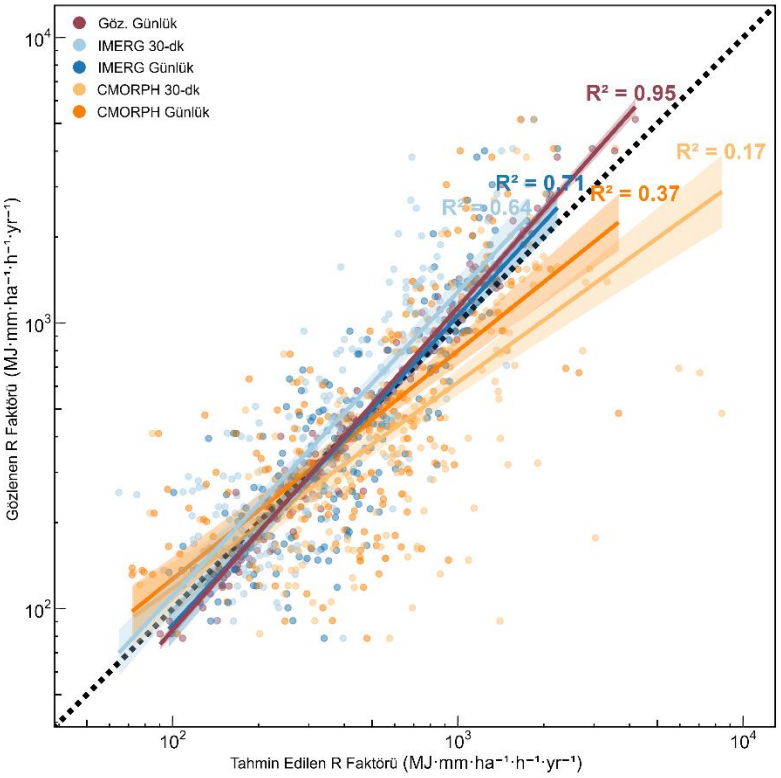
Şekil 3. Günlük yağış aşındırıcılığı modeli parametrelerinin KED ile elde edilen konumsal dağılımı: *α*'nın (a) soğuk ve (b) sıcak dönem dağılımları ile (c) yıllık *β* dağılımı

Parametre yüzeylerinin bağımsız test istasyonlarındaki performansı, günlük ölçekte 0,36 ve aylık ölçekte 0,41 medyan KGE değerleriyle tatmin edici bulunmuştur (Şekil 4). Parametre yüzeylerinin UYT'lerin günlük toplamlarına uygulanması, 30 dakikalık verilerden standart yöntemle yapılan tahminlere kıyasla hatayı azaltmıştır. İyileşme IMERG'de sınırlı kalmış ancak 30 dakikalık tahminlerinde belirgin biçimde yüksek hata veren CMORPH'ta KGE artmış ve RRMSE azalmıştır. Bu farklılık, IMERG'in gelişmiş uydu takımyıldızı ve yanlılık düzeltmesi sayesinde saat altı ölçekte halihazırda güvenilir tahminler sunmasıyla açıklanabilir [7, 14]. Kızılötesi ve pasif mikrodalga gözlemlerine dayanan CMORPH ise karmaşık arazide daha yüksek belirsizlik taşımaktadır [8].



Şekil 4. Test istasyonlarında günlük, 15 günlük ve aylık toplamlar için aşındırıcılık tahminlerine ait KGE ve RRMSE dağılımları. 30 dakikalık ürünlerde standart RUSLE yöntemi, günlük çözünürlükte ise parametre yüzeyleri kullanılmıştır

Uzun dönem ortalama yıllık R faktörü karşılaştırmasında da günlük tahminlerin referans değerlerle daha güçlü ilişki kurduğu görülmektedir (Şekil 5). Belirleme katsayısı IMERG için 30 dakikalık veriyle 0,64 iken günlük modellerle 0,71'e, CMORPH için 0,17'den 0,37'ye yükselmiştir. Günlük gözlemlere uygulanan parametre yüzeyleri ise 0,95'lik belirleme katsayısıyla 1:1 doğrusuna en yakın sonucu vermiştir.



Şekil 5. Tahmin edilen ortalama yıllık R faktörünün (MJ·mm·ha^{-1}·h^{-1}·yıl^{-1}) saatlik gözlemlerden standart RUSLE yöntemiyle hesaplanan değerlerle karşılaştırılması. Her veri seti için regresyon doğrusu, belirleme katsayısı (R^2) ve %95 güven aralığı verilmiştir ve kesikli çizgi 1:1 ilişkiyi gösterir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, saatlik gözlemlerden hesaplanan günlük yağış aşındırıcılığı zaman serileri ile günlük yağış toplamlarını ilişkilendiren modeller Türkiye geneli için parametrelendirilmiş ve parametreler KED ile 1 km çözünürlüklü sürekli yüzeylere dönüştürülmüştür. Bağımsız test istasyonlarındaki doğrulama, yüzeylerin aşındırıcılık büyüklüklerini günlük ölçekte 0,36, aylık ölçekte 0,41 medyan KGE değerleriyle yeniden ürettiğini göstermiştir.

Parametre yüzeylerinin uydu tabanlı ürünlerin günlük toplamlarına uygulanması, 30 dakikalık verilerden yapılan tahminlere kıyasla UYT'lerden elde edilen sonuçlarda hatayı azaltmıştır. Performanstaki artış, saat altı ölçekte zaten yüksek doğruluk gösteren IMERG'de sınırlı kalırken CMORPH'ta daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Daha uzun ve yüksek çözünürlüklü kalibrasyon verisinin kullanılması ile enterpolasyon sürecine aşındırıcılığı kontrol eden ek yardımcı değişkenlerin katılması, tahmin doğruluğunu artırma potansiyeli taşımaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. Earth Surface Processes and Landforms, 43(1), 64-84.

[2] Ballabio, C., Borrelli, P., Spinoni, J., Meusburger, K., Michaelides, S., Beguería, S., Panagos, P. (2017). Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. Science of the Total Environment, 579, 1298-1315.

[3] Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., Yoder, D. C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agricultural Handbook 703, 404p, Washington DC.

[4] Beguería, S., Serrano-Notivoli, R., Tomas-Burguera, M. (2018). Computation of rainfall erosivity from daily precipitation amounts. Science of the Total Environment, 637, 359-373.

[5] Chen, Y., Xu, M., Wang, Z., Gao, P., Lai, C. (2021). Applicability of two satellite-based precipitation products for assessing rainfall erosivity in China. Science of the Total Environment, 757, 143975.

[6] Sariş, F., Hannah, D. M., Eastwood, W. J. (2010). Spatial variability of precipitation regimes over Turkey. Hydrological Sciences Journal, 55(2), 234-249.

[7] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Xie, P. (2023). NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Version 07. Algorithm Theoretical Basis Document, 47p.

[8] Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. Journal of Hydrometeorology, 5(3), 487-503.

[9] Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. USDA Agriculture Handbook 537, 58p, Washington DC.

[10] Brown, L. C., Foster, G. R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. Transactions of the ASAE, 30(2), 379-386.

[11] Panagos, P., Borrelli, P., Spinoni, J., Ballabio, C., Meusburger, K., Beguería, S., Alewell, C. (2016). Monthly rainfall erosivity: conversion factors for different time resolutions and regional assessments. Water, 8(4), 119.

[12] Richardson, C. W., Foster, G. R., Wright, D. A. (1983). Estimation of erosion index from daily rainfall amount. Transactions of the ASAE, 26(1), 153-156.

[13] Goovaerts, P. (1999). Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. Catena, 34(3-4), 227-242.

[14] Derin, Y., Yilmaz, K. K. (2014). Evaluation of multiple satellite-based precipitation products over complex topography. Journal of Hydrometeorology, 15(4), 1498-1516.

Yağış-Akifer Beslenim İlişkisine Bağlı Süzülme Katsayısı Hesabı: Uluova (Elazığ) Havzası Örneği

Murat ÇELİKER
DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, 91. Şube Müdürlüğü, Orcid no: 0000-0003-1211-5561
murat.celiker@dsi.gov.tr

Şerafettin VAROL
DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, Yeraltısuları Şube Müdürlüğü
sevarol@dsi.gov.tr

Cebrail POLAT
DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, Yenilenebilir Enerji Şube Müdürlüğü
cebrail.polat@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: yağış eşik değerleri, süzülme katsayısı, beslenim, Uluova Havzası

1. Amaç

Bu çalışma, Uluova Havzasının (Elazığ) yeraltı suyu hidrolojik bütçesini belirleyen en önemli parametrelerden biri olan süzülme katsayısını hassas bir yaklaşımla ortaya koyarak, bölgedeki yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için sağlam bilimsel bir altyapı oluşturmayı amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, yeraltı suyu beslenim mekanizmalarının tanımlanmasına yönelik olarak “su tablası dalgalanma” metodu ile “çok değişkenli regresyon analizleri” entegre edilmiş; bu modelleme yaklaşımıyla yağış-süzülme ilişkisi ve kritik yağış eşik değerleri (Pe) belirlenerek havzanın dikey beslenim kapasiteleri kantitatif olarak incelenmiştir. Sunulan bulgular, yeraltı suyu dinamiklerinin yerel ölçekte anlaşılmasına katkı sağlarken, yasal su tahsis süreçleri için ihtiyaç duyulan bilimsel karar destek mekanizmalarını güçlendirmesi ve havza bazlı sürdürülebilir yönetim planlarına rehberlik etmesi bakımından literatüre özgün bir değer katmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

2.1.1. Çalışma Alanı

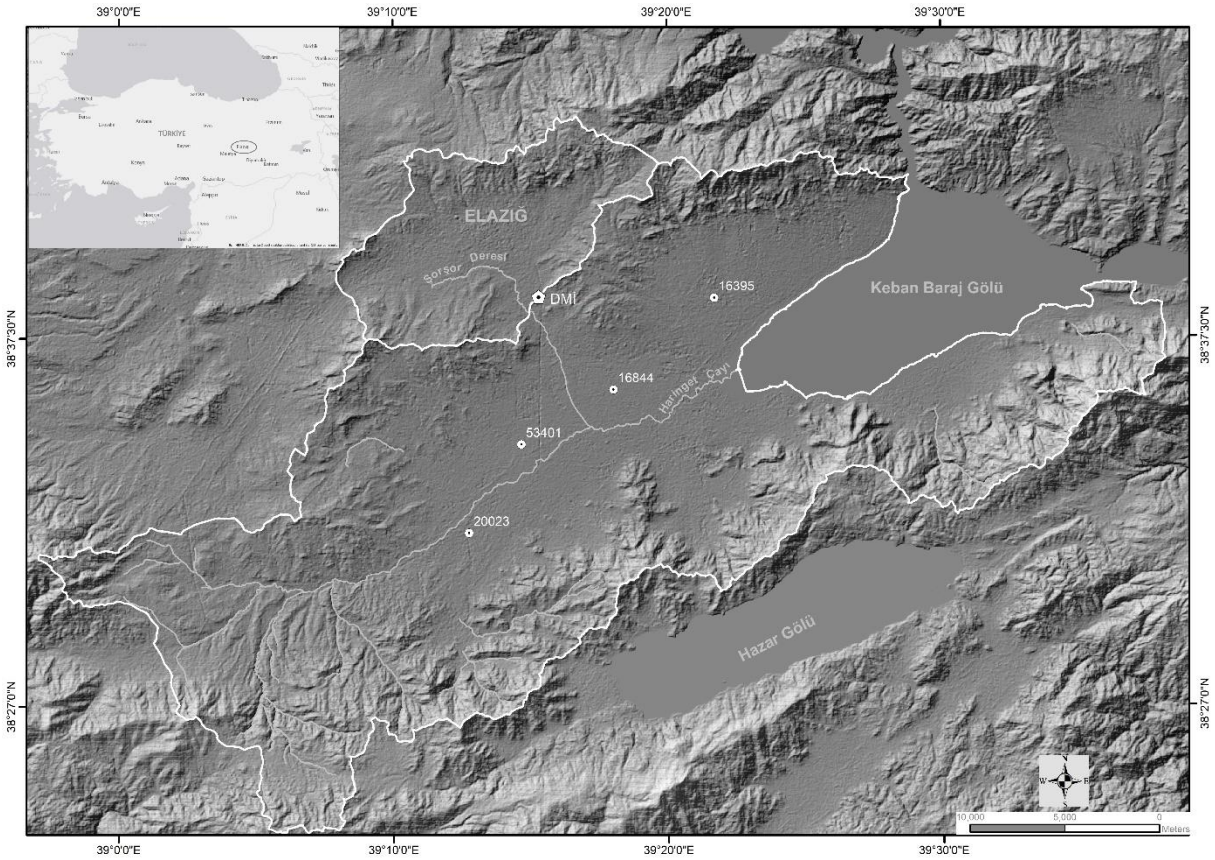
Coğrafi olarak Elazığ il sınırları içerisinde yer alan Uluova Havzası, 38° 57' - 39° 38' doğu boylamları ile 38° 23' - 38° 43' kuzey enlemleri arasında konumlanmaktadır (Şekil 1).

Doğu Anadolu Fay Sistemi’ne bağlı olarak gelişen Palu-Uluova sisteminin alt havzalarından biridir. Havza, neotektonik dönemde doğrultu atımlı fay zonları arasında şekillenmiş tektonik kökenli bir çöküntü ovası karekteri taşımaktadır [1].

Haringet (Uluova) Çayı, havzanın en önemli drenaj hatlarından biridir ve Keban Baraj Gölü’ne boşalım yapar.

Uluova Havzası, 22.848 hektarlık bir sulanabilir tarım arazisi potansiyeline sahiptir [2]. Havza genelinde yeraltı suyu potansiyelinden yararlanmak amacıyla çok sayıda kuyu açılmış olup; bu kuyulardan elde edilen sular, hem kırsal ve kentsel yerleşim yerlerinin içme ve kullanma suyu ihtiyaçlarının karşılanmasında hem de bireysel sulama faaliyetlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Havzanın iklimsel karakteristiklerini yansıtan uzun yıllar ortalaması verilerine göre; bölgede yıllık ortalama sıcaklık 13,2 °C, yıllık toplam yağış miktarı ise 416,8 mm olarak kaydedilmiştir [3].



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

2.1.2. Genel Jeoloji

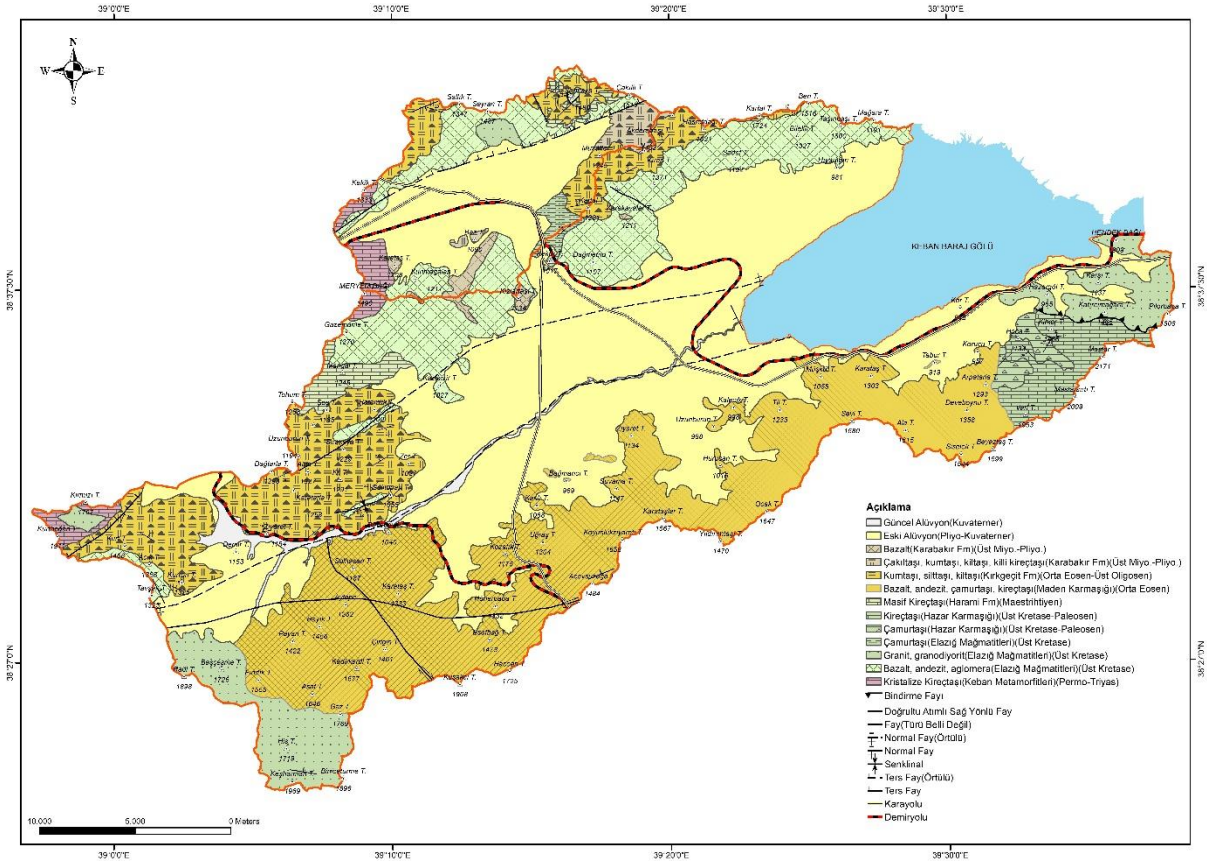
Havzada yüzeyleyen jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru sırasıyla şu şekildedir: Permo-Triyas yaşlı kristalize kireçtaşı ve mermerlerden oluşan Keban Metamorfitleri; granit, granodiyorit gibi derinlik kayaçları ile bazalt, andezit ve diyabaz yüzey kayaçları; çamurtaşı, silttaşı ve kireçtaşı ardalanmalı Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri; tabanı karasal konglomera ve kumtaşı, üstü masif kireçtaşından oluşan Üst Maastrihtiyen yaşlı Harami Formasyonu; kırıntılı kısımlar ile karstik kireçtaşlarını içeren Üst Kretase-Paleosen yaşlı Hazar Karmaşığı; tektonik karışık nitelikli Orta Eosen yaşlı Maden Karmaşığı; tabanda transgresif konglomeralarla başlayıp fliş karakterli birimlerle devam eden Orta Eosen-Üst Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu; tortul ve volkanik kayaçları kapsayan Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Karabakır Formasyonu ve en üstte yer alan Pliyo-Kuvaterner ile Kuvaterner yaşlı eski ve güncel alüvyonlar (Şekil 2) [4].

2.1.3. Veri Seti

Araştırmanın veri setini, Devlet Su İşleri 9. Bölge Müdürlüğü tarafından havzadaki gözlem kuyularından (16395, 16844, 20023 ve 53401 nolu) temin edilen aylık statik su seviyesi ölçümleri ile Elazığ Meteoroloji Müdürlüğü'ne ait aylık toplam yağış verileri oluşturmaktadır (Şekil 1).

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında havzadaki gözlem kuyularından elde edilen aylık statik seviye değişimleri aylık toplam yağış verileri ile eşleştirilmiştir. Akifer beslenim miktarları, meteorolojik veriler ile akifer seviye değişimleri arasındaki korelasyona dayalı bir modelleme yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Hidrolojik zaman serisi analizlerinde ve yeraltı suyu seviyesi dalgalanmalarının modellenmesinde, değişkenler arasındaki istatistiksel ilişkilerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için güvenilir bir temel performans seviyesi oluşturulması amacıyla Çoklu Doğrusal Regresyon yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir [5, 6,7].



Şekil 2. Çalışma Alanı Jeoloji Haritası (Varol, Ş., Polat, C., Çeliker, M., 2024)

2.2.1. Yağış Eşiği (Pe) Analizi

Hidrolojik sistemlerde atmosferik yağışın akiferi besleyebilmesi için aşılması gereken kritik bir 'yağış eşiği' (Pe) bulunmaktadır. Bu eşik değer, yeraltı suyu seviye değişimlerinin sıfır olduğu nokta baz alınarak belirlenmiştir. Bu analizde, eşik değer üzerindeki pozitif değişimler meteorolojik beslenimi doğrularken, negatif değerler akifere dışsal kaynaklardan beslenim geldiğine işaret etmektedir [8].

2.2.2. Regresyon ve İstatistiksel Doğrulama

Yağıştan beslenim miktarının istatistiksel olarak doğruluğunu araştırmak için Beslenim Yükselimi (ΔH) - Beslenim Yağışı (P_t) arasındaki ilişki regresyon analizi ile modellenmiştir. Denklemlerin istatistiksel anlamlılığı Fisher (F) testi ile denetlenmiş; $F_{Hesaplanan} > F_{Tablo}$ olduğu durumlarda regresyon denklemi anlamlı kabul edilmiştir [9].

2.2.3. Süzülme Katsayısı Belirleme

Yukarıda belirtilen meteorolojik ve hidrodinamik analizler neticesinde elde edilen beslenim ve yağış değerleri temel alınarak, havzanın süzülme katsayısı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır:

Süzülme Katsayısı = Ortalama Süzülme / Ortalama Yağış (1)

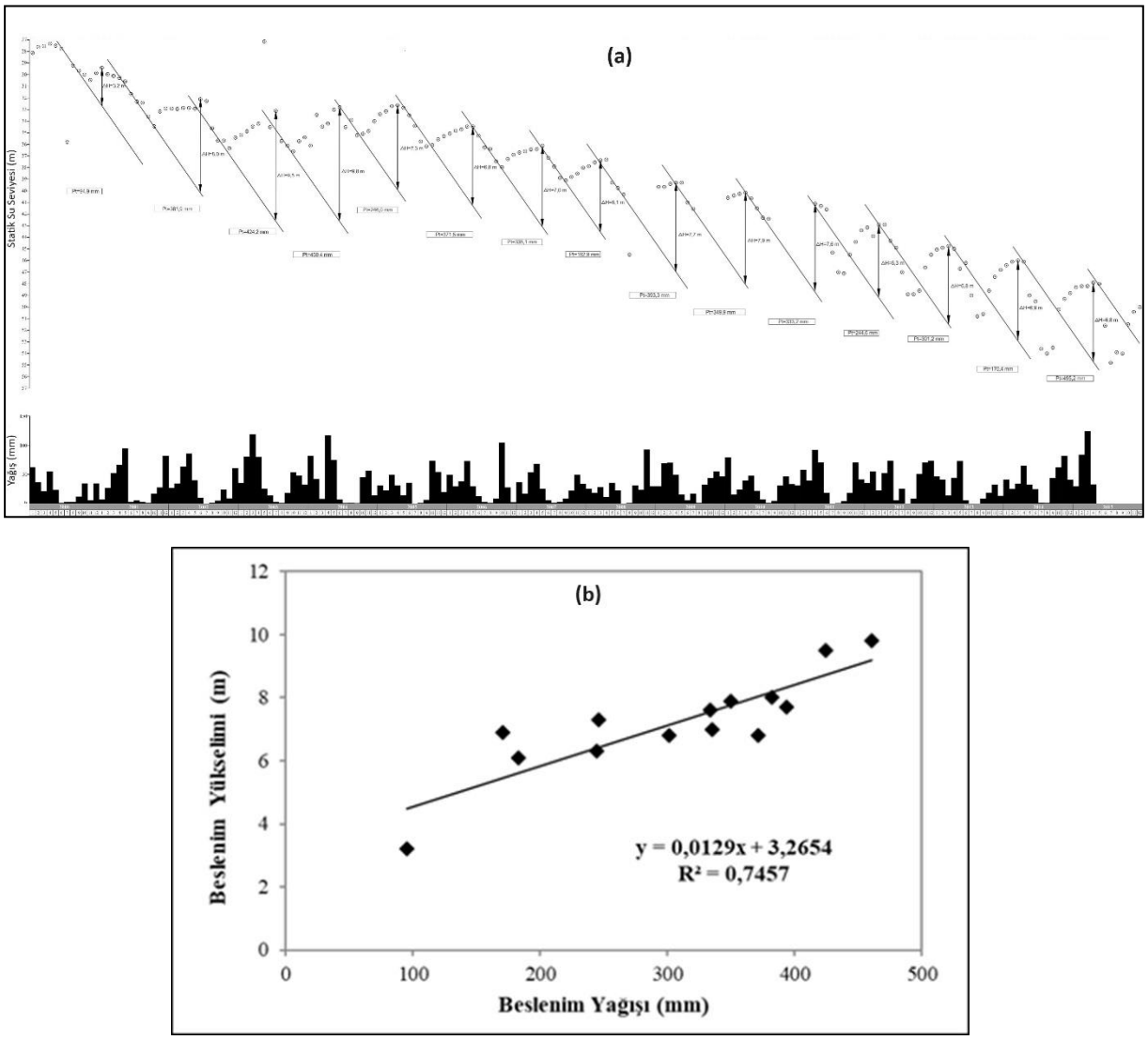
3. Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümünde, Uluova Havzası'ndaki gözlem kuyularından elde edilen verilere dayanılarak elde edilen regresyon denklemleri ve Fisher (F) testi analiz sonuçları, bunlara ilişkin grafiksel bulgularla birlikte ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Gözlem kuyularında, beslenim yükselimi (ΔH) ile beslenim yağışı (P_t) arasındaki etkileşimler ayrı ayrı ele alınarak şu bulgular elde edilmiştir:

3.1. 16395 No'lu Kuyu (Yurtbaşı)

15 yıllık veri seti üzerinden elde edilen y = 0,0129.x + 3,2654 regresyon denkleminin belirlilik katsayısı R^2 = 0,7457 olarak saptanmıştır (Şekil 3a, b). Gerçekleştirilen F-testi neticesinde, hesaplanan F_H değerinin (32,654) kritik F_t değerinden (4,67) istatistiksel olarak yüksek olması, denklemin anlamlılığını

doğrulamaktadır. Bu regresyon denklemine göre yağış eşik değeri (Pe) -253,13 mm olarak belirlenirken, süzülme katsayısı %87 düzeyinde hesaplanmıştır.



Şekil 3. (a) 16395 no'lu gözlem kuyusuna ait statik su seviyesi- yağış ilişkisi grafiği, (b) 16395 no'lu gözlem kuyusuna ait yükselim- yağış korelasyon grafiği

3.2. 16844 No'lu Kuyu (Yazıkonak)

10 yıllık verilerle oluşturulan y = 0,0291.x + 5,9769 denklemi için R^2 değeri 0,7828 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4a, b). F-testi uygulaması sonucunda F_H (34,74) değerinin F_t (5,32) değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Söz konusu regresyon denkleminde yağış eşik değeri (Pe) -205,39 mm olarak bulunmuş olup, süzülme katsayısı %93 seviyesindedir.

3.3. 20023 No'lu Kuyu (Gözebaşı)

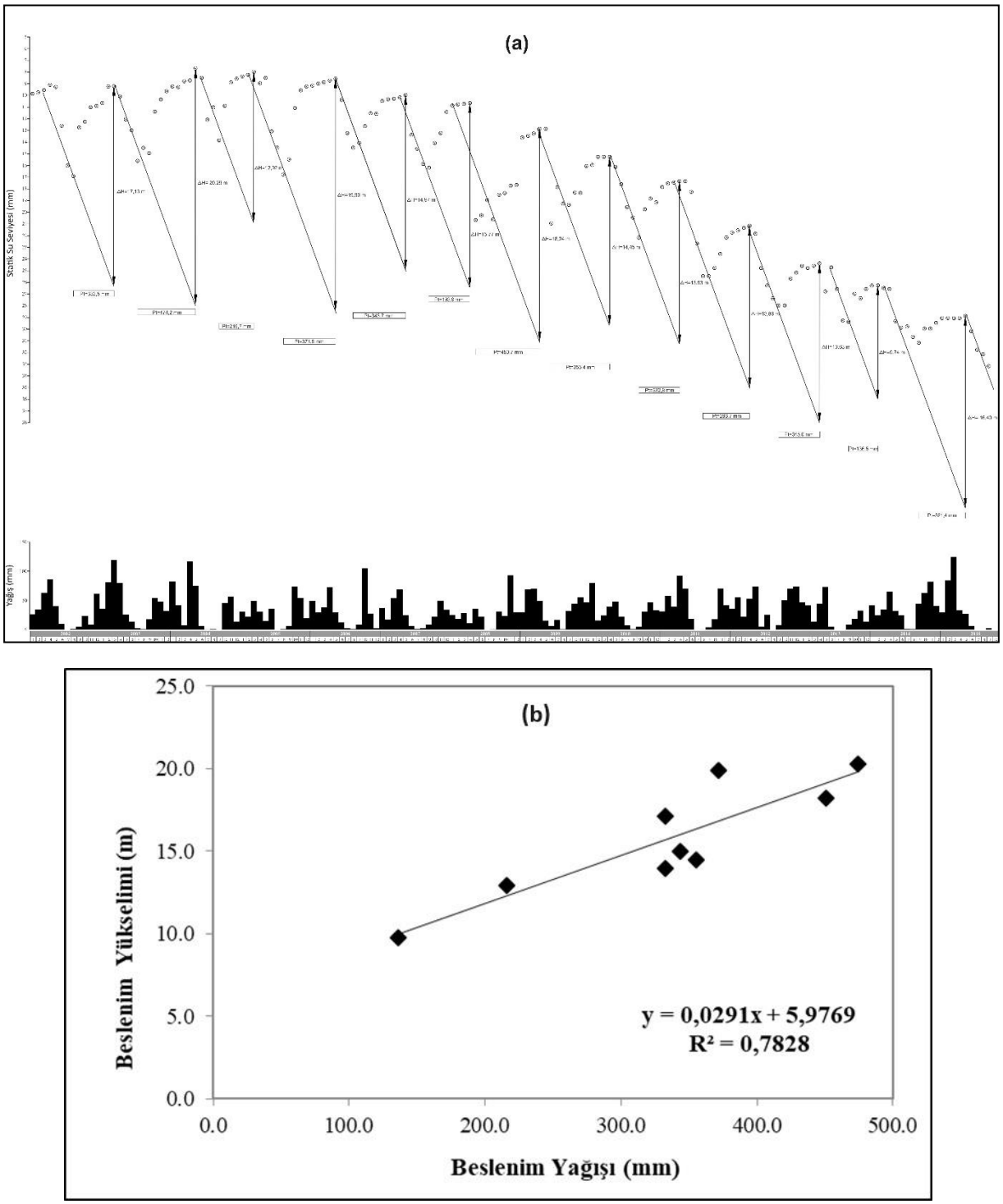
7 yıllık verilerle oluşturulan y = 0,0185.x - 0,7546 regresyon denklemi, R^2 = 0,8791 değeriyle ifade edilmiştir (Şekil 5a, b). F-testi neticesinde F_H (29,32) değerinin F_t (6,61) değerinden büyük olduğu anlaşılmıştır. Bu kuyu için yağış eşik değeri (Pe) 40,78 mm olarak elde edilmiş, süzülme katsayısı ise %40 olarak hesaplanmıştır.

3.4. 53401 No'lu Kuyu (Kuyulu)

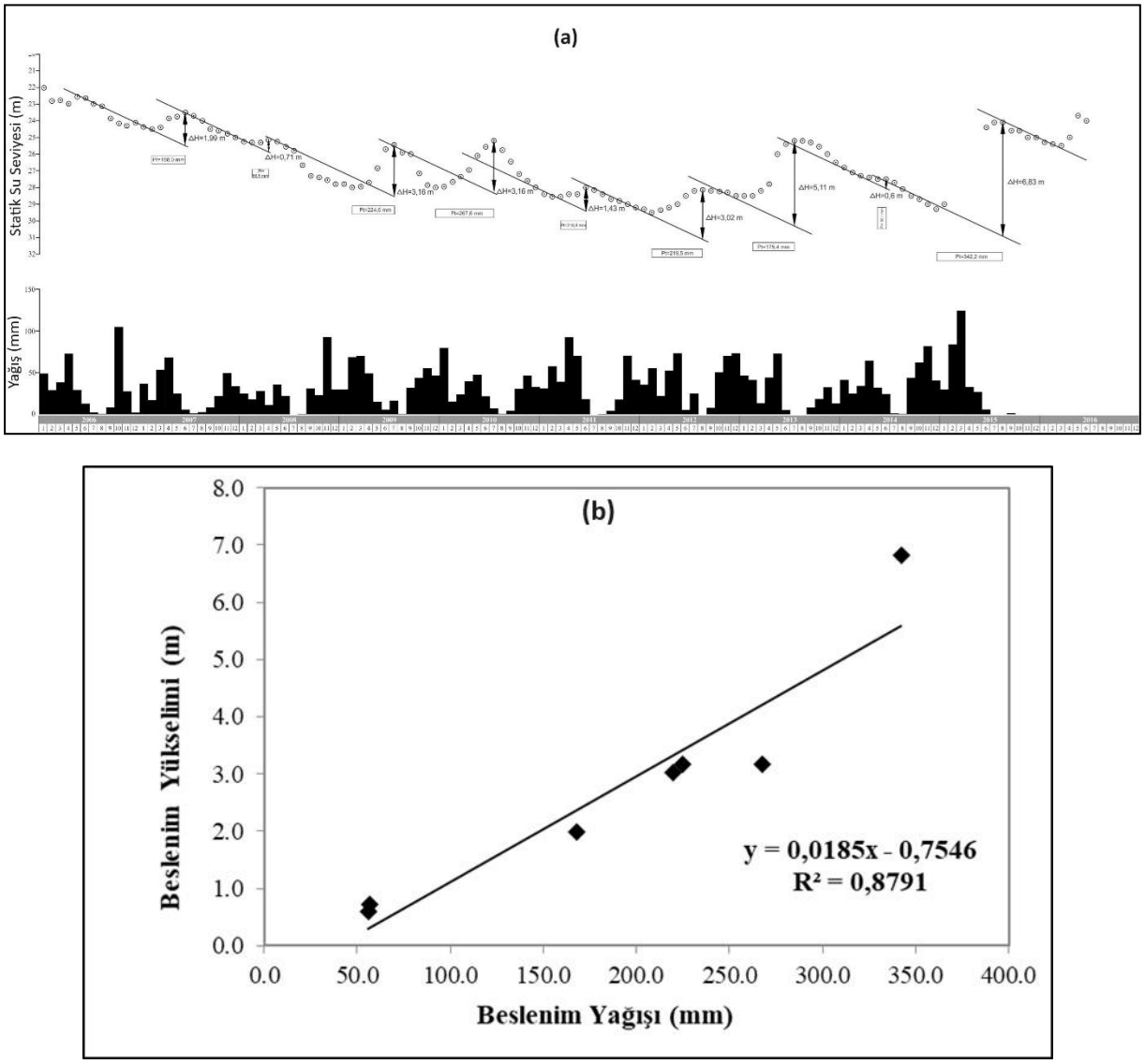
7 yıllık verilerle hazırlanan y = 0,028x + 6,8063 regresyon denklemi için R^2 = 0,7725 olarak bulunmuştur (Şekil 6a, b). F-testi verilerine göre F_H (7,47) değeri F_t (6,61) sınırının üzerinde yer almıştır. Bu denkleme

bağlı olarak yağış eşik değeri (Pe) -243,08 mm şeklinde tanımlanırken, süzülme katsayısı %159 olarak saptanmıştır.

Doğrudan meteorolojik beslenimi temsil eden gözlem kuyuları (16395, 16844 ve 20023) baz alındığında, havza genelinde ortalama süzülme katsayısının %73 olarak gerçekleştiği öngörülmüştür.



Şekil 4. (a) 16844 no'lu gözlem kuyusuna ait statik su seviyesi- yağış ilişkisi grafiği, (b) 16844 no'lu gözlem kuyusuna ait yükselim- yağış korelasyon grafiği



Şekil 5. (a) 20023 no'lu gözlem kuyusuna ait statik su seviyesi- yağış ilişkisi grafiği, (b) 20023 no'lu gözlem kuyusuna ait yükselim- yağış korelasyon grafiğ

4. Sonuçlar

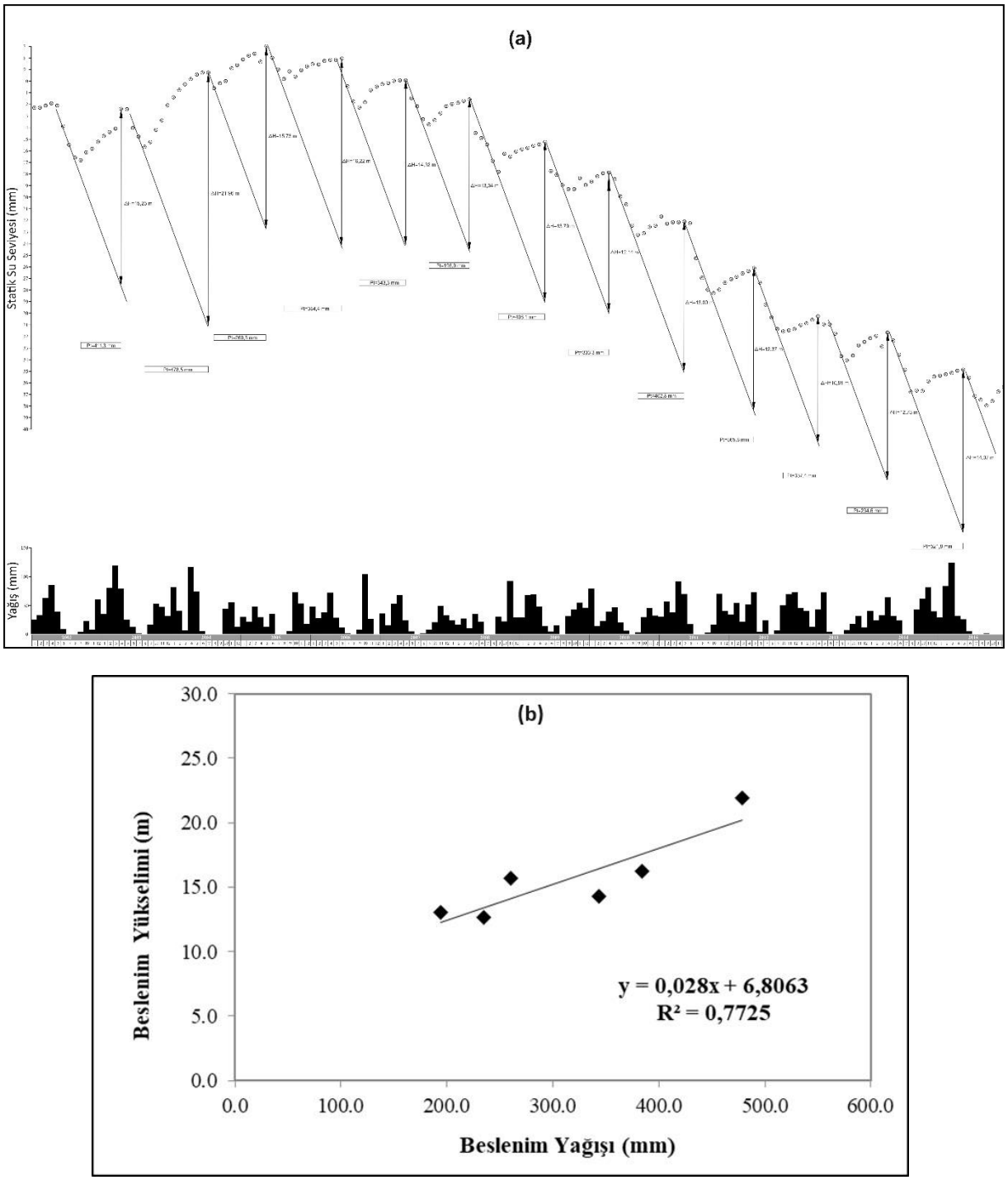
Regresyon analizleri ve F-testi sonuçları, 16395, 16844, 20023 ve 53401 no'lu gözlem kuyularında yeraltı suyu seviye değişimleri ile meteorolojik beslenim arasında istatistiksel açıdan anlamlı (bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Hesaplanan yağış eşik değerleri (Pe), havza içerisindeki hidrolojik davranışın mekânsal heterojenliğini ortaya koymuştur. 16395, 16844 ve 53401 no'lu gözlem kuyularında elde edilen negatif Pe değerleri, akifer sisteminin sadece doğrudan yağış ile değil, yanal akım bileşenleri ve yüzeysel su sistemleri (Haringet Çayı, sulama sistemleri, vb.) tarafından düzenlenen kompleks bir beslenme mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 53401 numaralı kuyu verileri, yüzey-yeraltı suyu etkileşiminin havza beslenimindeki baskın rolünü teyit etmektedir.

20023 no'lu gözlem kuyusunda tespit edilen pozitif (Pe) değeri, bu akifer sisteminin yanal ve yüzeysel su beslenimlerden bağımsız olarak doğrudan meteorolojik beslenime duyarlı olduğunu göstermektedir.

Hesaplanan süzülme katsayıları ve eşik değerleri, havza genelinde yeraltı suyu işletme projeksiyonları için önemli veri setleri sağlamaktadır. Özellikle negatif eşik değerine sahip birimlerde, yeraltı suyu

seviyelerinin yağış dışındaki dışsal faktörlere (yüzeysel akış, yanal sızma) daha duyarlı olduğu göz önüne alındığında; bu alanlarda yeraltısuyu kaynaklarının korunmasına yönelik işletme politikalarının (kuyu açımı, çekim miktarları vb.) belirlenmesinde daha hassas olunması gerekliliğini göstermektedir.



Şekil 6. (a) 53401 no'lu gözlem kuyusuna ait statik su seviyesi- yağış ilişkisi grafiği, (b) 53401 no'lu gözlem kuyusuna ait statik su seviyesi- yağış ilişkisi grafiği

Teşekkür

Kurumumuzun yürüttüğü arşiv ve araştırma faaliyetlerinin bilimsel çalışmalara katkı sağlayan bu değerli verilerin kullanımına imkân tanınmasından dolayı DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuyu Dairesi Başkanlığı'na teşekkürlerimizi arz ederiz.

5. Kaynaklar

[1] Çolak, S., Aksoy, E., Koçyiğit, A., İnceöz, M. (2012). The Palu-Uluova Strike-Slip Basin in the East Anatolian Fault System, Turkey: Its Transition from the Palaeotectonic to Neotectonic Stage. Turkish Journal of Earth Sciences, 21(4), 547–570.

[2] DSİ (2012). Elazığ-Uluova Projesi Uluova Sulaması Planlama Revize Arazi Sınıflandırma ve Drenaj Raporu, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, Elazığ.

[3] DSİ (2024). Elazığ ve Uluova Havzası revize hidrojeolojik etüt raporu, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı DSİ 9. Bölge Müdürlüğü, Elazığ.

[4] DMİ(2022). Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ELAZIG#s, (Erişim tarihi: 15 Şubat 2022).

[5] Yoon, H., Jun, S. C., Hyun, Y., Kwon, K. G., & Lee, K. K. (2011). A comparative study of artificial neural networks and multiple linear regression models for modeling groundwater level fluctuations in Korea, Environmental Earth Science, 63 (6),1409–1419.

[6] Huang, X., Gao, L., Crosbie, R. S., Zhang, N., Fu, G., Doble, R. (2019). Groundwater recharge prediction using linear regression, multi-layer perception network, and deep learning. Water, 11(9), 1879.

[7] Huang, L., Yao, M., Liu, M., & Liu, K. (2026). Determination of precipitation infiltration recharge coefficient based on multi-factor integration in the Huaibei Plain Region of Anhui Province, China. Hydroscience Journal, 112, 2656244.

[8] Healy, R. W., Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, 10(1), 91-109.

[9] Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining, G. G. (2012). Introduction to Linear Regression Analysis. New Jersey.

Türkiye'de Ekstrem Yağışların Zamansal Dinamikleri

Nariman YAHYA OTHMAN*
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 343420 Esenler/İSTANBUL, 0000-0002-1908-2080
nariman.othman@std.yildiz.edu.tr

Berna AYAT AYDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 343420 Esenler/İSTANBUL, 0000-0002-8460-2839
bayat@yildiz.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* ekstrem yağışlar, ERA5 yeniden analiz verisi, zamansal değişkenlik, ETCCDI İndisleri, Türkiye

1. Amaç

Küresel iklim değişikliği, hidrolojik döngünün hızlanmasına neden olarak yağış rejimlerinde küresel ve bölgesel ölçekte belirgin değişimler yaratmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporları, ortalama yağış miktarlarındaki değişimlerden ziyade, şiddetli yağış ve kuraklık gibi ekstrem hidro-meteorolojik olayların sıklığında, şiddetinde ve değişkenliğinde artış yaşandığını vurgulamaktadır. Özellikle Akdeniz Havzası'nda yer alan Türkiye, karmaşık topoğrafyası ve iklimsel geçiş kuşağında bulunması nedeniyle iklim değişikliğinin bu yıkıcı etkilerine karşı oldukça hassas bir konumdadır. Son yıllarda ülke genelinde artan taşkın, sel ve şiddetli kuraklık olayları, ekstrem yağış karakteristiklerinin zaman içindeki evriminin detaylı olarak anlaşılmasını su kaynakları yönetimi ve afet risk azaltımı açısından hayati hale getirmiştir.

Türkiye'nin de içinde yer aldığı Akdeniz Havzası, küresel iklim değişikliği kaynaklı etkilere en duyarlı bölgelerden biri olarak uluslararası literatürde geniş yer bulmaktadır [1]. Çeşitli araştırmacılar tarafından uzun dönemli veri setleri kullanılarak Akdeniz havzasında yapılan bölgesel çalışmalar, düşük frekanslı atmosferik salınımların ekstrem yağış rejimlerini giderek daha değişken ve yıkıcı hale getirdiğini ortaya koymaktadır [2, 3].

Türkiye üzerinde ekstrem yağışları inceleyen literatürde son yıllarda önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, [4], günlük gözlem verilerini kullanarak Türkiye genelindeki sıcaklık ve ekstrem yağışların uzun dönemli eğilimlerini incelemişlerdir. Benzer şekilde, bölgesel havza ölçeğindeki çalışmalarda [5], 1970-2017 yılları arasında 8 istasyona ait verileri kullanarak Antalya Havzası'ndaki yağışların uzaysal-zamansal değişkenliğini değerlendirmiş ve havza genelinde yağış desenlerinde ve ekstremlerde belirgin kırılmaların yaşandığı üç farklı dönemin varlığını ortaya koymuştur. [6] ise yedi farklı yağış indisinde istatistiksel olarak anlamlı mevsimsel değişkenlikler ve eğilimler tespit etmiş; özellikle Kuzey Atlantik Salınımı'nın kış yağış değişkenliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Seyhan Havzası'nda 1970'den 2019'a uzanan dönemi ele alan [7], yağış ve ekstrem indislerin uzaysal-zamansal değişkenliğini araştırarak, havzanın güney kesimlerinde yağış şiddetinin, kuzey kesimlerinde ise kurak gün sayısının arttığını vurgulamışlardır.

Bu çalışmalar bölgesel ve ulusal ölçekte iklim dinamiklerine dair çok değerli bulgular sunmakla birlikte; genel olarak istasyon verilerinin elverdiği göreceli olarak daha kısa gözlem periyotlarına (40-50 yıl) dayanmakta veya belirli havzalarla sınırlı kalmaktadır. Ekstrem olayların doğasındaki karmaşıklık, düşük frekans ve uzun vadeli periyodik döngüler, istatistiksel olarak daha sağlam sonuçlar elde edebilmek için çok daha uzun süreli ve kesintisiz veri setlerine ihtiyaç duymaktadır. Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) tarafından üretilen ve 1940 yılına kadar uzanan yüksek çözünürlüklü ERA5 yeniden analiz veri seti, bu bağlamda tarihi iklim dinamiklerini ulusal ölçekte incelemek için eşsiz bir fırsat sunmaktadır. Dahası, literatürde yağış ekstremiteleri çoğunlukla doğrusal trend testleri ile değerlendirilirken; yıllar arası değişkenliğin kendisinin zamanla nasıl değiştiğini ve çoklu yıllara yayılan döngüsellik varlığını istatistiksel anlamlılık testleriyle birleştiren çalışmalar halen eksiktir.

Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı; Türkiye genelinde ERA5 yağış verileri kullanılarak 1940-2024 yılları (85 yıl) arasındaki döneme ait İklim Değişikliği Tespiti ve İndisleri Uzman Ekibi (ETCCDI) tarafından

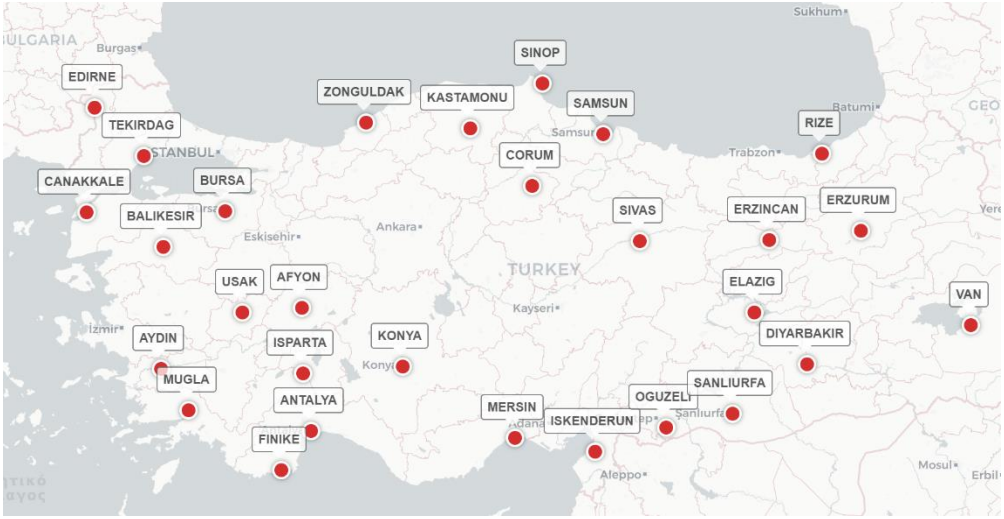
tanımlanan ekstrem yağış indislerinin zamansal dinamiklerini kapsamlı bir şekilde analiz etmektir. Çalışma kapsamında sadece geleneksel trend tespitleri yapılmayacak olup, temel olarak iki farklı boyuta odaklanılacaktır: (1) Hareketli varyans ve değişim katsayısı (CV) metrikleri Levene ve modifiye Mann-Kendall testleri ile sınanarak ekstrem yağışlardaki zamansal oynaklığın/değişkenliğin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde artıp artmadığı incelenecektir. (2) Dalgacık analizi kullanılarak ekstrem yağışlardaki çoklu yıllara yayılan periyodik döngüler ve kırmızı gürültü testleriyle doğrulanmış frekans değişimleri ortaya konacaktır. Bu analizlerin sonuçlarının, Türkiye'nin iklimsel ekstremitelere karşı direncini artırmak adına, su mühendisliği uygulamalarına ve taşkın tasarım kriterlerine önemli bir bilimsel vizyon sunması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı ve Veri Seti

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerini temsil kabiliyetine sahip 29 farklı lokasyon (Şekil 1) çalışma alanı olarak seçilmiştir. Çalışmada Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesini, farklı makro-iklim rejimlerini ve kıyıdan iç kesimlere uzanan rakım gradyanlarını dengeli biçimde temsil eden ve mümkün olan en uzun tarihsel rasat geçmişine sahip istasyon konumlarını içeren homojen bir mekânsal ağ oluşturulması hedeflenmiştir. Seçilen bu istasyon noktaları için yüksek çözünürlüklü ve uzun dönemli iklim verilerine ulaşmak amacıyla, Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) tarafından sağlanan ERA5 yeniden analiz veri seti kullanılmıştır. ERA5, 0.25°×0.25° (yaklaşık 30 km) uzaysal çözünürlüğe sahip olup, bu çalışma kapsamında 1940-2024 yıllarını kapsayan 85 yıllık günlük toplam yağış verileri 29 istasyon koordinatına en yakın komşu yöntemi ile çekilmiştir. Bu yaklaşımda, her bir istasyonun coğrafi koordinatlarına (enlem ve boylam) en yakın olan ERA5 grid hücresinin merkezi tespit edilmiş ve herhangi bir yumuşatma veya konumsal filtreleme yapılmaksızın, ilgili gridin ham verisi doğrudan istasyon noktası verisi olarak elde edilmiştir.

ERA5 yeniden analiz veri setinin Türkiye üzerindeki meteoroloji istasyon rasatlarıyla olan tutarlılığı, uzun dönemli istasyon gözlem verileri kullanılarak önceki çalışmalarda doğrulanmıştır [8]. Söz konusu çalışmanın bulgularına göre ERA5 verileri istasyon gözlemleriyle uyum göstermektedir. Bu çalışmada yeniden bir istasyon doğrulaması yapılmamış, doğrudan 85 yıllık kesintisiz veri setinin sunduğu uzun dönemli varyans değişimlerine ve dalgacık analizlerine odaklanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı seçilen istasyon konumları

2.2. Ekstrem Yağış İndisleri (ETCCDI)

Günlük yağış verileri kullanılarak, Dünya Meteoroloji Örgütü himayesindeki İklim Değişikliği Tespiti ve İndisleri Uzman Ekibi (ETCCDI) tarafından tanımlanan ekstrem yağış indislerinin zaman serileri hesaplanmıştır [9 – 1]. Çalışmada; şiddet (Rx1gün, Rx5gün, SDII), miktar (TOPYAGIS), frekans (R1mm, R5mm, R10mm, R20mm) ve süreklilik (ardışık kurak günler - AKG, ardışık yağışlı günler - AYG) boyutlarını yansıtan temel indisler ile %85, %95 ve %99'luk aşımına dayalı çok şiddetli yağış indisleri

(R85y, R95y, R99y) analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan 13 ekstrem yağış indisi, hesaplama tanımları ve birimleri Tablo 1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan ETCCDI ekstrem yağış indisleri ve tanımları

Kategori	İndis Kodu	Tanımı / Hesaplama Yöntemi	Birimi
Süreklilik	AKG	Günlük yağışın < 1 mm olduğu birbirini izleyen maksimum gün sayısı	gün
	AYG	Günlük yağışın ≥ 1 mm olduğu birbirini izleyen maksimum gün sayısı	gün
Miktar	TOPYAGIS	Yağışlı günlerdeki (≥ 1 mm) yıllık toplam yağış miktarı	mm
Frekans	R1mm	Yıl içindeki yağışlı gün sayısı (Günlük yağış ≥ 1,0 mm)	gün
	R5mm	Günlük yağışın ≥ 5 mm olduğu gün sayısı	gün
	R10mm	Günlük yağışın ≥ 10 mm olduğu şiddetli yağışlı gün sayısı	gün
	R20mm	Günlük yağışın ≥ 20 mm olduğu çok şiddetli yağışlı gün sayısı	gün
Şiddet	SDII	Yıllık toplam yağışın yağışlı gün sayısına oranı (Günlük ortalama yağış şiddeti)	mm/gün
	Rx1gün	Bir yıl içinde tek bir günde düşen maksimum yağış miktarı	mm
	Rx5gün	Bir yıl içinde ardışık 5 günde düşen maksimum toplam yağış miktarı	mm
	R85y	Günlük yağışın 85. yüzdeliği aştığı günlerdeki toplam yağış miktarı	mm
	R95y	Günlük yağışın 95. yüzdeliği aştığı çok şiddetli yağış miktarı	mm
	R99y	Günlük yağışın 99. yüzdeliği aştığı aşırı ekstrem yağış miktarı	mm

2.3. Zamansal Değişkenlik ve Dalgacık Analizi

Hesaplanan indislerin 85 yıllık zaman serilerindeki düşük frekanslı salınımların tespiti için Sürekli Dalgacık Dönüşümü kullanılmıştır. Bu analiz ile zaman serisindeki varyansın hangi periyotlarda yoğunlaştığı ve bu döngülerin 1940'tan günümüze nasıl bir değişim geçirdiği ortaya konmuştur. Dalgacık güç spektrumundaki anlamlı periyotlar, Kırmızı Gürültü arka plan modeline göre %95 güven düzeyinde test edilmiştir.

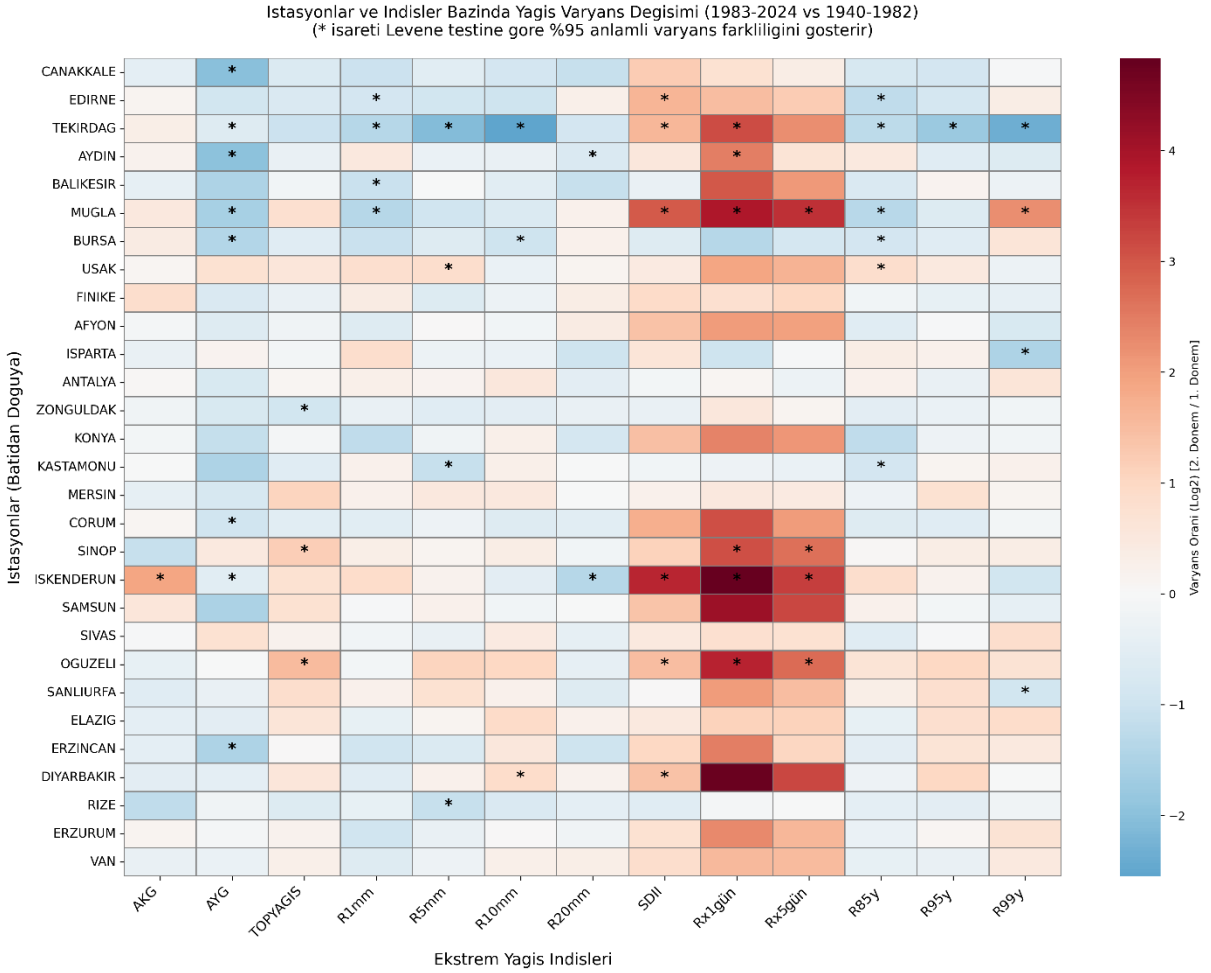
Bunun yanı sıra, ekstrem yağışlardaki zamansal değişkenliğin artıp artmadığını incelemek için Hareketli Değişim Katsayısı (CV) ve Hareketli Varyans yaklaşımları kullanılmıştır. Zaman serisi 10'ar yıllık kayan pencerelere bölünerek varyansın kendi içindeki eğilimi Modifiye Mann-Kendall Testi ile sınanmış; ayrıca 85 yıllık periyot iki alt döneme (1940-1982 ve 1983-2024) ayrılarak bu iki dönem arasındaki varyans farklılıklarının istatistiksel anlamlılığı Levene Testi ile değerlendirilmiştir.

3. Değerlendirme

3.1. Ekstrem Yağışlarda Zamansal Değişkenlik ve Varyans Analizi

İklim değişikliğinin hidrolojik döngü üzerindeki etkileri, yalnızca ortalama değerlerdeki artış veya azalışlarla değil, olayların uç değerlere savrulma eğilimindeki artışlarla da kendini göstermektedir. Bu bağlamda, ERA5 veri seti kullanılarak 29 istasyon ve 13 ETCCDI indisi için 85 yıllık zaman serisi, küresel ısınmanın ivmelendiği 1980'lerin başı referans alınarak ve istatistiksel güç dengesini sağlamak amacıyla 42'şer yıllık eşit uzunlukta iki döneme (1940-1982 ve 1983-2024) ayrılmış ve dönemler arası varyans oranları (Log2) hesaplanmıştır.

Şekil 2'de sunulan ısı haritası, istasyonların batıdan doğuya sıralanmasıyla bölgesel desenlerin incelenmesine olanak tanımaktadır. Haritadaki kırmızı tonlar ikinci 42 yıllık dönemde ekstrem yağış varyansının ilk döneme göre arttığını, mavi tonlar ise azaldığını ifade etmektedir. Üzerinde (*) bulunan hücreler ise bu varyans değişiminin Levene Testi'ne göre %95 güven düzeyinde ($p<0.05$) istatistiksel olarak anlamlı olduğunu kanıtlamaktadır. Isı haritası incelendiğinde; özellikle şiddet indislerinde ve AKG'de Türkiye'nin genelinde varyansın belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, ekstrem yağış olaylarının ve kuraklık periyotlarının zaman içindeki öngörülemezliğinin son 40 yılda ciddi şekilde arttığını göstermektedir.



Şekil 2. İstasyonlar ve indisler bazında zamansal değişkenlik
(1982-2024 ile 1940-1982 dönemlerinin farkı)

3.2. Ekstrem Yağışların Periyodik Döngüleri

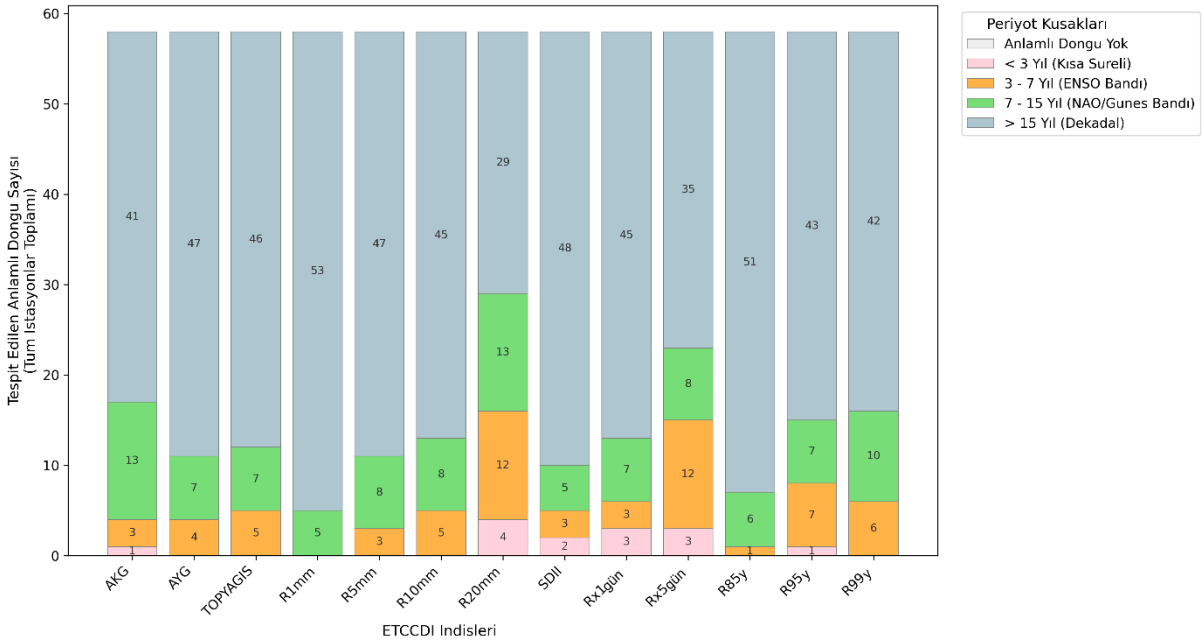
Ekstrem yağış indislerinin zaman serisindeki frekanssal mekanizmalarını incelemek amacıyla uygulanan Sürekli Dalgacık Dönüşümü (CWT) sonuçları, tüm istasyonlar ve indisler bazında bütüncül olarak Şekil 3'te sunulmuştur. Bu yığınlı çubuk grafikte, tespit edilen istatistiksel olarak anlamlı (%95) baskın döngü periyotları, dünyada kabul görmüş temel makro-iklimsel bantlara (Kısa Süreli: <3 yıl, ENSO bandı: 3-7 yıl, NAO/Güneş bandı: 7-15 yıl, Dekadal: >15 yıl) ayrılarak frekans dağılımları verilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde, Türkiye'deki ekstrem yağış dinamiklerinin ağırlıklı olarak 3-7 yıllık (El Niño-Güney Salınımı - ENSO) ve 7-15 yıllık (Kuzey Atlantik Salınımı - NAO) periyot kuşaklarıyla güçlü bir rezonansa girdiği görülmektedir. Örneğin; toplam yağış miktarını (TOPYAGIS) ve çok şiddetli yağış günlerini (R95p, R99p) temsil eden indislerde NAO ve ENSO frekans bantlarının hakimiyeti dikkat çekerken, bu makro-iklimsel osilasyonların Türkiye üzerindeki hidro-meteorolojik ekstremiteleri tetikleyen en önemli doğal motorlar olduğu doğrulanmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'nin 85 yıllık yüksek çözünürlüklü ERA5 veri seti kullanılarak ekstrem yağış karakteristiklerindeki değişimler statik eğilimlerin ötesinde, zamansal değişkenlik (varyans) ve periyodiklik boyutlarıyla incelenmiştir. Bu çalışmada istasyonlara indirgeme yöntemi olarak En Yakın Komşu yaklaşımı kullanılmıştır. Ancak yeniden analiz verisi çözünürlüğünün özellikle karmaşık topoğrafyaya sahip kıyı ve dağlık bölgelerde, Rx1day veya R99p gibi nokta tabanlı konvektif şiddet indislerini tam olarak yansıtamama durumu söz konusu olabilir. Buna karşın, AKD ve AYD gibi ardışık

kurak/yağışlı günleri temsil eden süreklilik indislerinde en yakın komşu yaklaşımı yerine komşu hücrelerin ortalamasını almak gibi yöntemlerin oluşturacağı varyans farkı istatistiksel olarak marjinal kalacaktır. Nitekim bu çalışmanın odak noktası salt şiddet değerleri değil, varyans ve periyot dinamikleri olduğundan, seçilen yöntemin iklimsel döngü sinyallerini yüksek tutarlılıkla yansıttığı değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Ekstrem yağış indisleri bazında baskın dalgacık dönüşümü periyotlarının frekans dağılımı

Hem varyans analizleri hem de dalgacık spektrumları, Türkiye'de taşkın ve şiddetli kuraklık olaylarının salt doğrusal bir artış ya da azalış eğilimiyle değil, genişleyen varyans aralıklarıyla ve makro-iklimsel döngülerin şiddetlenmesiyle karakterize edildiğini göstermektedir. Su mühendisliği uygulamaları açısından bu tablo, geleneksel hidrolojik tasarımlarda kullanılan durağanlık varsayımının geçerliliğini yitirdiğini kanıtlamaktadır. Gelecekte inşa edilecek taşkın koruma yapıları ve baraj savak tasarımlarında, artan bu istatistiksel oynaklığı kapsayacak şekilde taşkın tekerrür debilerinin ve risk faktörlerinin dinamik olarak güncellenmesi gerekmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters, 33, L08707. https://doi:10.1029/2006GL025734.

[2] Xoplaki, E., González-Rouco, J.F., Luterbacher, J. et al. (2004). Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. Climate Dynamics, 23, 63–78. https://doi.org/10.1007/s00382-004-0422-0.

[3] Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F.G., Wanner, H., and Luterbacher, J. (2010). Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 1037–1050. https://doi.org/10.5194/nhess-10-1037-2010.

[4] Ciftci, N.D., Sahin, A.D. (2023). Temperature and precipitation extremes' variability in Turkey. Meteorology and Atmospheric Physics, 135(4), 40. https://doi.org/10.1007/s00703-023-00976-z.

[5] Tongal, H. (2019). Spatiotemporal analysis of precipitation and extreme indices in the Antalya Basin. Theoretical and Applied Climatology, 138 (3–4), 1735–1754. https://doi.org/10.1007/s00704-019-02927-4

[6] Acar, Z., Gönençgil, B. (2022). Investigation of extreme precipitation indices in Turkey. Theoretical and Applied Climatology, 148 (1–2), 679–691. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03971-3

[7] Koycegiz, C., Buyukyildiz, M. (2022). Investigation of precipitation and extreme indices spatiotemporal variability in Seyhan Basin, Turkey. Water Supply, 22 (12), 8603–8624. https://doi.org/10.2166/ws.2022.391

[8] Othman, N.Y., Ayat, B. (2026). A comparative analysis of long-term spatiotemporal variability in precipitation 85 year-long reanalysis and observation data from 150 stations over arid MENA-T region. Theoretical and Applied Climatology, 157, 114. https://doi.org/10.1007/s00704-026-06067-4

[9] Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: workshop summary. Climatic Change, 42, 3–7. https://doi.org/10.1023/A:1005491526870.

[10] Peterson, T.C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., Plummer, N. (2001). Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001.

[11] Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B., Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2 (6), 851–870. https://doi.org/10.1002/wcc.147

Ömerli Havzası Yağış-Akış Modelinin HEC-HMS Programı ile Geliştirilmesi ve Kalibrasyonu

Mustafa Emirhan TELLİOĞLU*
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0009-0000-4961-9718
mustafa.tellioglu@ogr.iuc.edu.tr

Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0000-0002-7362-5170
meleka@iuc.edu.tr

Sezar GÜLBAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0000-0002-2274-6896
sezarg@iuc.edu.tr

Uğur BOYRAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0000-0002-1777-8834
uboyraz@iuc.edu.tr

Kebir Emre SARAÇOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0000-0002-0837-9110
kebir.saracoglu@iuc.edu.tr

İsmail Bilal PEKER
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0000-0001-9133-6797
pekerbilal@iuc.edu.tr

Abdülbaki HACI
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0000-0003-3409-2209
abdulbakihaci0@gmail.com

Muhammet Vefa URÇAR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İstanbul,
Orcid no 0009-0005-0967-0988
muhammetvefa.urcar@ogr.iuc.edu.tr

Anahtar Kelimeler: HEC-HMS, sürekli hidrolojik modelleme, Ömerli Havzası, Clark birim hidrografı, kalibrasyon.

1. Amaç

Havza ölçeğinde geliştirilen hidrolojik modeller, su bütçesi analizleri ve su kaynakları planlama çalışmalarının temel girdilerini oluşturmaktadır. Bu nedenle, İstanbul'un Anadolu yakasında yer alan ve en önemli içme suyu kaynaklarından biri olan Ömerli Havzası'nın uzun dönemli hidrolojik davranışının güvenilir biçimde modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, Avrupa Birliği PRIMA Programı kapsamında yürütülen kısa adı PHYBIOMED olan AB Projesi çerçevesinde, İstanbul pilot alanında gerçekleştirilen su bütçesi çalışmalarına hidrolojik girdi sağlamak amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda, Ömerli Havzası için HEC-HMS programı ile hidrolojik bir model geliştirilmiş, model DSİ Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) tarafından ölçülen debiler ile kalibre edilerek doğrulanmış ve elde edilen sürekli akım

serilerinin WEAP su kaynakları planlama modeline girdi olarak kullanılabilirliğinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Geliştirilen hidrolojik model, PHYBIOMED Projesi kapsamında yürütülen su bütçesi çalışmalarının önemli bir bileşenini oluşturmaktadır. Modelden elde edilen uzun dönemli akım serileri, Ömerli Havzası için geliştirilecek su bütçesi modelinde farklı iklim değişikliği, su talebi ve geri kazanılmış su kullanım senaryolarının değerlendirilmesine yönelik hidrolojik altyapıyı sağlayacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veriler

Ömerli Havzası, İstanbul'un Anadolu Yakası'nda yer alan ve kentin en önemli içme suyu havzalarından biridir. Havza yaklaşık 601 km² drenaj alanına sahiptir. Ömerli Havzası, QGIS ortamında sayısal yükseklik modeli kullanılarak QGIS ile gerçekleştirilen arazi ön işleme işlemleri sonucunda 12 alt havzaya ayrılmıştır. Modelin meteorolojik girdileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü 17064 numaralı meteoroloji istasyonundan temin edilen günlük yağış verileri ile buharlaşma-terleme hesaplarında kullanılan sıcaklık verilerinden oluşmaktadır. Havzanın yaklaşık 601 km²'lik alanına karşın meteorolojik girdilerin tek bir istasyondan sağlanmasının başlıca nedeni, çalışma dönemi (1965–1971) boyunca havzaya yakın konumda kesintisiz ve yeterli uzunlukta kayda sahip tek istasyonun 17064 numaralı istasyon olmasıdır. Söz konusu istasyon havza sınırları dışında, havzaya yakın bir noktada yer almakta olup, uzun süreli sürekli kayda sahip en yakın istasyon olması nedeniyle bu istasyona ait yağış ve sıcaklık verileri havza girdilerini temsilen kullanılmıştır. Havza büyüklüğü ve topoğrafik değişkenlik dikkate alındığında tek istasyona dayalı bu yaklaşım modelin bir kısıtı olarak değerlendirilmekte; ileride havza içi ve çevresindeki ek istasyon verilerinin modele katılmasıyla meteorolojik girdi belirsizliğinin azaltılması öngörülmektedir. Model kalibrasyon ve doğrulama aşamaları, DSİ E13A1324 (Riva Deresi–Ömerli) akım gözlem istasyonundan elde edilen gözlem akımı verisi esas alınarak, 1 Ocak 1965 – 31 Aralık 1971 dönemini kapsayacak şekilde yürütülmüştür.

2.2 Model Kurulumu

HEC-HMS havza modelinde yağış kayıplarının hesaplanmasında Doğrusal Nem Açığı ve Sabit Kayıp (Linear Deficit and Constant Loss) yöntemi, yağış-akış dönüşümünde Clark Birim Hidrografı [1], kanal ötelemesinde Gecikme (Lag) yöntemi ve taban akışının modellenmesinde Çekilme Taban Akışı (Recession Baseflow) yöntemi [2] kullanılmıştır [3]. Olay tabanlı (event-based) yaklaşımların aksine, sürekli (continuous) hidrolojik modeller olaylar arası toprak nemi ve taban akışı dinamiklerini temsil edebilmektedir [4]. Uzun dönemli su dengesi bileşenlerinin temsil edilebilmesi amacıyla, Hargreaves yöntemiyle hesaplanan buharlaşma-terleme değerlerini toprak nemi ile ilişkilendiren Basit Kanopi (Simple Canopy) yöntemi modele tanımlanmıştır [5]. Böylece kurak dönemlerde toprak nemindeki değişimlerin ve olaylar arasındaki akım sürekliliğinin daha gerçekçi biçimde temsil edilmesi sağlanmıştır.

Clark Birim Hidrografı'na ait dönüşüm parametrelerinin belirlenmesinde öncelikle havzanın gecikme süresi (t_p) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

$$t_p = 0.75\ C_t (L \cdot L_c)^{0.3} \quad (1)$$

Burada t_p, etkili yağışın ağırlık merkezinden birim hidrografın pik debisine kadar geçen gecikme süresini (saat); C_t, havzanın hidrolojik ve jeomorfolojik özelliklerini temsil eden boyutsuz havza katsayısını; L, havza çıkış noktasından su bölümü çizgisine kadar ana akarsu boyunca ölçülen ana akarsu uzunluğunu (km); $L_c$ise havza çıkış noktasından ana akarsu boyunca havza ağırlık merkezini temsil eden noktaya kadar olan karakteristik kanal uzunluğunu (km) ifade etmektedir.

Bu çalışmada, havzanın topoğrafik ve hidrolojik özellikleri dikkate alınarak literatürde yaygın olarak kullanılan $C_t = 2{,}0$ değeri yerine, gözlenen gecikme sürelerinden geri hesaplanan $C_t = 0{,}80$ değeri kullanılmıştır. Hesaplanan gecikme süresinden hareketle her bir alt havza için Clark toplanma zamanı ($T_c = t_p/0{,}6$) ve depolama katsayısı ($R = 0{,}6T_c$) belirlenmiş, böylece alt havzalar kendi hidrolojik özelliklerini yansıtan parametrelerle temsil edilmiştir.

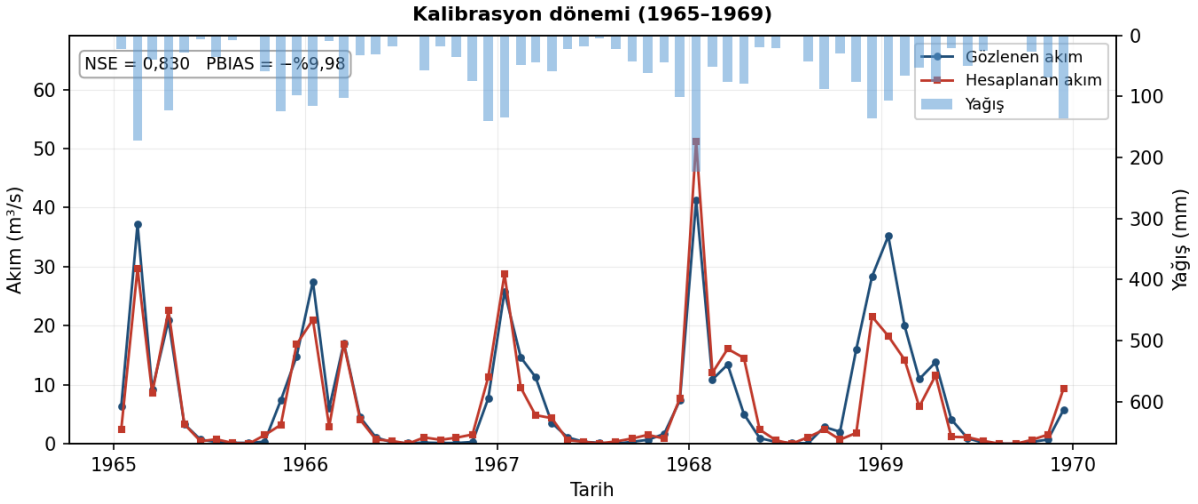
2.3 Kalibrasyon ve Başarım Ölçütleri

Model, 1 Ocak 1965 – 31 Aralık 1969 tarihlerini kapsayan kalibrasyon dönemi ve 1 Ocak 1970 – 31 Aralık 1971 tarihlerini kapsayan doğrulama dönemi için birbirinden bağımsız iki ayrı sürekli simülasyon olarak çalıştırılmıştır. Doğrulama dönemi, kalibrasyon dönemine ait başlangıç ve nem koşullarını devralmadan kendi başlangıç koşullarıyla ayrı yürütülmüştür. Model parametreleri kalibrasyon döneminde gözlenen akım verileri esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, yağış kayıplarını kontrol eden parametreler, taban akışının zamansal değişimini temsil eden katsayılar ve bitki örtüsüne bağlı buharlaşma-terleme parametreleri kalibre edilmiş, elde edilen parametre seti herhangi bir değişiklik yapılmaksızın doğrulama dönemine uygulanmıştır. Model performansı, aylık ölçekte Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı (NSE) [6] ve yüzde yanlılık (PBIAS) ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiş; model başarısının yorumlanmasında Moriasi vd. (2007) tarafından önerilen performans sınıflandırması esas alınmıştır [7]. Model günlük zaman adımında çalıştırılmış olmakla birlikte, başarım değerlendirmesi aylık ölçekte gerçekleştirilmiştir. Bu tercih, modelin ürettiği akım serilerinin aktarılacağı WEAP tabanlı su bütçesi ve su tahsis modelinin aylık zaman ölçeğinde çalışmasıyla doğrudan ilişkilidir; böylece model başarımı, çıktıların kullanılacağı zaman ölçeğiyle tutarlı biçimde değerlendirilmiştir. Ayrıca aylık toplulaştırma, günlük ölçekteki zamanlama kaynaklı sapmaların uzun dönemli su dengesi açısından ikincil önemdeki etkilerini azaltarak, değerlendirmenin su dengesi bileşenleri üzerine odaklanmasını sağlamıştır.

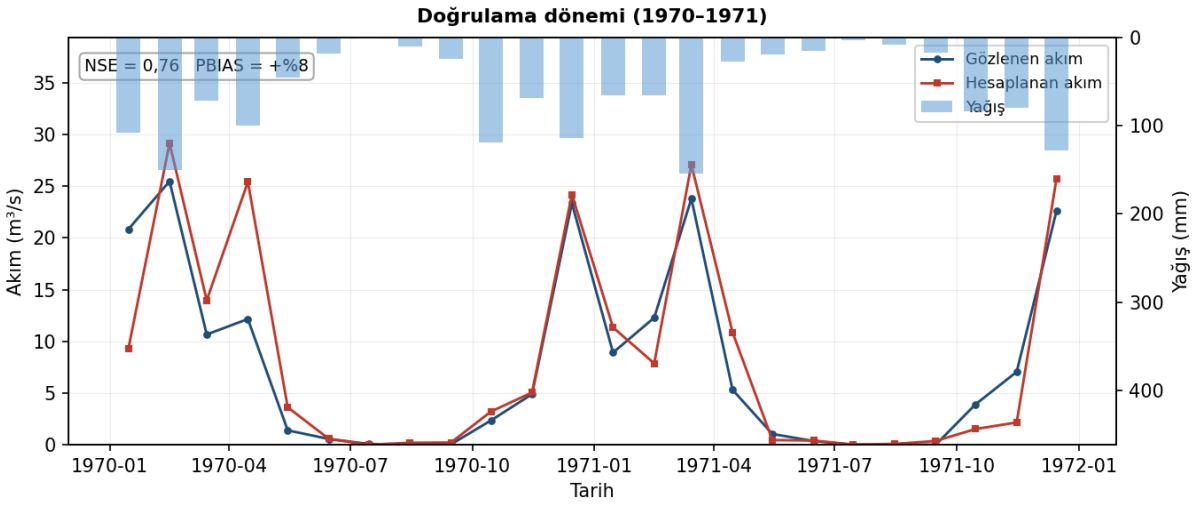
3. Değerlendirme

Kurulan sürekli hidrolojik model, 1965–1971 dönemine ait aylık akımların mevsimsel değişimini başarılı bir şekilde temsil etmiştir. Aylık ölçekte kalibrasyon döneminde (1965–1969) NSE = 0,830 ve PBIAS = −%9,98, doğrulama döneminde (1970–1971) ise NSE = 0,76 ve PBIAS = +%8 elde edilmiştir. Moriasi vd. (2007) tarafından önerilen performans ölçütlerine göre her iki dönem de çok iyi model performansı sınıfında yer almaktadır [7]. Doğrulama döneminde, kalibrasyon döneminden bağımsız başlangıç koşulları kullanılmasına rağmen benzer performans değerlerinin elde edilmesi, kalibre edilen parametre setinin doğrulama dönemi için de tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, doğrulama döneminin iki yıl ile sınırlı olması nedeniyle, modelin daha uzun ve farklı iklim koşullarını içeren dönemlere aktarılabilirliğine ilişkin kesin bir değerlendirme yapılamamakta; bu yöndeki çıkarımların daha geniş ve uzun süreli veri setleriyle ayrıca sınanması gerektiği değerlendirilmektedir.

Şekil 1 ve Şekil 2 incelendiğinde, modelin aylık akımların mevsimsel değişimini başarılı bir şekilde temsil ettiği, özellikle yüksek akım dönemlerinin zamanlamasını ve düşük akım dönemlerindeki genel eğilimleri büyük ölçüde doğru yansıttığı görülmektedir. Kalibrasyon ve doğrulama sonuçları sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de, model parametreleri ile performans ölçütleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Kalibrasyon döneminde (1965–1969) gözlenen ve hesaplanan aylık akımlar ile aylık toplam yağış değerleri



Şekil 2. Doğrulama döneminde (1970–1971) gözlenen ve hesaplanan aylık akımlar ile aylık toplam yağış değerleri

Tablo 1. Ömerli Havzası HEC-HMS modelinde kullanılan yöntemler ve başarım değerleri

Model bileşeni	Yöntem / Değer
Alan ve alt havza	601 km² 12 alt havza
Kayıp yöntemi	Doğrusal nem açığı ve sabit kayıp yaklaşımı (sabit kayıp oranı = 0,08 mm/saat)
Bitki örtüsü / ET	Basit Kanopi (Kc = 0,50) + Hargreaves
Dönüşüm yöntemi	Clark Birim Hidrografı (Ct ≈ 0,80'den türetilen Tc, R)
Öteleme yöntemi	Gecikme yöntemi
Taban akışı	Çekilme taban akışı yöntemi (k = 0,92)
Simülasyon dönemi	Ocak 1965 – Aralık 1971
Kalibrasyon performans ölçütü (1965–1969)	NSE = 0,830 · PBIAS = −%9,98 (çok iyi)
Doğrulama performans ölçütü (1970–1971)	NSE = 0,76 · PBIAS = +%8 (çok iyi)

Kalibrasyon sürecinde; yağış kayıplarını, buharlaşma-terlemeyi ve taban akışını temsil eden parametreler birlikte değerlendirilmiş, bu parametrelerin uzun dönemli su dengesi bileşenlerini birbiriyle tutarlı biçimde temsil edecek şekilde belirlenmesine özen gösterilmiştir. Parametrelerin ayrı ayrı ele alındığı karşılaştırmalı bir analiz bu çalışma kapsamında sunulmamakla birlikte, birbiriyle ilişkili bu süreçlerin bütüncül biçimde değerlendirilmesinin, sürekli hidrolojik modellemede tutarlı bir su dengesi temsili için gerekli olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, havzanın topoğrafik özellikleri dikkate alınarak geri hesaplanan Ct ≈ 0,80 değeri, literatürde yaygın olarak kullanılan Ct = 2,0 değerinden belirgin şekilde farklıdır. Benzer şekilde, Clark birim hidrografı parametrelerinin dik ve küçük havzalarda bölgesel gözlemlere dayalı olarak yeniden belirlenmesi gerektiği farklı çalışmalarda da ortaya konmuştur [8]. Bu durum, akış dönüşüm parametrelerinin havzaya özgü hidrolojik ve topoğrafik özellikler dikkate alınarak belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Avrupa Birliği PRIMA Programı kapsamında yürütülen PHYBIOMED Projesi çerçevesinde, İstanbul pilot çalışma alanının önemli bileşenlerinden biri olan Ömerli Havzası için HEC-HMS tabanlı sürekli bir hidrolojik model geliştirilmiş, model kalibre edilerek doğrulanmıştır. Aylık ölçekte elde edilen NSE ve PBIAS değerleri, geliştirilen modelin havzanın uzun dönemli hidrolojik davranışını güvenilir biçimde temsil edebildiğini göstermiştir.

Modelden elde edilen sürekli akım serileri, PHYBIOMED Projesi kapsamında geliştirilen WEAP tabanlı su bütçesi ve su kaynakları planlama modeline hidrolojik girdi oluşturmaktadır. Böylece, Ömerli Havzası için farklı iklim değişikliği, su talebi ve geri kazanılmış su kullanım senaryolarının su bütçesi ve su tahsis sistemi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine yönelik gerekli hidrolojik altyapı oluşturulmuştur. Bu

yönüyle çalışma, PHYBIOMED Projesi kapsamında İstanbul pilot alanı için geliştirilen entegre su kaynakları planlama ve karar destek sisteminin önemli bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Öneriler kapsamında; doğrulama döneminin daha uzun ve farklı iklim koşullarını kapsayacak biçimde genişletilmesi, taban akışı çekilme katsayılarının havzaya özgü gözlem verilerinden ayrıca belirlenmesi ve mümkün olduğunda havza içi ile çevresindeki ek meteorolojik istasyonların girdi olarak değerlendirilerek alansal yağış temsilinin iyileştirilmesi, modelin güvenilirliğini artıracak öncelikli adımlar olarak öngörülmektedir. Elde edilen sürekli akım serilerinin WEAP modeline aktarılmasıyla birlikte, farklı iklim değişikliği, su talebi ve geri kazanılmış su kullanım senaryoları altında havza su bütçesi bileşenlerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Avrupa Birliği PRIMA Programı kapsamında desteklenen PHYBIOMED (Integration of Wastewater Treatment through Physicochemical and Biological Processes for Sustainable Water Management in Mediterranean Countries) Projesi kapsamında gerçekleştirilmiş ve TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 125N129 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, projeye sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a, Avrupa Birliği PRIMA Programı'na ve PHYBIOMED Projesi konsorsiyumuna teşekkür eder. (Web adresi: https://phybiomed-prima.eu/).

5. Kaynaklar

[1] Clark, C.O. (1945). Storage and the unit hydrograph. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 110(1), 1419–1446.

[2] Nathan, R.J., McMahon, T.A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resources Research, 26(7), 1465–1473.

[3] Feldman, A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.

[4] Odey, G., Cho, Y. (2025). Event-based vs. continuous hydrological modeling with HEC-HMS: A review of use cases, methodologies, and performance metrics. Hydrology, 12(2), 39.

[5] Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96–99.

[6] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282–290.

[7] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900.

[8] Che, D., Nangare, M., Mays, L.W. (2014). Determination of Clark's unit hydrograph parameters for watersheds. Journal of Hydrologic Engineering, 19(2), 384–387.

Su Yapılarında Doğal Yapı Gereçlerinin Projeye Etkileri

Ayşe AYDIN
DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı, ANKARA
aysek@dsi.gov.tr

Ayhan KOÇBAY
DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı, ANKARA
akocbay@dsi.gov.tr

Ali GEZER
DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı, ANKARA
agezer@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: doğal yapı gereçleri, baraj tipi, geçirimsiz malzeme, geçirimli malzeme, kaya malzeme, agrega

1. Amaç

Baraj, gölet, hidroelektrik santral (HES), regülatör, kanal, tünel, cebri boru, isale hattı, vb. yapıların ön inceleme aşamasından uygulamaya kadar bütün aşamalarında ihtiyaç duyulan her cins doğal yapı gereci için etütler yapılarak kullanılabilirlikleri ortaya konulmaktadır [1].

Bu çalışmada su yapılarının inşasında ihtiyaç duyulan doğal yapı gereçlerinin bulunabilirlikleri ile nitelik ve nicelik olarak uygunluğu, proje alanına olan taşıma mesafesi, malzeme nakil yollarının mevcut şartları ile mülkiyet ve kamulaştırma durumunun, projenin yapılabilirliğine ve rantabilitesine olan etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

DSİ Genel Müdürlüğü tarafından planlanan, projelendirilen, inşa edilen, kontrollüğü ve danışmanlığı yapılan baraj, gölet, hidroelektrik santral (HES), regülatör, pompa istasyonu, arıtma tesisi, kanal, tünel, cebri boru, yükleme havuzu, isale hattı, su deposu, atıksu, köprü, bina vb. yapılarda ön incelemeden uygulama sonrasına kadar bütün aşamalarda jeoteknik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında, projenin inşaatında ihtiyaç duyulan her cins doğal yapı gereci için etütler yapılarak planlamacının veya projecinin en güvenli ve en ekonomik tasarımları yapabilmesine imkan sağlamak amacıyla “Doğal Yapı Gereçleri Raporu” hazırlanmaktadır [1].

Su yapılarından olan baraj ve göletlerin gövde tipi seçiminde ve tasarımında, topoğrafya, jeoloji, depremsellik, iklim gibi birçok faktör etkilidir. Ancak öncelikle amaca ve rezervuar alanı ile yapının yakın çevresindeki malzeme envanterine göre gövde tipi seçimi yapılmaktadır. Kullanılabilecek, her cins malzemenin miktarı, kalitesi ve yapı yerine olan taşıma mesafesi gövde tipi seçiminde öncelikli olarak dikkate alınan unsurlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır [2].

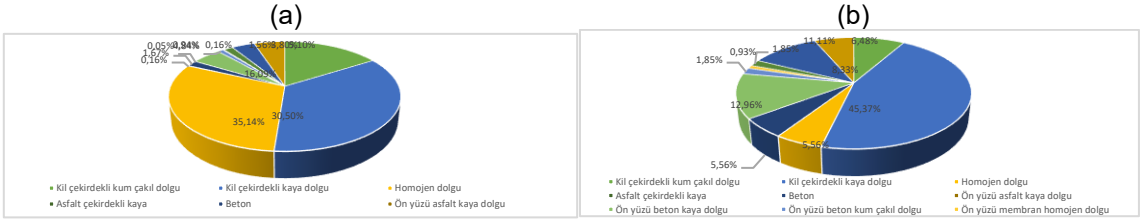
Barajların gövde inşasında kullanılan malzemeye göre sınıflandırılması aşağıda verilmiştir [3].

1. Dolgu Barajlar
   - Homojen dolgu barajlar
   - Zonlu dolgu barajlar
     - Kum-çakıl dolgu
     - Kaya dolgu
     - Karışık zonlu dolgu
   - Ön yüzü kaplı (beton&membran&asfalt) dolgu barajlar
2. Beton Barajlar
   - Beton ağırlık barajlar
   - Payandalı beton barajlar
   - Beton kemer barajlar
   - Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) ve Hardfill (SSKD) barajlar

3. Değerlendirme

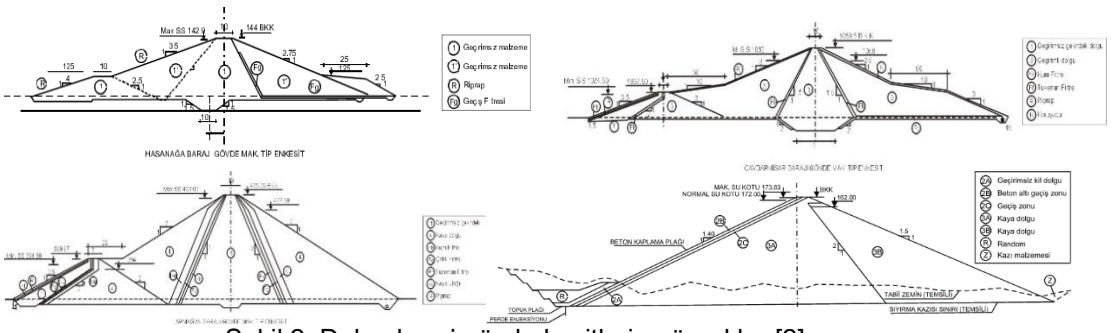
Bir yapının yakınında, yapının tasarlanan özelliklerini aşırı bir maliyete yol açmadan geliştirmeye imkan tanıyacak yeterli çeşitlilikte doğal malzeme her zaman bulunamayabilir. Bu nedenle istenilen niteliklere sahip malzemeleri uzak bölgelerden getirmek yerine yapıya ekonomik taşıma mesafesindeki malzemelere uygun tasarım yapılarak ekonomik projeler yapılması uygun olacaktır [4].

Ülkemizde işletmedeki ve inşaatı devam eden projelerin gövde tiplerine göre yüzdeleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ülkemizde (a) işletmedeki ve inşaatı devam eden (b) proje yapımı devam eden projelerin gövde tiplerine göre dağılımları

Fazla yüksek olmayan (yükseklik < 40 m) barajlar, eğer kısıtlayıcı başka bir faktör yoksa yapım kolaylığı da göz önüne alınarak homojen dolgu tipinde seçilirler. Yüksek barajlar ise genelde zonlu tipte yapılırlar. Toprak ve kaya dolgu barajlarda kullanılacak malzemelerin genellikle doğada bulunduğu haliyle doğrudan ya da diğer baraj tiplerine göre daha az işleme tabii tutularak kullanılması bu barajlar için önemli bir avantajdır [5]. Dolgu barajlarda gövde tasarımı için, malzeme türleri, miktarları ya da farklı dolgu malzemelerinin elde edilebilme olanakları ortaya konulmalıdır. Geçirimsiz çekirdekli toprak barajlar, ekonomik mesafelerde, yeterli miktarda ve uygun kalitede geçirimsiz malzeme sağlanması durumunda inşa edilirler. Uygun miktar ve özelikte geçirimsiz malzeme bulunamaması halinde, geçirimsizliğin barajın memba yüzünde ve beton ya da asfalt gibi kilden başka malzemelerle sağlandığı önyüzü kaplı dolgu baraj tipi seçilmesi uygun olacaktır. [6]. Dolgu baraj örnekleri Şekil 2'de verilmiştir.



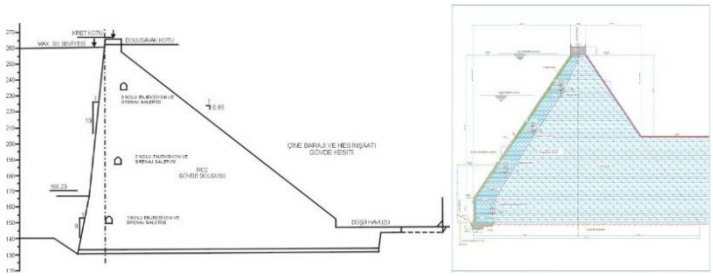
Şekil 2. Dolgu baraj gövde kesitlerine örnekler [2]

Uygun miktar ve özelikte geçirimsiz malzeme bulunamaması halinde diğer bir gövde alternatifi beton barajlardır. Yapısal ve duraylılık gereksinimlerini karşılayacak kalitede beton üretmek için gerekli uygun nitelik ve nicelikte agrega kaynakları bulunmalıdır. Betonun maliyetini ve kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden birisi, uygun agrega kaynaklarının seçilmesidir. Beton barajların maliyetleri dolgu barajlara kıyasla daha yüksektir. Aynı yükseklikteki bir dolgu barajdan daha az agrega ve çimento ihtiyacı duyan SSB-SSKD barajlar da beton ağırlık barajlara alternatif olabilmektedir.

Bazı durumlarda bulunan malzeme alanlarının gerek teknik gerekse ekonomik bakımdan istenilen özelliklerde olmaması halinde, zorunlu olarak gövde tipi ve şevlerinde yapılan değişikliklerle kullanılmaları söz konusu olabilmektedir (Tablo1).

4. Sonuçlar

Baraj tipinin seçimindeki amaç ekonomik ve güvenilir bir baraj yapmak olması nedeniyle baraj yerine ve yapılış amacına en uygun ve en ekonomik baraj tipinin belirlenmesi için birden fazla faktörün birlikte incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 3. (a) SSB, (b) SSKD baraj gövde kesitlerine örnekler [2]

Tablo 1. Planlama Uygulama Aşamasında Gövde Tipi Değişen Baraj Örnekleri

Barajın Adı	Gövde Tipi	
	Planlama Aşamasında	Uygulama Aşamasında
Çine Barajı	Kaya dolgu	RCC
Cindere Barajı	Yarı geçirimli zonlu dolgu	Hardfill
Beydağ Barajı	Toprak+Kaya dolgu	Hardfill
Gezende Barajı	Zonlu toprak	Beton kemer
Dim Barajı	Kaya dolgu	Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu
Manyas Barajı	Kum-çakıl dolgu	Kaya dolgu
Gördes Barajı	Kil çekirdekli kaya dolgu	Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu
Çokal Barajı	Toprak dolgu	Ön yüzü beton kaplı

Bir projede veya gövde tipi seçiminde genellikle en ekonomik tasarım, temel zeminin özellikleri, iklim, topoğrafik koşullar, inşaat aşamaları, inşaat için gerekli süre gibi birden çok faktör etkili olmasına karşın, baraj gövdesi, batardo, kaplamalar ya da sulama ve enerji yapılarında kullanılabilecek, geçirimsiz, yarı geçirimli, geçirimli ve kaya dolgu, filtre, beton agregası ve riprap gibi her cins doğal yapı malzemesinin miktarı, kalitesi ve yapı yerine olan taşıma mesafesi baraj tipi seçiminde öncelikli olarak karşımıza çıkmaktadır.

Uygulama aşamasında farklılıklara dolayısıyla keşif artışlarına sebep olmamak için doğal yapı gereçlerine yönelik etütlere, doğal yapı gereçleri envanterinin bütün hatlarıyla eksiksiz olarak ortaya konulması ve projede ihtiyaç duyulan her türlü doğal yapı malzemesinin cins, miktar, kalite kontrol deney sonuçları ile malzeme sahalarının yapı yerlerine olan taşıma mesafeleri, yol şartları ve lokasyonlarının belirlenmesine önem verilmelidir.

5. Kaynaklar

[1] DSİ, (2025), Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı Şartnameleri, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.

[2] Aydın, A., (2015). “Doğal Yapı Gereçleri Seçiminde ve Rapor Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar”, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı Jeoteknik Semineri Bildiriler Kitabı”, s. 13-27, Fethiye.

[3] DSİ, (2012). “Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi, 1. Barajlar Kongresi”, Rehber No: 3, 142 p., Ankara.

[4] USBR,1998. “Earth Manual, Part 1”, United States Department of Interior Bureau of Reclamation, Denver Colorado.

[5] McNally, G.H., (1998). “Soil and Rock Construction Materials” USA.

[6] USBR, (1987). “Design of Small Dams”, United States Department of Interior Bureau of Reclamation, Denver Colorado.

Musabeyli Barajı Batardolarında Meydana Gelen Hasarların Hidrolojik ve Hidrolik Açıdan Değerlendirilmesi

Torkan HASSANİ
İstanbul Teknik Üniversite, İstanbul_Maslak
Hassani22@itu.edu.tr

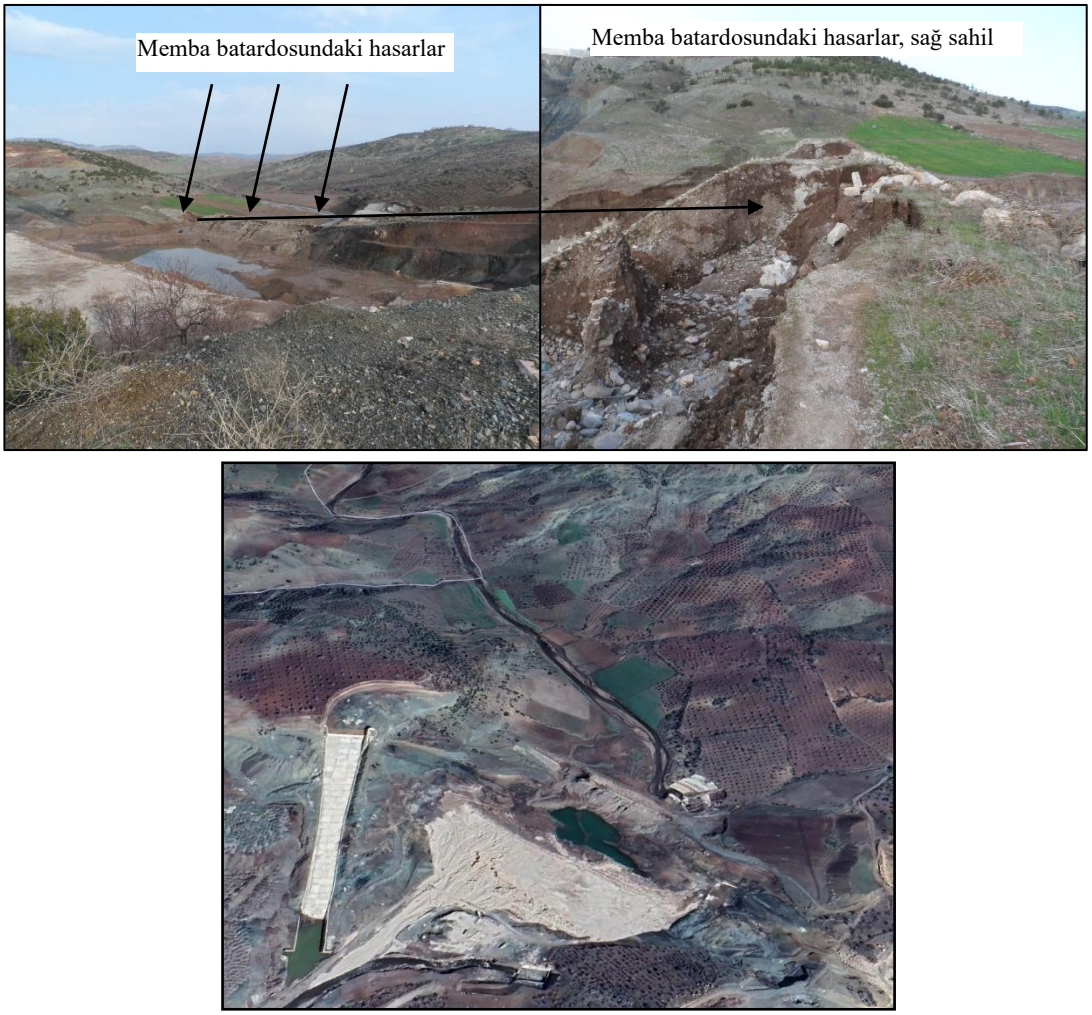
Ferhat YALÇIN*
İstanbul Teknik Üniversite, İstanbul_Maslak
Yalcinfe18@itu.edu.tr

Şevket ÇOKGÖR
İstanbul Teknik Üniversite, İstanbul_Maslak
cokgor@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: dolgu barajlar, derivasyon yapıları, taşkın analizi, kayma gerilmesi.

1. Amaç

Baraj gibi su yapılarının inşası sırasında, akarsu yatağındaki mevcut akımın inşaat sahasından uzaklaştırılarak güvenli bir şekilde mansaba aktarılması amacıyla geçici derivasyon yapıları kullanılmaktadır. Bu yapılar genel olarak memba batardosu, derivasyon yapıları ve gerekli durumlarda mansap batardosundan oluşmaktadır. Memba batardosu, gelen akımın inşaat sahasına girmesini engellemek, taşkın sularını belirli bir hacimde biriktirerek taşkın pik değerini azaltmak ve akımı derivasyon yapısına yönlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Derivasyon yapıları ise mevcut akımı inşaat alanından uzaklaştırarak mansapta tekrar akarsu yatağına iletmektedir. Kilis ili Musabeyli ilçesi sınırları içerisinde, Sabunsuyu Deresi üzerinde inşa edilmekte olan Musabeyli Barajı'nda 31.01.2021 tarihinde meydana gelen sağanak yağış sonucunda taşkın oluşmuştur. Taşkın sırasında meydana gelen debinin derivasyon yapıları tarafından yeterli şekilde mansaba iletilememesi sonucunda memba batardosunun memba tarafındaki su seviyesi yükselmiş ve derivasyon tüneli istenmeyen şekilde basınçlı akım koşullarında çalışmıştır. Su seviyesinin yükselmeye devam etmesi sonucunda memba batardosu üzerinden su aşmış; batardoda, derivasyon tüneli yaklaşım kanalı ve girişinde ve ana baraj gövdesi inşa alanında çeşitli hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 1). Literatürde dolgu barajların üzerinden su aşması durumunda barajların yıkılmaya kadar varan hasarlar görmesi konusunda oldukça çok çalışma mevcuttur [1, 2]. Çalışmalarda baraj yıkılması nümerik modelleri ve baraj dolgusunun zemin analizleri göz önüne alınmıştır. Taşkın sırasında sağ sahilde bulunan derivasyon tüneli yaklaşım kanalı ve giriş ağzı çevresindeki püskürtme beton (shotcrete) ile kaplanmış şevlerin göçmesi sonucunda derivasyon tüneli girişi kapanmış ve gelen debinin mansaba aktarılması engellenmiştir. Bunun sonucunda memba batardosu önündeki rezervuarda su birikmiş, su seviyesi yükselmiş ve batardo kret kotunu aşmıştır. Bu çalışmada, 31.01.2021 tarihinde meydana gelen yağış ve taşkın sonucunda Musabeyli Barajı inşaat sahasında oluşan hasarların nedenleri hidrolojik ve hidrolik açıdan incelenmiştir. Bu amaçla proje kapsamında verilen hidrolojik ve hidrolik hesaplar değerlendirilmiş, derivasyon yapılarının taşıma kapasitesi incelenmiş ve DSİ 19-19 Sabun Suyu Güneşli Akım Gözlem İstasyonu'nun 1987–2015 yılları arasındaki yıllık maksimum akım değerleri kullanılarak taşkın frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca olay sırasında meydana gelen yağışın dönüş aralığı değerlendirilmiş ve yağıştan akışa geçiş yaklaşımı kullanılarak oluşabilecek pik debiler Rasyonel Yöntem ile hesaplanmıştır. Yapılan değerlendirmelerde derivasyon tünelinin normal serbest yüzeyli çalışma koşullarında yaklaşık 25–30 m^3/s debi iletebildiği, tünelin basınçlı çalışması ve memba batardosu maksimum su kotuna ulaşılması durumunda ise bu değerin yaklaşık 60 m^3/s olduğu belirlenmiştir. Yağış analizi sonucunda, havzanın hesaplanan yaklaşık 3,1 saatlik geçiş süresi dikkate alındığında yağışın yaklaşık 10 yıllık dönüş aralığına karşılık geldiği değerlendirilmiştir. Rasyonel Yöntem kullanılarak Kilis merkez ve Kilis Musabeyli yağış değerleri için hesaplanan pik debiler ise sırasıyla 123,8 ve 149 m^3/s olarak elde edilmiştir. Bu değerler yaklaşık 50 yıllık dönüş aralığındaki taşkın debileri mertebesinde olup derivasyon yapısının iletim kapasitesinin üzerinde kalmaktadır. Çalışmanın amacı, Musabeyli barajında meydana gelen hasarların nedenlerinin belirlenmesi bu tip barajlarda meydana gelebilecek benzer hasarlara dair çıkarımlar elde edilmesidir.



Şekil 1. Memba batardosundaki hasarlar

2. Materyal ve Yöntem

Musabeyli Barajı'nda meydana gelen hasarların değerlendirilmesi amacıyla öncelikle proje ve hesap raporları incelenmiş, yapıların tasarım özellikleri ve beklenen performansları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda özellikle taşkın sırasında etkin olarak çalışması gereken memba batardosu ve derivasyon yapıları ele alınmıştır. Olay sırasında meydana gelen hasarlar, olay yerinden elde edilen fotoğraflar, raporlar ve saha gezisi tespitleri üzerinden değerlendirilmiştir. Hasarın oluşum nedeninin incelenmesi kapsamında özellikle memba batardosu ve derivasyon tüneli performansları üzerinde durulmuştur. Taşkın sırasında derivasyon tüneli yaklaşım kanalının sağ sahilindeki şev kaplamasında önemli ölçüde göçme meydana gelmiştir. Püskürtme beton ile tahkim edilmiş şevlerin derivasyon tüneli girişine doğru göçmesi sonucunda tünel girişi kapanmış ve suyun derivasyon tüneline girişi engellenmiştir. Bunun sonucunda gelen su memba batardosu önündeki rezervuarda birikmiş, su seviyesi yükselmiş ve batardo üzerinden aşmıştır. Hasara neden olan akım koşullarının belirlenmesi amacıyla öncelikle derivasyon tünelinin ve yaklaşım yapılarının proje kapsamında belirtilen hidrolik kapasiteyi sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir. Daha sonra DSİ akım gözlem istasyonundan elde edilen güncel veriler kullanılarak taşkın frekans analizi yapılmıştır. Olay sırasında meydana gelen yağış ayrıca değerlendirilerek yağışın dönüş aralığı belirlenmiş ve proje hesaplarında kullanılan dönüş aralıkları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, yağıştan akışa geçiş yöntemi kullanılarak meydana gelen yağışın oluşturabileceği maksimum debi hesaplanmıştır.



Şekil 2. Derivasyon kanalı girişinde meydana gelen hasarlar.

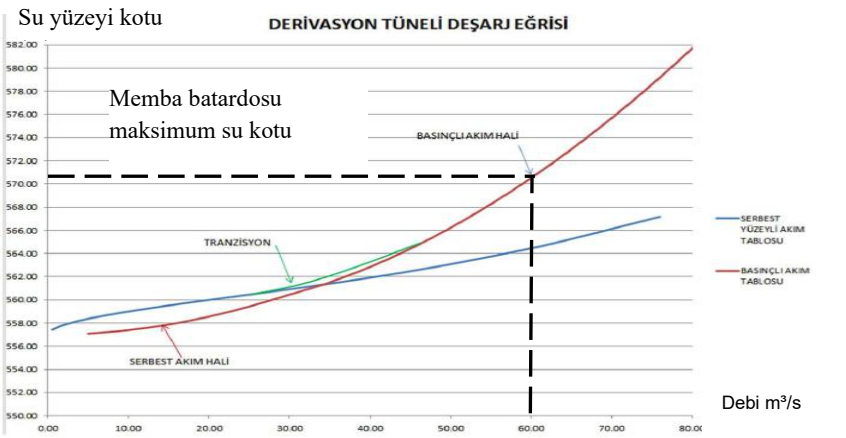
3. Değerlendirme

3.1 Derivasyon Yapılarının Hidrolik Değerlendirmesi

Proje hidrolojik ve hidrolik hesaplarının değerlendirilmesinde “Kilis İli Musabeyli Barajı Proje Yapımı Kati Proje Raporu/Cilt 4-1 Hidrolik Hesaplar” esas alınmıştır. Proje hidrolojik hesaplarında baraj yerinin mansabında ve aynı akarsu üzerinde bulunan DSİ 19-19 Sabun Suyu Güneşli Akım Gözlem İstasyonu verileri kullanılmıştır. İstasyon havzasının baraj havzasından daha büyük olması nedeniyle AGİ'de ölçülen debiler havza alanlarının oranı dikkate alınarak baraj yerine taşınmıştır. Proje hesaplarında 25 ve 50 yıllık dönüş aralıklarına karşılık gelen taşkın debileri sırasıyla Q_{25}=97,70 m³/s ve Q_{50}=113,80 m³/s

olarak belirlenmiştir [3]. Dolusavak için hesaplanan maksimum taşkın debisi ise 422,63 m³/s'dir. Musabeyli Barajı'nda toprak dolgu olarak inşa edilen memba batardosunun tepe kotu 570,50 m'dir. Derivasyon yapısı ise tünel olarak projelendirilmiştir. Derivasyon tünelinin normal koşullarda, belirlenen taşkın debisini (burada 25 yıllık tekerrür aralığı için) serbest yüzeyli çalışması gereklidir. Tünelin basınçlı akım koşullarına geçmesi durumunda memba batardosu önünde su birikmekte ve rezervuardaki su seviyesi yükselmektedir. Proje raporunda verilen derivasyon tüneli deşarj eğrisinin değerlendirilmesi sonucunda tünelin normal serbest yüzeyli çalışma koşullarında iletebileceği debinin yaklaşık 25–30 m³/s olduğu görülmektedir. Tünelin basınçlı hale gelmesi durumunda memba rezervuarındaki su seviyesi yükselmekte ve maksimum batardo kret kotu olan 570,50 m seviyesinde tünelin iletebileceği maksimum debi yaklaşık 60 m³/s'ye ulaşmaktadır. 30m³ lük bu debi yaklaşık 15 yıllık dönüş aralığına karşılık gelmektedir. Bu maksimum çalışma durumu sürdürülebilir değildir. Havzadan gelen debinin tünelin iletebildiği debiden fazla olması durumunda memba rezervuarında su birikmeye devam etmektedir. Ayrıca 60 m³/s'lik maksimum derivasyon kapasitesi, projede verilen Q_{25}=97,70 m³/s ve Q_{50}=113,80 m³/s

taşkın debilerinin altında kalmaktadır. Projede, aradaki farkın haznede birikeceği öngörüsü ile hesap yapılmıştır. Hazne başlangıçta tamamen boş olarak kabul edilmiştir.



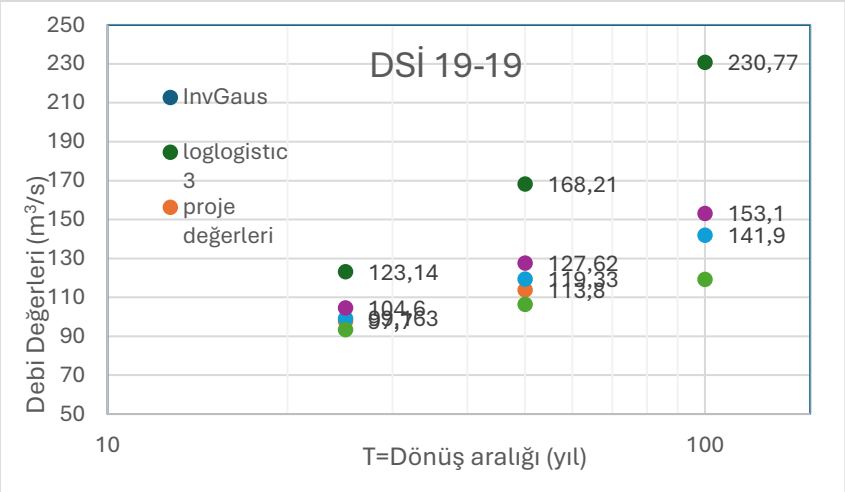
Şekil 3. Derivasyon tüneli deşarj eğrisi [3]

3.2 Taşkın Frekans Analizi

Taşkın debilerinin değerlendirilmesi amacıyla Musabeyli Barajı'na en yakın ve aynı akarsu üzerinde bulunan DSİ 19-19 Sabun Suyu Güneşli Akım Gözlem İstasyonu'nun 1987–2015 yılları arasındaki yıllık maksimum akım değerleri kullanılmıştır. Taşkın frekans analizi en uygun ekstrem değer dağılımları, EasyFit programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yıllık maksimum akım değerlerine çeşitli olasılık dağılımları uygulanmış ve dağılımların verilere uygunluğu Ki-kare, Kolmogorov-Smirnov ve Anderson-Darling testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda Gauss 3 ve üç parametreli Log-normal (LN3) dağılımlarının verilere en uygun dağılımlar arasında olduğu görülmüştür. Gauss 3 dağılımı kullanıldığında 25, 50 ve 100 yıllık dönüş aralıkları için taşkın debileri sırasıyla 101,56, 120,86 ve 140,79 m³/s olarak hesaplanmıştır. LN3 dağılımında ise aynı dönüş aralıkları için sırasıyla 104,6, 127,62 ve 153,1 m³/s değerleri elde edilmiştir. Projede 25 ve 50 yıllık dönüş aralıkları için kullanılan 97,70 ve 113,80 m³/s değerlerinin hesaplanan değerlerden bir miktar daha küçük olduğu, ancak aradaki farkın kabul edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. DSİ 19-19 istasyonunun yağış alanı 276 km², Musabeyli Barajı havzasının yağış alanı ise 142,4 km²'dir. Günlük veya aylık akım değerlerinin alan oranları kullanılarak taşınması mümkün olmakla birlikte taşkın debilerinin alan oranları kullanılarak doğrudan taşınması önerilmemektedir. Bununla birlikte, baraj yerindeki değerlerin AGİ'de belirlenen değerlerden daha küçük olması beklenmektedir.

Tablo 1. Değişik ekstrem değer dağılımları ile 25-50-100 yıllık dönüş aralığında taşkın debileri

Dönüş aralığı (yıl)	GEV m³/s (8)	Gaus 3 m³/s (1)	LP3 m³/s (4)	*LN3 m³/s (2)*	weibul3 m³/s (7)	log-logistic3 m³/s (3)	Proje Değerleri m³/s
25	99,163	101,56	99,7	*104,6*	99,56	123,14	97
50	119,33	120,86	119,24	*127,62*	115,34	168,21	113,8
100	141,9	140,79	140,61	*153,1*	130,82	230,77	



Şekil 4. Değişik ekstrem değer dağılımları ile 25-50-100 yıllık dönüş aralığında taşkın debileri

3.3 Yağış Analizi

31.01.2021 tarihinde meydana gelen ve Musabeyli Barajı inşaatında hasara neden olan yağış, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Olay tarihinde 24 saatlik toplam yağış Kilis merkez istasyonunda 45 mm, Kilis Musabeyli'de ise 54,2 mm olarak ölçülmüştür. Havzanın geçiş süresinin hesaplanmasında havzanın en uzak noktasının derivasyon tüneli girişine olan uzaklığı L=21500 m ve havza eğimi S=0,0196 olarak alınmıştır. Kullanılan ampirik bağıntı sonucunda havzanın geçiş süresi yaklaşık 3,1 saat olarak hesaplanmıştır. Geçiş süresi;

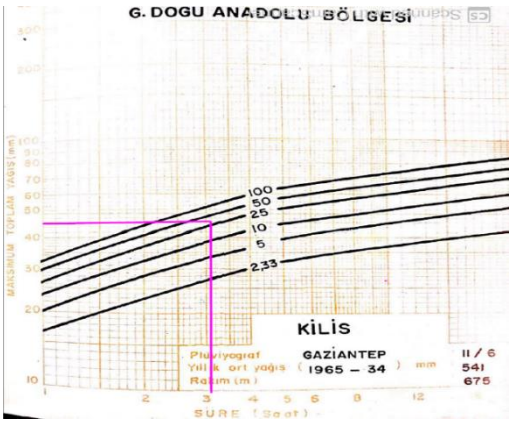
$$t_c = 0.0195\, L^{0.77} S^{-0.385}$$

bağıntısı ile belirlenmiştir. Burada L, havzanın baraj gövdesine kadar olan maksimum uzunluğu, S havza eğimidir [4, 5]. Değerlendirilen havzada bu değerler Şekil 5'ten de görüleceği üzere L=21500 m,

S=0.0196 olarak alınmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen Kilis istasyonuna ait yağış verileri ve plüviyograf katsayıları kullanılarak 3,1 saatlik geçiş süresi için PLV (Plüviyograf) katsayısı 0,72 olarak alınmıştır. Buna göre 3,1 saatlik yağış miktarı Kilis merkez için 32,4 mm, Kilis Musabeyli için ise yaklaşık 39 mm olarak hesaplanmıştır. Kilis merkezde ölçülen 45 mm'lik 24 saatlik toplam yağış, Türkiye'de Maksimum Yağışların Frekans Atlasında verilen Kilis yağış-süre-frekans eğrileri üzerinde değerlendirildiğinde 25 ile 50 yıllık dönüş aralıkları arasında kalmaktadır. Kilis Musabeyli'de ölçülen 54,2 mm'lik günlük yağışın aynı eğri üzerinde yaklaşık değerlendirilmesi durumunda ise yaklaşık 100 yıllık dönüş aralığı elde edilmektedir. Bununla birlikte, PLV katsayıları kullanılarak havzanın 3,1 saatlik geçiş süresi için hesaplanan yağışlar değerlendirildiğinde dönüş aralıklarının sırasıyla yaklaşık 5 yıl ve 10 yılın biraz üzerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. Havzanın en uzak noktasının Musabeyli Barajına kadar olan uzaklık ve eğimi



Şekil 6. Kilis için yağış frekans eğrileri ve oluşan yağışın frekansı [6]

3.4 Pik Debinin Belirlenmesi

Yağış analizinin ardından meydana gelen yağışın havzada oluşturabileceği maksimum debi Rasyonel Yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Pik debinin hesaplanmasında;

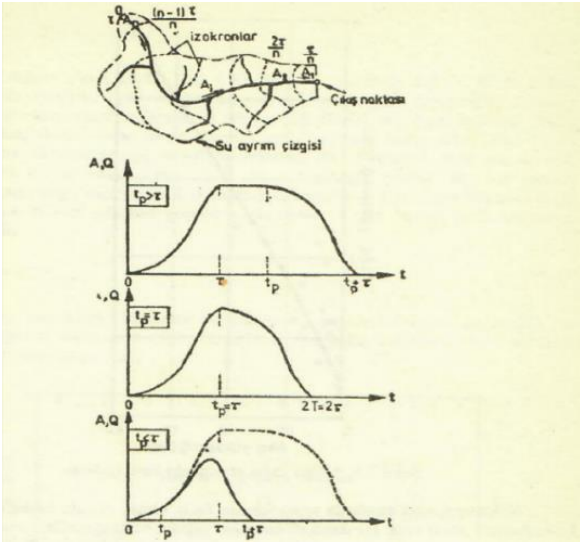
$$Q_{pik} = CIA$$

ifadesi kullanılmıştır. Burada *C* akış katsayısını, *I* yağış şiddetini ve *A* havza alanını göstermektedir. Hesaplamalarda akış katsayısı *C*=0,3 ve havza alanı *A*=142,4 km² olarak alınmıştır. Kilis merkez için 3,1 saatlik yağış miktarı 32,4 mm olarak kullanıldığında yağış şiddeti $2{,}9\times10^{-6}$ m/s ve pik debi 123,8 m³/s olarak hesaplanmıştır. Kilis Musabeyli için 39 mm yağış kullanıldığında ise yağış şiddeti $3{,}49\times10^{-6}$ m/s ve pik debi 149 m³/s olarak elde edilmiştir. Rasyonel Yöntem daha küçük havzalar için uygun olmakla birlikte bu çalışmada meydana gelebilecek debinin büyüklüğü hakkında fikir vermesi amacıyla kullanılmıştır. Hesaplanan pik debiler, proje debileri ve taşkın frekans analizi sonuçları ile

karşılaştırıldığında yaklaşık 50 yıllık dönüş aralığındaki taşkın debileri mertebesinde veya bu değerlerin üzerinde kalmaktadır.

Tablo 2. PLV Plüviyograf değerleri kullanılarak yağış miktarı

T Saat	1/12	1/6	1/4	1/2	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
PLV (dakika)	5	10	15	30	60	120	180	240	300	360	480	720	1080	1440
KİLİS	0,21	0,30	0,37	0,47	0,57	0,66	0,71	0,76	0,78	0,81	0,85	0,90	0,95	1,00



Şekil 7. Havza alanının çıkış noktasındaki akışa katkıda bulunan kısmının yağış boyunca değişimi ve buna göre hidrografın aldığı şekiller [4]

4. Sonuçlar

Musabeyli Barajı'nın inşası sırasında 31.01.2021 tarihinde meydana gelen yağış ve taşkın sonucunda memba batardosunda su aşımı ve baraj inşaat sahasında çeşitli hasarlar meydana gelmiştir. Yapılan hidrolojik ve hidrolik değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki sonuçlar verilebilir.

Hasarın meydana geldiği sırada oluşan taşkın debisi 100 m^3/s civarındadır, dolayısı ile proje limitlerinin üzerindedir ve barajın üzerinden su aşması kaçınılmazdır. Yağıştan akışa geçiş hesaplarında elde edilen debiler ise yaklaşık 50 yıllık dönüş aralığındaki taşkın debileri mertebesindedir. Bu debiler derivasyon yapılarının tasarım koşullarına göre büyüktür. Bu nedenle olay sırasında oluşan debinin mevcut derivasyon yapıları tarafından mansaba aktarılması mümkün olmamıştır.

Derivasyon yapıları 25 yıllık dönüş aralığında hesaplanan 60 m^3/s'lik debiyi basınçlı olarak çalışması prensibi ile projelendirilmiştir. Derivasyon yapıları, bu planlanan debiyi serbest yüzeyli olarak aktarabilmelidir. Derivasyon tüneli giriş ağzı, yaklaşma yapıları püskürtme beton ile inşa edilmiştir. Oldukça dayanıksız olan bu yapılar, bu bölgede yüksek akım hızları, basınçlar ve hidrodinamik etkilerin oluşması nedeniyle kanal ağzına doğru yıkılarak tünel ağzını tıkamıştır. Yüksek hızlar ve dinamik basınçlarla karşılaşacak bu gibi yapıların daha mukavim malzeme ve tekniklerle yapılması gereklidir. Baraj inşaatının çeşitli nedenlerle (finansal, malzeme temini, yönetimsel vb) uzaması zaten risk altında olan bu tip yapılardaki riski arttırmakta ve beraberinde önemli kayıpları beraberinde getirmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Mei S., Zhong Q., Chen s., Shan Y., (2022), Investigation of the overtopping-induced breach of tailings dams, Computers and Geotechnics.

[2] Zhang F.,Jia S., Zhou X., Wang L., Zhu Y.,(2025), Modeling flood and breach evolution of the landslide dam due to overtopping, Journal of Hydrology.

[3] Musabeyli Barajı, Kati Proje Raporu, Hidrolik Hesaplar, (2013), DSI.

[4] Bayazıt, M. (1999). *Hidroloji*. İTÜ Matbaası.

[5] Bayazıt, M., Önöz, B. (2008). *Taşkın ve Kuraklık Hidrolojisi*. Nobel Akademik Yayıncılık.

[6] DMİ Genel Müdürlüğü (1969). *Türkiye Yağış_Şiddet-Süre-Tekerrür Eğrileri*. Ankara.

Darlık Barajı Yıkılma Taşkınının HEC-RAS ile Modellenmesi ve Mansapta Taşkın Risklerinin Değerlendirilmesi

Armağan Berk KAYA*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
kayaarm18@itu.edu.tr

Mehmet Melih KOŞUCU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye/İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye
0000-0001-5907-6964
kosucu@itu.edu.tr

Mehmet Cüneyd DEMİREL
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye-0000-0003-4402-906X
demirelmc@itu.edu.tr

Yasin PAŞA
İstanbul Gelişim Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Cihangir Mah. Şehit Jandarma Komando Er Hakan Öner Sk. No:1 Avcılar / İstanbul, Türkiye
0000-0003-2104-9746
ypasa@gelisim.edu.tr

Anahtar Kelimeler: darlık barajı, baraj yıkılması, taşkın modellemesi, HEC-RAS, taşkın riski

1. Amaç

Baraj yıkılması sonucunda oluşan taşkınlar, kısa sürede büyük su hacimlerinin mansap yönünde yayılması nedeniyle yerleşim alanları, ulaşım yapıları ve kamu hizmetleri açısından önemli riskler oluşturabilmektedir [1]. Bu tür olayların sayısal olarak modellenmesi; taşkının yayılım alanı, su derinliği ve akım hızının belirlenmesi ve buna bağlı risklerin önceden değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır [2, 3]. Bu çalışmanın amacı, İstanbul'da bulunan Darlık Barajı için olası bir baraj yıkılması senaryosunun HEC-RAS kullanılarak iki boyutlu olarak modellenmesi ve mansapta seçilen bir kamu binası ile ulaşım yapısının taşkın koşullarındaki davranışlarının incelenmesidir. Çalışmanın bir diğer amacı, elde edilen hidrolik sonuçların taşkın riskinin azaltılmasına yönelik mühendislik değerlendirmelerinde kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

Darlık Barajı için yıkılma taşkını daha önce farklı gedik senaryolarıyla iki boyutlu olarak modellenmiş ve mansaptaki binalar için zarar ve risk haritaları üretilmiştir [4]. Bu çalışmada problem yapı ölçeğinde ele alınmıştır: Darlık Barajı yıkılma senaryosu modellenmiş, taşkın dalgasının yayılımı zamana bağlı olarak izlenmiş ve seçilen Bilgi Kuram Koleji çevresindeki su derinliği ile akım hızının zamanla değişimi belirlenmiştir. Ayrıca mansapta D020 karayolu üzerinde bulunan, tabliye genişliği yaklaşık 25 m olan köprü ayrı bir modelde incelenmiş ve köprünün kenar ayaklarında oluşabilecek oyulma hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veriler

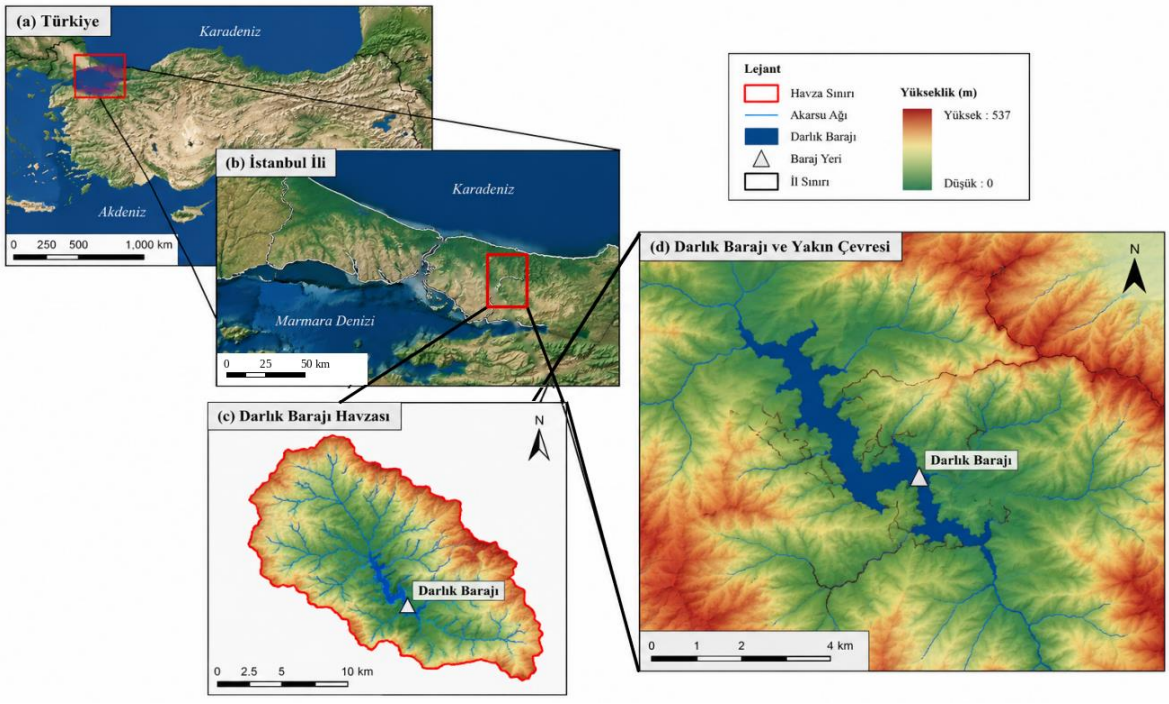
Çalışma alanı, İstanbul'un Şile ilçesinde Darlık Deresi üzerinde yer alan Darlık Barajı ve barajın Karadeniz'e kadar uzanan mansap vadisidir (Şekil 1). Darlık Barajı 1985-1989 yılları arasında inşa edilmiş olup havza alanı yaklaşık 207 km², baraj gölü alanı yaklaşık 6 km²'dir [4]. Havzanın yükseltisi 7-633 m arasında değişmekte, ortalama yükselti 235 m'dir [5]. Barajın gövde ve rezervuar özellikleri DSİ Genel Müdürlüğü Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığı'ndan alınmış olup Tablo 1'de verilmiştir.

Hidrolik modelde Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 5 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır; Şekil 1'deki SRTM 30 m verisi yalnızca konum gösterimi içindir. HEC-RAS 6.5 ortamında baraj gölü, arazi modelinden türetilen hacim-kot eğrisiyle depolama alanı olarak, mansap vadisi ise

yaklaşık 121.000 hücreden oluşan 10 m × 10 m boyutlu bir hesaplama ağıyla iki boyutlu akış alanı olarak tanımlanmış; baraj gövdesi iki alanı birleştiren bir bağlantı yapısı olarak modele aktarılmıştır [6]. HEC-RAS'ın 2B ön işlemcisi her hücre ve hücre yüzü için hidrolik özellik tablolarını alttaki arazi modelinden türettiğinden, hesap ağının boyutu arazi verisinin ayrıntısını kaybettirmemektedir [7]. 2B alanda Manning katsayısı n = 0,06 alınmış, denize ulaşan mansap sınırında normal derinlik (S = 0,01) koşulu tanımlanmıştır. Rezervuara giriş hidrografı tanımlanmamış, başlangıç göl seviyesi kret kotu (57,50 m) olarak alınmıştır. Benzetim 5 saat süreyle, 1 s hesap adımı ve 1 dk çıktı aralığıyla yürütülmüştür.

Tablo 1. Darlık Barajı gövde ve rezervuar bilgileri (DSİ)

DARLIK BARAJI BİLGİLERİ	
Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu
Kret Kotu	57,50 m
Talveg Kotu	10,00 m
Temel Kotu	−20,00 m
Talvegden Yükseklik	47,50 m
Temelden Yükseklik	77,50 m
Kret Uzunluğu ve Genişliği	308,00 m; 10,00 m
Baraj Maksimum Su Seviyesi	55,42 m
Baraj Normal Su Seviyesi (NSS)	52,00 m
Ölü Hacim	$5{,}5\times10^{6}$ m³
Toplam Depolama Hacmi (Aktif)	113×10^{6} m³
Göl Alanı (Normal Su Seviyesi)	$5{,}8\times10^{6}$ m²
Göl Alanı (Minimum Su Seviyesi)	1×10^{6} m²
Dolusavak Yeri	Sol Sahil
Dolusavak Tipi	Karşıdan alışlı serbest
Katastrofal Taşkın Debisi	893 m³/s
Dolusavak Kret Kotu	52,00 m
Dolusavak Kret Genişliği	30,00 m
Boşaltım Kanalı Uzunluğu	67,43 m
Boşaltım Kanalı Genişliği	30,00 m



Şekil 1. Darlık Barajı havzasının konumu (konum haritası altlığı: SRTM 30 m)

2.2 Baraj Yıkılması ve Taşkın Modeli

Gedik parametreleri, HEC-RAS parametre hesaplayıcısında Froehlich (2008) bağıntılarıyla belirlenmiştir [8]:

$$B_{ort} = 0{,}27 \cdot k_0 \cdot V_w^{0{,}32} \cdot h_b^{0{,}04} \quad (1)$$

$$B_t = B_{ort} - z \cdot h_b \quad (2)$$

$$t_f = 63{,}2 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g \cdot h_b^2}} \quad (3)$$

Burada B_{ort} ortalama gedik genişliğini (m), B_t gedik taban genişliğini (m), V_w yıkılma anındaki rezervuar hacmini (m³), h_b gedik yüksekliğini (m), t_f gedik oluşum süresini (s) ve g yerçekimi ivmesini (m/s²) göstermektedir. k_0 yıkılma biçimi katsayısıdır (üstten aşmada 1,3; diğer durumlarda 1,0). z gedik yan şev eğimidir (yatay:düşey; üstten aşmada 1,0; diğer durumlarda 0,7). Yıkılma biçimi olarak üstten aşma seçilmiş; gedik, göl seviyesi 55,42 m'yi aştığında, yani benzetimin başında tetiklenmiştir. Hesaplanan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Gedik parametreleri [8]

Parametre	Değer
Yıkılma biçimi	Üstten aşma (k_0 = 1,3; z = 1,0)
Kret kotu / gedik taban kotu	57,50 m / 15,50 m
Gedik yüksekliği, h_b	42,0 m
Hesapta esas alınan göl kotu / hacim, V_w	55,42 m / 132,9×10⁶ m³
Ortalama / taban gedik genişliği, B_{ort} / B_t	162 m / 120 m
Gedik oluşum süresi, t_f	1,54 sa (5540 s)
Gedik savak katsayısı	1,44

Aynı girdilerle parametre hesaplayıcısındaki diğer bağıntılar (MacDonald ve Langridge-Monopolis, Froehlich 1995, Von Thun ve Gillette) gedik taban genişliği için 134-172 m, oluşum süresi için 1,05-2,37 sa vermektedir; Froehlich (2008) bu aralıkta en dar gediği öngörmektedir. Darlık Barajı, bu bağıntıların türetildiği veri setindeki barajların büyük çoğunluğundan daha yüksek ve daha büyük hacimli olduğundan gedik parametreleri önemli belirsizlik taşımaktadır.

Model sonuçlarının yapı ölçeğinde değerlendirilmesi amacıyla mansapta, Darlık Deresi yatağının hemen yanında bulunan Bilgi Kuram Koleji seçilmiştir. Bu noktadaki su derinliği ve akım hızının zamanla değişimi HEC-RAS zaman serisi çıktılarından elde edilmiş; en büyük değerler ve oluşum zamanları ayrı ayrı belirlenmiştir.

2.3 Köprü Modeli ve Oyulma Analizi

Köprü analizi, 2B yıkılma modelinden bağımsız, ayrı bir 1B modelle yürütülmüştür; iki model bağlaşık değildir. Bu modelde Darlık Deresi boyunca arazi modelinden enkesitler çıkarılmış, D020 karayolu köprüsünün memba ve mansabını temsil eden enkesitler eklenmiş ve tüm enkesitlerde Manning katsayısı n = 0,024 olarak atanmıştır. Köprü tabliyesi (üst kot 5,91 m, alt kot 4,45-4,86 m) ile 4 m genişliğindeki iki orta ayak geometrik veri modülünde tanımlanmış; düşük ve yüksek akım koşullarında enerji (standart adım) yöntemi kullanılmıştır. Köprü, dolusavak katastrofal taşkın debisi olan 893 m³/s ile kararlı akım koşulunda sınanmıştır; bu senaryo, barajın yıkılmadığı en büyük tasarım taşkınını temsil etmektedir. Kenar ayak (abütman) oyulması HEC-RAS hidrolik tasarım modülünde HIRE bağıntısıyla hesaplanmıştır [9]:

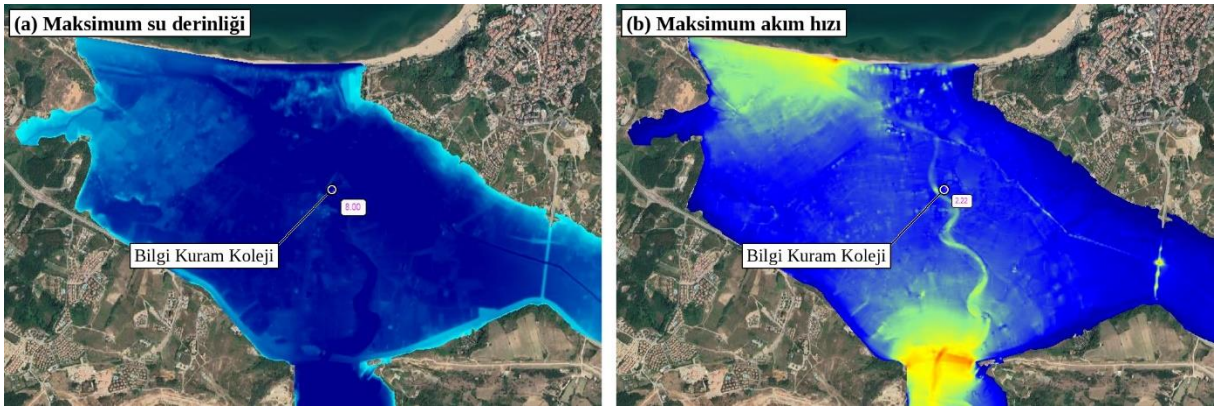
$$y_s = 4 \cdot y_1 \cdot \left(\frac{K_1}{0{,}55}\right) \cdot K_2 \cdot Fr_1^{0{,}33} \quad (4)$$

Burada y_s oyulma derinliğini (m), y_1 kenar ayak topuğundaki akım derinliğini (m), K_1 kenar ayak biçim katsayısını (düşey duvarlı ayak için 1,0), K_2 akım açısı katsayısını ve Fr_1 kenar ayağın hemen menbaındaki Froude sayısını göstermektedir. Bu bağıntı, kenar ayak uzunluğunun akım derinliğine

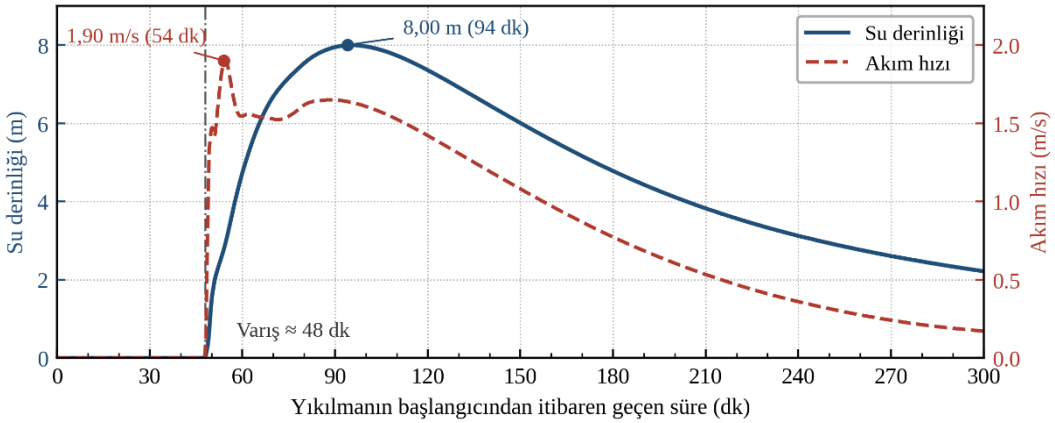
oranı 25'i aştığında önerilmektedir [9]. Bağıntıda taban malzemesi tane çapı bulunmadığından, oyulma modülüne girilen D_{50} = 2 mm değeri kenar ayak oyulmasını etkilememektedir.

3. Değerlendirme

Darlık Barajı yıkılma senaryosunun HEC-RAS sonuçları, taşkın dalgasının mansap yönünde geniş bir alana yayıldığını ve taşkın etkilerinin yalnızca akarsu yatağı ile sınırlı kalmadığını göstermiştir (Şekil 2). Bilgi Kuram Koleji çevresine dalga, yıkılmanın başlamasından yaklaşık 48 dk sonra ulaşmakta ve su derinliği yaklaşık 3 dk içinde 2 m'yi aşmaktadır (Şekil 3). Akım hızı 54. dakikada 1,90 m/s ile, su derinliği ise 94. dakikada 8,00 m ile en büyük değerine ulaşmaktadır; maksimum hız haritasında aynı noktada 2,22 m/s okunmaktadır. Derinlik ve hızın farklı zamanlarda en büyük değerlere ulaşması, taşkın riskinin yalnızca tek bir hidrolik büyüklük üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Benzetimin sonunda (5 sa) okuldaki su derinliği hâlâ yaklaşık 2,2 m'dir.

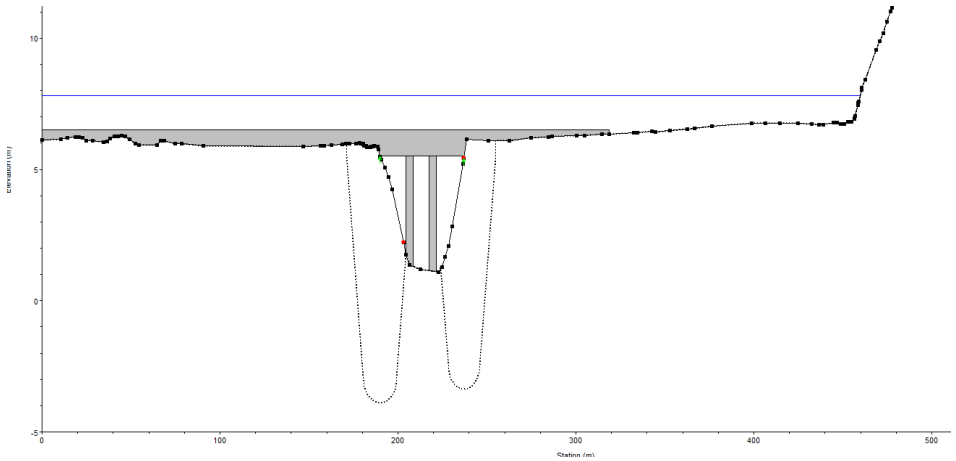


Şekil 2. Mansap düzlüğünde (a) maksimum su derinliği ve (b) maksimum akım hızı dağılımı (etiketli değerler Bilgi Kuram Koleji çevresindeki analiz noktasına aittir)



Şekil 3. Bilgi Kuram Koleji çevresindeki analiz noktasında su derinliği ve akım hızının zamanla değişimi (HEC-RAS zaman serisi çıktısı; t = 0 yıkılmanın başlangıcı)

Aynı baraj için farklı gedik senaryolarıyla yapılan önceki çalışmada gövde aksındaki yıkılma pik debisi yaklaşık 8.000-33.000 m³/s aralığında, bu çalışmadaki gedik boyutlarına en yakın senaryolarda (100-125 m, 1,5 sa) ise 21.300-23.800 m³/s olarak bulunmuştur [4]. Bu değerler, köprü analizinde kullanılan 893 m³/s'lik dolusavak katastrofal taşkın debisinin yaklaşık 24-27 katıdır. Dolayısıyla köprü sonuçları baraj yıkılması durumunu değil, barajın yıkılmadığı en büyük tasarım taşkınını temsil etmektedir.
893 m³/s debide su yüzü köprü tabliyesinin üzerine çıkmaktadır (Şekil 4). Sol ve sağ kenar ayak topuklarındaki akım derinlikleri 2,14 m ve 2,21 m, Froude sayıları 0,22 ve 0,16'dır; HIRE bağıntısıyla hesaplanan oyulma derinlikleri sol kenar ayakta 9,39 m, sağ kenar ayakta 8,80 m'dir (Tablo 3). Bu değerler D_{50} kabulünden bağımsızdır; tane çapı yalnızca orta ayak ve daralma oyulması hesaplarını etkiler. Özellikle köprü gibi kritik ulaşım yapılarında taşkın debisi ile birlikte yerel oyulma riskinin de dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 4. 893 m³/s debide D020 köprüsü kesitinde hesaplanan kenar ayak oyulma çukurları (yatay eksen: enkesit istasyonu, m; düşey eksen: kot, m)

Tablo 3. Kenar ayak oyulması hesabının girdi ve sonuçları (HEC-RAS, HIRE bağıntısı, Q = 893 m³/s)

Büyüklük	Sol kenar ayak	Sağ kenar ayak
İzdüşüm kenar ayak uzunluğu, L' (m)	181,20	222,11
Topuktaki akım derinliği, y_1 (m)	2,14	2,21
Engellenen kesitte ortalama derinlik, y_a (m)	2,81	2,65
Engellenen debi, Q_e (m³/s)	355,06	395,53
Froude sayısı, Fr_1	0,22	0,16
Biçim / açı katsayısı, K_1 / K_2	1,00 / 1,00	1,00 / 1,00
L' / y_1	84,7	100,5
Oyulma derinliği, y_s (m)	9,39	8,80

Çalışmanın başlıca sınırlamaları şunlardır: köprü, yıkılma dalgası yerine 893 m³/s'lik sabit debiyle ve 2B modelden bağımsız bir 1B modelde incelenmiştir; 2B modelde tek bir pürüzlülük katsayısı kullanılmıştır; taşkın yayılımı yer yer model alanının sınırlarına ulaştığından yayılım alanı olduğundan dar, derinlikler olduğundan büyük hesaplanmış olabilir; orta ayak ve daralma oyulması hesaplanmamıştır ve sahaya özgü taban malzemesi verisi bulunmamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Darlık Barajı için HEC-RAS kullanılarak baraj yıkılması kaynaklı taşkın senaryosu modellenmiş ve mansapta oluşabilecek hidrolik etkiler değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Darlık Barajı yıkılma senaryosunda taşkın yayılımı iki boyutlu HEC-RAS modeli ile zamana bağlı olarak ortaya konulmuştur.
- Bilgi Kuram Koleji çevresine taşkın dalgası yıkılmanın başlamasından yaklaşık 48 dk sonra ulaşmaktadır. En büyük akım hızı (1,90 m/s) 54. dakikada, en büyük su derinliği (8,00 m) 94. dakikada oluşmaktadır.
- D020 karayolu köprüsü ayrı bir 1B modelde, dolusavak katastrofal taşkın debisi (893 m³/s) altında incelenmiştir. Yıkılma pik debisi bu değerin yaklaşık 24-27 katı olduğundan köprü sonuçları yıkılma durumunu temsil etmemektedir.
- HIRE bağıntısıyla sol kenar ayakta 9,39 m, sağ kenar ayakta 8,80 m oyulma hesaplanmıştır; bu değerler D50 kabulünden bağımsızdır.
- Köprünün 1B/2B bağlaşık bir modelde yıkılma dalgasıyla sınanması ve ölçülmüş tane dağılımıyla orta ayak ve daralma oyulmasının duyarlılık analizi sonraki çalışma olarak planlanmıştır.

- Elde edilen sonuçlar, baraj yıkılması taşkınlarının kamu yapıları ve ulaşım yapıları üzerindeki etkilerinin sayısal taşkın modelleri ile birlikte değerlendirilmesinin taşkın riskinin azaltılmasına yönelik mühendislik çalışmalarına katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

5. Kaynaklar

[1] Abay, O., Baykan, N., Baykan, N. O. (2015). Tarih boyunca barajların elden çıkma nedenleri. 4. Su Yapıları Sempozyumu, İnşaat Mühendisleri Odası, Antalya, 157-166.

[2] Singh, V. P. (1996). Dam Breach Modeling Technology. Water Science and Technology Library, Vol. 17, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

[3] Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., Thieken, A. H. (2009). Flood risk analyses—how detailed do we need to be? Natural Hazards, 49(1), 79-98. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8

[4] Tilav, E. S., Gülbaz, S. (2024). Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkının incelenmesi: Darlık Barajı örneği. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 10(1), 49-67. https://doi.org/10.21324/dacd.1327805

[5] Cüceloğlu, G. (2013). Darlık havzasının model destekli hidrolojik analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] Paşa, Y., Hacı, A. (2023). Su Kaynakları Mühendisliğinde Bilgisayar Uygulamaları (HEC-RAS). İstanbul Gelişim Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

[7] USACE-HEC (2024). HEC-RAS 2D User's Manual, Version 6.5. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

[8] Froehlich, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)

[9] Richardson, E. V., Davis, S. R. (2001). Evaluating Scour at Bridges, 4th ed. Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA NHI 01-001, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Açık Kanal Akımlarında Tesla Vanası Yardımıyla Akım Enerjisinin Sönümlenme Performansının Bir Değerlendirilmesi

Mehmet Cihan AYDIN*
Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Böl., Merkez, Bitlis, 0000-0002-5477-1033
mcaydin@beu.edu.tr

Ali Emre ULU
Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Böl., Merkez, Bitlis, 0000-0001-7499-3891
aeulu@beu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Tesla valfı, açık kanal hidroliği, HAD, enerji sönümleme

1. Amaç

Sulama şebekeleri, taşkın kanalları, kentsel drenaj sistemleri gibi özellikle yüksek eğimli ve yüksek hızlı açık kanal akımlarının enerji sönümlemeleri hidrolik mühendisliğinin önemli problemlerinden biridir. Açık kanal akışlarını kontrol etmek için hem yan duvar yakınlarına hem de ana akış bölgesine yerleştirilen pasif ve aktif akış düzenleme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Eşikler, bölmeler, engeller ve savak benzeri yapılar gibi geleneksel akış yönlendirme elemanları, kanal tabanına veya akış kesitinin içine yerleştirilir [1-4]. Diğer taraftan su ve sanat yapıları nedeniyle engellenen balık göçleri balık geçidi yapıları sayesinde sağlanır [5-9]. Bu geçitlerde, balıkların akım yönüne karşı memba tarafına rahat geçişinin sağlanması için akım hızının yavaşlatıldığı ölü akım alanlarının oluşturulması amaçlanır. Genel olarak, açık kanal akımlarında bir takım ek düzenleme ve enerji kırıcı yapılara ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada, 1916 yılında Nikola Tesla'nın geliştirdiği ve 1920 yılında kendi adıyla patentlenen [10] Tesla Vanasından esinlenerek oluşturulan enerji kırıcı elemanların açık kanal akışları üzerindeki hidrodinamik etkileri ve enerji kırma performanslarının incelenmesi amaçlanmaktadır. Tesla Vanasının iç akış yolu, eğrisel yan kanallar, asimetrik ayırma bölgeleri ve momentum yönlendirici geçitler sayesinde, bir yönde düşük kayıplı akışa izin verirken, ters yönde yüksek hidrolik kayıplar oluşturur [11-13]. Başka bir deyişle, Tesla vanası, tek bir yönde sıvı akışına izin verirken aksi yönde sıvıyı akış yönünün tersine çeviren yönlendiricileri sayesinde pasif bir engelleme yapmaktadır. Bu özelliğiyle Tesla vanası kapalı akışlar için tek yönlü iyi bir enerji sönümleyici görevi görür. Tesla Vanası bu özelliğiyle günümüzde mikro ve makro akışkan uygulamaları, darbeli jet motorları, yeni teknoloji bazı cep telefonlarının soğutma sıvısı döngüsü gibi birçok ileri teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Açık kanal uygulamalarıyla ilgili olarak Son ve Hwang [14], Tesla vanası mantığıyla kullanarak deniz suyunun ters (yukarı) akışını engellemek için açık kanal yan duvarlarına karşılıklı yerleştirilişmiş Tesla valfi kanatlarının akım üzerine etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada ise ilk kez kanal tabanına yerleştirilen tek taraflı Tesla valfi kanatlarının akımdaki enerji sönümleme performansları incelenmiş ve konuyla ilgili bazı öneriler sunulmuştur. Ayrıca klasik hidrolik sıçrama enerji sönümleme performanslarıyla da karşılaştırılmıştır. Konu kapsamlı bir şekilde Aydın ve Ulu [15] tarafından ayrıca çalışılmış olup bu bildiri çalışmanın kısmi bir özetini oluşturmaktadır.

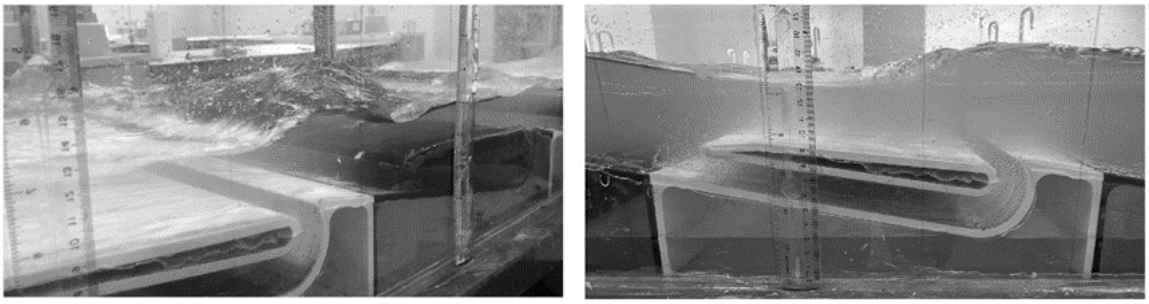
2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada yöntem olarak deneysel ve sayısal modeller kullanılmıştır. Bu yöntemlerin detayları aşağıda özetlenmiştir.

2.1. Deneysel Model

Hidrolik model çalışmalarında Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık fakültesinde kurulan deney seti kullanılmıştır. Deney düzeneği iki adet hazne arasına yerleştirilmiş bir açık kanal şeklinde tasarlanmıştır. Bu iki hazne arasındaki su bir pompa vasıtasıyla devir daim edilerek kanaldan kararlı akım elde edilmektedir. Birinci hazne içindeki akım sakinleştiricileri sayesinde kanalın girişinde düzgün bir memba akımı elde edilmektedir. Kanalın çıkışına yerleştirilen ayarlanabilen keskin savak sayesinde kuyruk suyu yüksekliği ayarlanabilmektedir. Akım debisi pompanın çıkışına yerleştirilmiş bir elektromanyetik debimetre ve vana ile hassas bir şekilde ayarlanmaktadır. Başlangıca bir mafsal ile bağlanan kanalın eğimi mansaptaki ayarlı ayak ile değiştirilebilmektedir. Deney kanalının tabanına yerleştirilecek enerji kırıcılar 3D yazıcı tarafından üretilmiştir. Deneysel çalışmaya ait bazı görüntüler Şekil 1'de sunulmaktadır. Deneyler faklı akım (Q=4 – 11 L/s) ve kanal eğimi (%0 – %6) koşullarında

yürütülmüştür. Froude sayısı yaklaşık 2 – 4 aralığında ayarlanarak süperkritik (sel) akım koşulları oluşturulmuştur.



Şekil 1. Hidrolik deney çalışmalarından bazı görüntüler

2.2. Sayısal Model

Sayısal simülasyonlar FLOW-3D yazılımı ile 3 boyutlu yürütülmüştür. Analizlerde kullanılan 3B katı modeller önce 3D yazıcıdan üretilerek fiziksel model oluşturulmuş ve elde edilen deneysel verilerle sayısal model doğrulanmıştır (Şekil 2). Bu sayede fiziksel model geometrisi birebir sayısal ortama aktarılmıştır. Sayısal modelde akışkan hareketini tanımlayan temel denklemler sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözülür. Doğrusal olmayan bu denklemler akışın davranışını yönetir. Akışkan hareketini ifade eden temel süreklilik ve momentum denklemleri aşağıda sunulmuştur [16]:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+(u.\nabla)u\right)=-\nabla p+\mu\nabla^2 u+f_b \quad (1)$$

$$\nabla.u=0 \quad (2)$$

Bu denklemlerdeki u=hız vektörü, ρ=akışkan yoğunluğu, p=basınç, μ=dinamik viskozite, f_b=yerçekimi kuvvet vektörüdür. Serbest su yüzeyini tahmin etmek için Hirt ve Nichols [17] tarafından önerilen hacim oranları (VOF=Volume of Fluid) metodu kullanılmıştır.

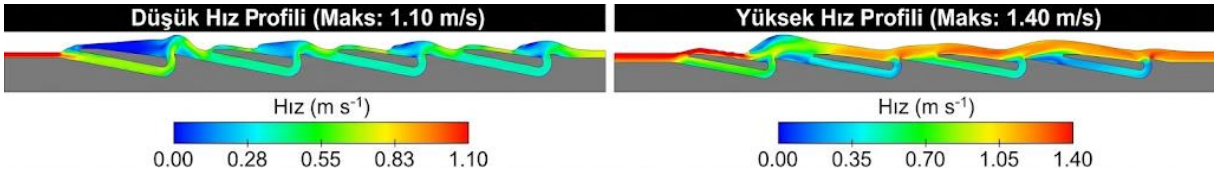


Şekil 2. Kanal tabanına yerleştirilen katı model geometrisi [15]

Sayısal modellerin doğrulaması için kanal boyunca deneysel olarak ölçülen su yüzü profilleri farklı ağ hücresi boyutları için sayısal model sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve hata analizleri yapılmıştır. Ağ hassasiyetini ölçmek için Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convercense Index=GCI) kullanılmıştır [18]. Analizler su yüzü profilleri bakımından deneysel sonuçlar ile ortalama %10'luk bir hata verirken, meş duyarlılık analizleri ise ortalamada %2.4 belirsizliğini göstermiştir. Bu hata miktarı ±0.37 mm'lik mutlak hataya karşılık gelmektedir ki bu sayısal hesaplamalar için makul bir doğruluk sağlar.

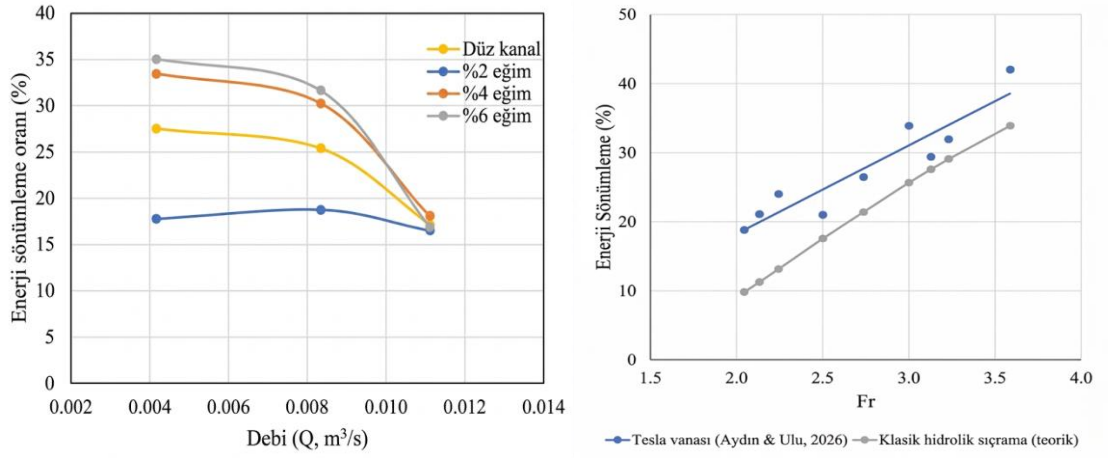
3. Değerlendirme

Çalışma kapsamında [5], farklı kanal eğimleri ve debiler altındaki akış davranışları üç boyutlu simülasyonlar ve sayısal modelleme yöntemleriyle incelenmiştir. Eğimsiz kanalda nehir rejimi akış nedeniyle su yüzeyi daha düz ve sakin seyrederken, kanal eğimi arttıkça akış hızlanarak süperkritik faza geçmiş ve her bir engel (Tesla valfi adımı) hidrolik sıçramalara ve yüzey dalgalanmalarına yol açmıştır (Şekil 3). Küçük debilerde her Tesla valfi adımında iki hidrolik sıçrama ile düzenli bir yapı ve benzer hız örüntüleri gözlemlenirken; yüksek debilerde bu düzen bozularak adım başına tek bir sıçramaya uğrayarak, eğimin artmasıyla birlikte kanat üstü akış hızları artmakta ve valf çıkışlarında belirgin bir hidrolik sıçramalar meydana gelmektedir. Ardışık valfların çıkışındaki tersinir akımlarla bir sonraki valfın kanada çarparak arılan akımın birleşimi sonucu oluşan bu hidrolik sıçramalar kanal boyunca akımın enerjisini önemli miktarda sönümlemektedir.



Şekil 3. Minimum ve maksimum debiler için hız kontörleriyle birlikte su yüzü profilleri [15]

Farklı kanal eğimleri ve debilere göre enerji sönümleme oranlarının gösterildiği Şekil 4(a)'da, tüm eğimlerde debi arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığı ve bu düşüşün Q > 8 L/s sınırından sonra hızlandığı belirlenmiştir. Artan kanal eğimi ve akış hızı genel olarak enerji sönümlemesini yükseltip verimde ortalama %10'luk bir artış sağlasa da, eğimin bu olumlu etkisi yüksek debilerde zayıflamakta ve maksimum debide %17 civarında sabitlenerek önemini kaybetmektedir.



(a) (b)

Şekil 4. a) Faklı kanal eğimlerinde akım debisine bağlı olarak enerji sönümleme oranlarının değişimi [15], b) Tesla valfı ile klasik hidrolik sıçrama enerji kırma performanslarının karşılaştırılması [19]

Diğer taraftan Aydin ve Ulu [19], yeni bir enerji kırıcı yapı olarak kullanılan Tesla vanası geometrisinin hidrolik performansı klasik hidrolik sıçrama ve farklı eşik blokları ile karşılaştırılmıştır. Froude sayısı (Fr) 2.0 ile 3.6 arasında, Tesla vanasında enerji sönümleme oranı, teorik hidrolik sıçrama durumuna benzer şekilde doğrusal bir eğilim göstermektedir (R^2=0.88). Tesla vanasının sönümleme performansı, teorik hidrolik sıçramaya göre, düşük debilerde nerdeyse iki iken, bu fark Fr sayısı arttıkça azalmaktadır (Fr=3.5 için yaklaşık %15). Tesla vanasının enerji sönümlemedeki bu üstün başarısı; akışın yönlendirilmesiyle oluşan yüksek türbülansa ve akış yolunun uzaması sonucu artan cidar kayma gerilmelerine bağlıdır (Şekil 4b).

4. Sonuçlar

Çalışma sonuçları, Tesla tipi alt eşiklerin açık kanallarda enerji sönümlemesinde yüksek başarı Çalışma sonuçları, Tesla tipi taban eşiklerin açık kanallarda enerji dağıtımında yüksek başarı gösterdiğini ortaya koymaktadır (%17 - %35). Genel olarak kanal eğimiyle birlikte enerji sönümleme performansları da artmaktadır. Ancak beklenmedik şekilde nispeten küçük kanal eğimlerinde (~%2 gibi) düz kanala göre daha düşük performans gösterirken, daha büyük eğimlerde (>%3) enerji sönümleme oranı artmaktadır. Eğimin artış üzerindeki etkisi %1 ila %100 arasındadır. Artan debi ile birlikte enerji sönümleme oranı, artan bir azalış hızıyla azalmakta ve yaklaşık %17 seviyesinde hemen hemen eşitlenmektedir. Froude sayısı enerji sönümleme oranı üzerinde belirli bir saçılımla (R^2=0.88) lineer artış göstermektedir. Teorik hidrolik sıçrama ile karşılaştırıldığında Fr sayısıyla değişim aralığında Tesla vanasının yaklaşık %15 ila %100 daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Tesla vanası taban eşiklerinin temiz su akımlarında enerji sönümlemede gösterdiği bu performansa karşın, kanat altı dar geçitlerdeki nispeten düşük hız bölgeleri nedeniyle, dip sediment taşınımı nedeniyle alt kanat geçitlerinin tıkanma ve işlevini kaybetme riski barındırmaktadır. Bu problemi aşmak adına kanadı çıkarılarak duvar kılavuzlu eşikler önerilmiştir. Tesla valf eşiğinde çoklu akış tersine dönmeleri ile daralma-genişleme bölgeleri bu enerji dağılım etkisini daha belirgin kılarken, duvar yönlendirmeli eşik akışı daha kontrollü bir akım döngüsüyle

birlikte daha kararlı hidrolik sıçrama bölgeleri oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan dörtlü eşik konfigürasyonunun devamında daha fazla eşik kullanımının enerji sönümleme etkilerinin artacağı varsayılabilir. Ancak, artan eğimle birlikte son eşiklerin enerji dağıtma potansiyeli önemli ölçüde azalmakta olup, daha fazla eşik eklenmesinin türbülanslı doygunluk nedeniyle toplam enerji dağılımındaki değişimini kısıtlayacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca bir öneri olarak, Tesla vanalarının geometrik koşullarının değişimi ve baraj dolusavak şut kanallarındaki kullanımı ayrıca bir araştırma konusu olabilir.

Bilgilendirme ve Teşekkür
Bu çalışma Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BEBAP) birimi tarafından BEBAP 2024.23 numaralı proje ile desteklenmiştir. Bu bildiri, yazarların [15] ve [19] numaralı çalışmalarına dayanarak hazırlanmıştır.

5. Kaynaklar

[1] M. C. Aydin, Ö. Bilhan, ve M. E. Emiroglu, “Analysis of Trapezoidal Labyrinth Weirs Using Computation Fluid Dynamics (CFD)”, DUMF J. Eng. Fac., c. 10, sayı 2, ss. 731–742, 2019.

[2] M. C. Aydin, A. E. Ulu, ve E. Işık, “Investigation of Hydraulic Characteristics of Stepped Labyrinth Weirs under Fixed Crest Length”, Water Resour. Manag., c. 39, sayı 7, ss. 3295–3310, Şub. 2025, doi: 10.1007/s11269-025-04107-8.

[3] E. Gül, Z. Kılıç, E. İkincioğulları, ve M. C. Aydın, “Investigation of the effect of variable-sized energy dissipating blocks on sluice gate performance”, Water SA, c. 50, sayı 1, ss. 92–105, 2024.

[4] A. E. Ulu, M. C. Aydin, ve F. Önen, “Energy Dissipation Potentials of Grouped Spur Dikes in an Open Channel”, Water Resour. Manag., c. 37, sayı 11, ss. 4491–4506, 2023, doi: 10.1007/s11269-023-03571-4.

[5] G. Zeng, M. Xu, J. Mou, C. Hua, ve C. Fan, “Application of Tesla valve’s obstruction characteristics to reverse fluid in fish migration”, Water, c. 15, sayı 1, s. 40, 2022.

[6] K. Keizer, “Determination whether a large scale Tesla valve could be applicable as a fish passage”, 2016, TUD.

[7] Y. Chen, G. Zeng, M. Xu, B. Fan, ve R. Ying, “An Angles-Based Design of an Island-Type Fishway and Its Hydraulic Properties Inside the Channel”, Hydroecology Eng., c. 2, sayı 3, s. 10012, 2025.

[8] M. Dong, G. Zeng, M. Xu, J. Mou, ve Y. Gu, “Influence of Valvular Structures on the Flow Characteristics in an Island-Type Fishway”, Water, c. 16, sayı 16, s. 2336, 2024.

[9] G. Zeng, M. Xu, J. Mou, K. Wang, ve Y. Ren, “Research on the Hydraulic Characteristics of Island Fishways by Experimental and Numerical Methods”, Water, c. 15, sayı 14, s. 2592, 2023.

[10] N. Tesla, “Valvular Conduit (Patent)”, Unites States Pat. Off., ss. 01–16, 1920.

[11] Z. jiang Jin, Z. xin Gao, M. rui Chen, ve J. yuan Qian, “Parametric study on Tesla valve with reverse flow for hydrogen decompression”, Int. J. Hydrogen Energy, c. 43, sayı 18, ss. 8888–8896, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.014.

[12] M. Zeidan, M. Németh, G. R. Abhijith, R. Wéber, ve A. Ostfeld, “Transient Flow Dynamics in Tesla Valve Configurations: Insights from Computational Fluid Dynamics Simulations”, Water (Switzerland), c. 16, sayı 23, 2024, doi: 10.3390/w16233492.

[13] Y. L. Zhang, J. B. Tong, ve Z. C. Zhu, “Numerical calculation of forward and reverse flow in Tesla valves with different longitudinal width-to-narrow ratios”, Sci. Rep., c. 13, sayı 1, ss. 1–13, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-39758-3.

[14] S. Son ve J. H. Hwang, “Application of Tesla Valve to Bidirectional Open-Channel Flows”, KSCE J. Civ. Eng., c. 28, sayı 3, ss. 1011–1025, 2024, doi: 10.1007/s12205-024-1106-4.

[15] Aydin, M. C., & Ulu, A. E. Hydraulic performance of a wall-guided Tesla valve installed on an open-channel bottom. Flow Measurement and Instrumentation, 103374. 2026

[16] I. Flow Science, “FLOW-3D User Manual, Theory Guide”, 2019, Flow Science, Inc., Santa Fe, NM: FLOW-3D User Manual. [Çevrimiçi]. Available at: https://www.flow3d.com/

[17] C. W. Hirt ve B. D. Nichols, “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”, J. Comput. Phys., c. 39, sayı 1, ss. 201–225, 1981, doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.

[18] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, ve P. E. Raad, “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications”, J. Fluids Eng. Trans. ASME, c. 130, sayı 7, ss. 0780011–0780014, 2008, doi: 10.1115/1.2960953.

[19] Aydin, M. C., & Ulu, A. E. Comparatıve Analysıs of Hydraulıc Performance of Conventıonal and Next-Generatıon Energy Dıssıpators in Open- Channel Flows: Tesla-Type Energy Dıssıpators. MEETCON-NEXT 3. International Congress on Scientific Research, July 19-21, 2026. Ankara, Türkiye.

Dolusavak Plakaları Arasındaki Derz Boşluklarında Akım ve Türbülans Özelliklerinin İncelenmesi

Torkan HASSANİ*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
hassani22@itu.edu.tr

Şevket ÇOKGÖR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
cokgor@itu.edu.tr

Muhammed Fatih ÖZÜN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
ozun21@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* dolu savak, hidrodinamik kuvvetler, hız ölçümü, PIV, türbülans şiddeti

1. Amaç

Bu çalışma, dolusavak ve enerji kırıcı havuz taban plakaları arasındaki derz boşluğunun bulunduğu düzgün taban yakınındaki akım karakteristiklerini, özellikle türbülans özelliklerini incelemektedir. Dolusavaklar ve enerji kırıcı havuzlar gibi hidrolik yapılar, işlevleri gereği yüksek debili ve yüksek hızlı akım koşullarına maruz kalmakta ve özellikle taşkınlar sırasında oluşan yüksek debilerin mansaba güvenli bir şekilde iletilmesini sağlayacak biçimde tasarlanmaktadır. Bununla birlikte, geçmişte bu tür yapılarda çeşitli yapısal hasarlar meydana gelmiştir. Dickinson Barajı'nda 1954, Big Sandy Barajı'nda 1983, Keban Barajı dolusavağında 1974 ve daha yakın tarihte Oroville Barajı'nda 2017 yılında meydana gelen dolusavak hasarlarının, beton plakaların hidrolik kaldırma etkisine maruz kalması, derz boşluklarının etkisiyle gelişen kavitasyon ve plakalar üzerinde oluşan negatif basınç dalgalanmaları gibi hidrodinamik etkilerle ilişkili olduğu belirtilmektedir [1, 2].

Dolusavak ve enerji kırıcı havuzların beton tabanları, belirli boyutlarda tasarlanan plakalar şeklinde oluşturulabilmekte olup, bu plakaların hidrolik kaldırmaya karşı stabilitesi; kendi ağırlıkları, gerekli durumlarda kullanılan ankraj sistemlerinin taşıma kapasitesi ve plaka üst yüzeyine etkiyen su basıncı ile sağlanmaktadır [3]. Özellikle derz boşluklarından plaka altına iletilen basınç ile plaka yüzeyinde oluşan ani negatif basınç dalgalanmalarının birlikte etkili olması, bu dirençlerin aşılmasına ve plaka stabilitesinin tehlikeye girmesine neden olabilmektedir.

Yapılan gözlemler, bu tür yapılardaki hasarların çoğunlukla plakaların birleşim bölgelerinde, diğer bir ifadeyle plakalar arasındaki derz boşluklarında başladığını göstermektedir. Derz bölgelerinde gelişen kararsız akım koşulları, vorteks oluşumları ve türbülans yapısındaki değişimler, ana akım ile derz boşluğu içerisindeki akışkan arasındaki etkileşimi önemli hale getirmektedir. Bu nedenle, söz konusu etkileşimin ve buna bağlı gelişen hidrodinamik süreçlerin daha iyi anlaşılması, dolusavakların, sediment baypas tünellerinin ve plaka hasarına maruz kalabilecek diğer hidrolik yapıların güvenli tasarımı ve sürdürülebilir kullanımı açısından önem taşımaktadır.

Düzgün taban yakınındaki türbülans özellikleri literatürde kapsamlı olarak incelenmiş; taban–akım etkileşiminin türbülans şiddetleri ve Reynolds kayma gerilmeleri üzerindeki etkileri çeşitli deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur [4]. Bununla birlikte, plakalar arasındaki derz boşluğunun tabana yakın türbülans yapısını nasıl değiştirdiği ve derz içerisindeki akışkan ile ana akım arasındaki etkileşimin akım özelliklerine nasıl yansıdığı konusunda çalışmalar sınırlıdır. Benzer şekilde, enerji kırıcı havuzlarda ve dalma havuzlarında kaya bloklarının veya beton plakaların kaldırılmasına ilişkin çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, dolusavak şütlerinde meydana gelen plaka kaldırma mekanizmasına yönelik araştırmalar daha sınırlı kalmıştır. Özellikle sel akım koşullarında, plakalar ve derzler çevresindeki türbülanslı akım yapısı ile dinamik basınç dalgalanmalarının plaka kaldırma mekanizmasıyla ilişkisi henüz tam olarak açıklığa kavuşturulmuş değildir.

Bu çalışma, söz konusu bilgi eksikliklerinin giderilmesine katkı sağlamak amacıyla sistematik bir laboratuvar araştırması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, kapalı devre çalışan bir laboratuvar kanalında tabana yakın bölgede ayrıntılı hız ölçümleri yapılmış ve elde edilen akım özellikleri literatürdeki düzgün taban koşullarına ait deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece, derz boşluğunun tabana yakın akım ve türbülans özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

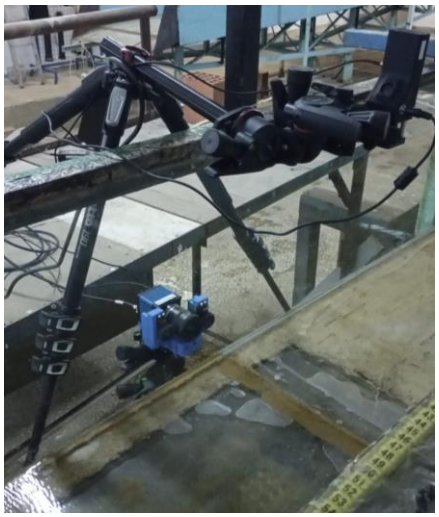
2. Materyal ve Yöntem

Deneyler, 12 × 0.5 × 0.5 m boyutlarındaki yatay laboratuvar kanalında gerçekleştirilmiştir (Şekil1). Kanalın mevcut tabanı üzerine, plakalar arasındaki derz boşluğunu temsil etmek amacıyla farklı boşluk genişliklerine (2, 3 ve 4 mm) sahip, 10 mm kalınlığında iki pleksiglas plaka yerleştirilmiş ve memba ile mansap plakaları aynı kotta tutulmuştur. Akımın hem sel ve hem nehir rejim koşullarında incelenebilmesi amacıyla, ölçüm kesitinin yaklaşık 1.5 m membasına bir sürgülü kapak yerleştirilmiştir. Debi ölçümleri dik açılı V-çentikli savak kullanılarak gerçekleştirilmiş, su derinlikleri ise noktasal seviye ölçerler yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 1. İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı deney kanalı

Akım alanındaki hız ölçümleri, Parçacık Görüntü Velosimetrisi (PIV) yöntemiyle gerçekleştirilmiş (Şekil 2) ve elde edilen görüntüler MATLAB tabanlı PIVlab yazılımında analiz edilmiştir. Her derz açıklığı için görüntüler ayrı ayrı değerlendirilmiş, analiz öncesinde maskeleme, kontrast iyileştirme, filtreleme ve arka plan çıkarma işlemleri uygulanmıştır. Hız vektörleri, FFT tabanlı çapraz korelasyon yöntemi kullanılarak üç geçişli analiz sonucunda elde edilmiş ve referans uzunluk ile görüntüler arasındaki zaman aralığı kullanılarak kalibre edilmiştir.



Şekil 2. Parçacık görüntü velosimetresi (PIV)

PIV analizinden elde edilen iki boyutlu hız bileşenleri kullanılarak memba, derz boşluğunun orta bölgesi ve mansapta seçilen ölçüm noktaları için hız-zaman serileri oluşturulmuştur. Görüntüleme frekanslarına bağlı olarak ardışık ölçümler arasındaki zaman aralığı 15, 25 ve 50 Hz için sırasıyla 0,067, 0,040 ve 0,020 s olarak alınmıştır. Böylece farklı derz açıklıklarında akım ve türbülans özelliklerinin konumsal ve zamansal değişimleri değerlendirilmiştir.

Türbülans şiddetleri ve türbülans kayma gerilmesi değerleri, elde edilen hız ölçümlerinden yararlanılarak belirlenmiştir. Froude sayısının 0,18–2,16 aralığında değiştiği, hem nehir hem de sel rejimini kapsayan farklı akım koşulları incelenmiştir.

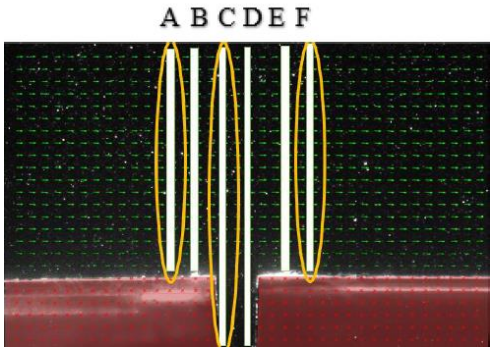
3. Değerlendirme

Deney matrisi Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de, *s* plakalar arasındaki derz boşluğunu, *h* su derinliğini, *s/d* derz boşluğunun plaka kalınlığına oranını ve *s/h* derz boşluğunun su derinliğine oranını ifade etmektedir. *V*, *Q* ve *q* ise sırasıyla kesit ortalama hızını, debiyi ve birim genişlik başına debiyi göstermektedir.

Tablo 1. Deney matrisi

Deney	Akım rejimi	Fr	s (mm)	h (cm)	s/d	s/h	V (m/sn)	Q (m^3/sn)	q (m^3/sn-m)
1	Nehir	0,70	2	5,40	0,2	0,37	0,507	0,014	0,028
2	Nehir	0,57	2	12,00	0,2	0,17	0,623	0,037	0,074
3	Nehir	0,70	2	3,00	0,2	0,67	0,381	0,006	0,012
4	Nehir	0,18	2	7,50	0,2	0,27	0,152	0,006	0,012
5	Nehir	0,71	3	6,30	0,3	0,48	0,559	0,018	0,036
6	Nehir	0,67	3	11,40	0,3	0,26	0,705	0,040	0,080
7	Nehir	0,68	3	3,10	0,3	0,97	0,377	0,006	0,012
8	Nehir	0,70	4	6,20	0,4	0,65	0,544	0,017	0,034
9	Nehir	0,66	4	9,50	0,4	0,42	0,640	0,030	0,060
10	Nehir	0,65	4	11,20	0,4	0,36	0,682	0,038	0,076
11	Sel	1,17	2	4,90	0,2	0,41	0,814	0,020	0,040
12	Sel	1,38	3	5,70	0,3	0,53	1,030	0,029	0,058
13	Sel	1,43	3	3,30	0,3	0,91	0,816	0,013	0,026
14	Sel	2,16	3	2,70	0,3	0,11	1,111	0,015	0,030
15	Sel	2,16	4	2,70	0,4	0,15	1,111	0,015	0,030

Şekil 3'te ölçüm konumları, Şekil 4'te ise deneysel olarak elde edilen akım ve türbülans şiddetleri ile kayma gerilmesi (türbülans viskozitesi) sonuçlarının Nezu ve Nakagawa'nın verileriyle karşılaştırılması sunulmuştur.



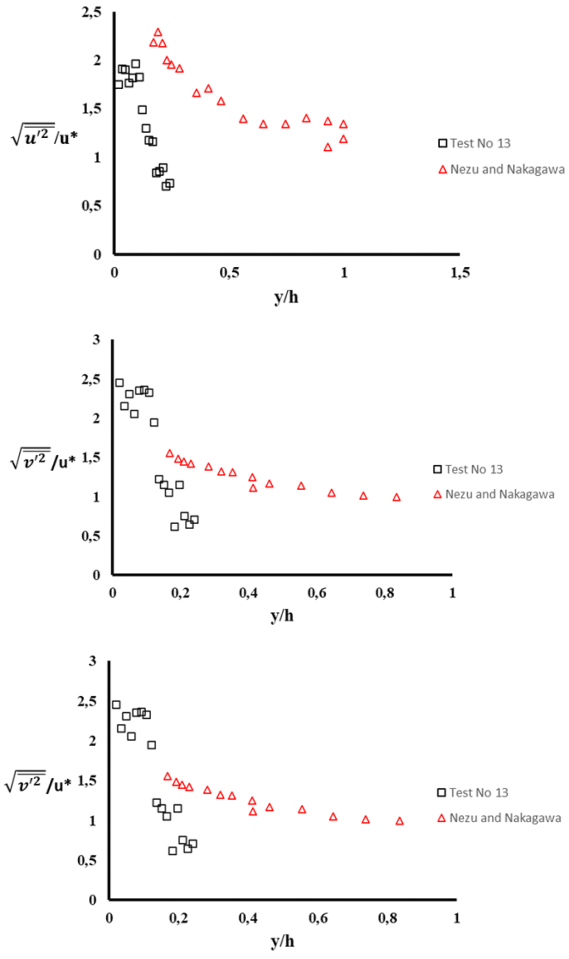
Şekil 3. 13 no.lu deneye ait ölçüm kesitleri

Şekil 3'te belirtilen kesitte, derz boşluğunun varlığıyla birlikte akım ve türbülans özelliklerinde belirgin değişimler meydana geldiği görülmektedir. Derzin memba bölgesinde türbülans şiddetleri ve Reynolds kayma gerilmesi değerleri, Nezu ve Nakagawa'nın düzgün taban koşulları için elde ettiği sonuçlara yakın değerler göstermektedir [4]. Derzin orta kısmında ise akımın boşluğa doğru yönelmesiyle birlikte u′u' ve v′v' hız dalgalanmaları baskılanmakta ve buna bağlı olarak türbülans şiddetleri azalmaktadır. Bu bölgede türbülans viskozitesi değerlerinin de Nezu ve Nakagawa'nın düzgün taban sonuçlarına yaklaştığı

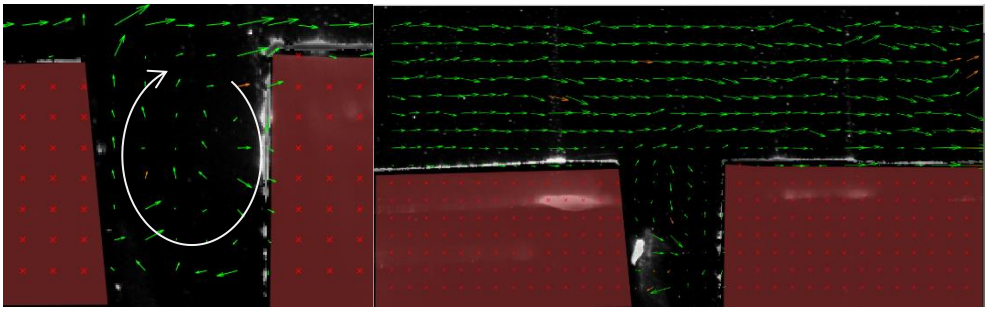
görülmektedir. Mansap bölgesinde ise derz içerisinden ana akıma taşınan vortekslerin etkisiyle türbülans şiddetlerinin konuma ve vorteks ayrılma sıklığına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Buna karşılık, Reynolds kayma gerilmesi değerlerinin genel olarak düzgün taban koşullarında elde edilen değerlere yakın kaldığı görülmüştür.

Gerçekleştirilen tüm deneylerde, ana akımın derz boşluğu ile etkileşime girdiği ve derzin memba kenarından itibaren vorteks oluşumunun meydana geldiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, oluşan vortekslerin derz boşluğu içerisine nüfuz etme derinliği, derz genişliğine ve ana akım koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Küçük derz açıklıklarında vorteks oluşumu gözlenmesine rağmen, vorteksin boşluk içerisindeki düşey gelişimi sınırlı kalırken, derz genişliğinin artmasıyla birlikte vortekslerin daha derin bölgelere nüfuz ettiği belirlenmiştir. Özellikle s/d=0,3 ve s/d=0,4 oranlarında vortekslerin derz boşluğu içerisinde daha belirgin şekilde geliştiği ve nehir akım koşullarında daha derin bölgelere ulaştığı görülmüştür. Düşük akım hızlarında vorteksin gelişimi için daha uzun bir zaman ölçeğinin mevcut olması, vorteksin derz içerisindeki nüfuz derinliğinin artmasına katkı sağlamaktadır.

Vortekslerin derz boşluğu içerisinde daha derine nüfuz etmesi, boşluk içerisindeki suyun ana akıma doğru taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Bu durum, derz içerisindeki suyun plaka altında bulunan su ile bağlantılı olması halinde, plaka altındaki suyun ana akıma tahliye edilmesine ve dolayısıyla plaka altında oluşabilecek basıncın azalmasına katkı sağlayabilir. Bu mekanizmanın hidrolik kaldırma (hydraulic jacking) etkisinin sınırlandırılması açısından olumlu bir rol oynayabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla, tüm deneylerde gözlenen vorteks oluşumunun yanı sıra, vortekslerin derz içerisine nüfuz etme derinliğinin derz geometrisi ve akım koşullarına bağlı değişimi, dolusavak plakalarında ana akım–derz etkileşiminin ve hidrolik kaldırma mekanizmasının değerlendirilmesi açısından önemli bir parametre olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4. 13 no.lu deneye ait türbülans ölçüm sonuçları (Şekil 3'de gösterilen C kesit)



Şekil 5. 13 no.lu deneye ait hız vektörleri ve vorteks oluşumu

4. Sonuçlar

Deneysel sonuçlar, plakalar arasındaki derz boşluğu üzerindeki akımın kararsız olduğunu ve derz genişliği arttıkça boşluk içerisindeki akışkan ile ana akım arasındaki etkileşimin daha belirgin hale geldiğini göstermiştir. Derz boşluğunda oluşan vortekslerin ana akıma doğru çekilmesi, özellikle derzin hemen mansabındaki plaka üzerinde kararsız akım koşullarının oluşmasına ve türbülans şiddetlerinin artmasına neden olmuştur. Memba bölgesindeki türbülans şiddetleri bozulmamış düzgün yüzey koşullarındaki değerlere yakınken, derz boşluğunun orta kısmında boşluğa yönelen akım nedeniyle türbülans şiddetlerinin baskılandığı belirlenmiştir. Derz genişliğinin artmasıyla vortekslerin boşluk içerisine daha derin nüfuz ettiği ve boşluk içerisindeki suyun ana akım tarafından daha kolay çekildiği gözlenmiştir. Bu durumun plaka altındaki boşluk suyu basıncını ve buna bağlı hidrolik kaldırma etkisini azaltabileceği, ancak daha geniş derzlerin erozyon, aşınma ve akım–yapı etkileşimi açısından farklı problemlere yol açabileceği değerlendirilmiştir.

5. Kaynaklar

[1] Wahl, T. L. (2021). Uplift Pressure and Flow through Open Offset Joints in Spillway Chutes, (Report No. ST-2021-19170-01 / DSO-2021-08). Denver, Colorado: Hydraulic Investigations & Laboratory Services Group

[2] Wahl, T. L., and Heiner, B.J. (2024). Effects of Joint and Crack Geometry on Hydraulic Jacking in Lined and Unlined Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(5): 04024030

[3] Hager, H.W. (1992). Energy Dissipators and Hydraulic Jump, CA: Kluwer Academic

[4] Nezu, I., & Nakagawa, H. (1994). Turbulence in Open-Channel Flows, CA: A.A. Balkema

Hacıosman Deresi (Havza) Su Toplanma Alanında Taşkın Riskinin CBS Tabanlı Morfometrik Analizi

Kağan CEBE*
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Kurupelit Kampüsü, Atakum, Samsun/TÜRKİYE,
0000-0003-1288-1362
kagan.cebe@omu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Havza, taşkın, morfometri, CBS, SYM.

1. Amaç

Samsun'un Havza ilçe merkezi ve yakın çevresi, coğrafi yapısı gereği geçmişte de yıkıcı taşkın olaylarına sahne olmuştur. Bunlardan en çarpıcı örneklerinden biri de 22 Mayıs 1998 Cuma günü meydana gelen ve can ve mal kayıplarına neden olan taşkın felaketidir [1]. Bu tarihsel arka plan, bölgenin hidrolojik açıdan riskli yapısını doğrulamaktadır.

Bölgenin afet potansiyeli literatürde çeşitli akademik çalışmalara da konu olmuştur. Aras [2] Havza Depresyonu'nda görülen doğal afetlerin nedenlerini, işleyişlerini, sonuçlarını ve CBS kullanılarak dağılışlarını çeşitli duyarlılık analiz yöntemleriyle ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında taşkın duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucu belirlenen ilçe merkezinden itibaren 600 m çaplı alanın %9,07'sinin taşkın duyarlılığının çok yüksek olduğu belirlenmiştir.

Nitekim, 12 Mayıs 2026 tarihindeki taşkın öncesinde ilçe merkezini boydan boya kat eden yaklaşık 900 metre uzunluğundaki ana kanal kesitinin üzerinin kapatılarak yol, konut ve ticari alanlarla işgal edilmesi, felaketin temel teknik nedeni olarak tespit edilmiştir. Olay öncesinde Hacıosman (Çayırözü) Deresi'nin memba kesiminde yatak temizliği gerçekleştirilmiş olmasına rağmen; kısa süreli ve yüksek şiddetli yağış neticesinde sürüklenen rüsubat, dal ve çeşitli materyallerin, üzeri kapatılmış kesitin başlangıç noktasında birikerek hidrolik akışı tamamen engellediği görülmüştür. Bu yapısal darboğaz neticesinde kapasitesini aşan taşkın suları mevcut güzergâhında ilerleyemeyerek şehir merkezine yönelmiş, düşük kotlu alanları su altında bırakmış ve Samsun-Ankara Karayolu üzerinden Tersakan Çayı havzasına kadar ulaşarak büyük bir yıkım tablosu oluşturmuştur [3].

Mevcut taşkın yönetimi ve hidrolojik modelleme pratiklerinde, geniş havzaları tek bir bütün olarak değerlendirmek yerine, taşkın debisine ve rüsubat taşınımına en büyük katkıyı sağlayan riskli alt havzaların spesifik olarak izole edilip incelenmesi modelleme kalitesini artırmaktadır. Bu bağlamda mevcut çalışma, genel havza analizlerinden farklılaşarak doğrudan güncel taşkına sebebiyet veren Hacıosman Deresi alt havzasına ve bu alanın spesifik morfometrik parametrelerine odaklanmasıyla literatüre bir katkı sunmaktadır.

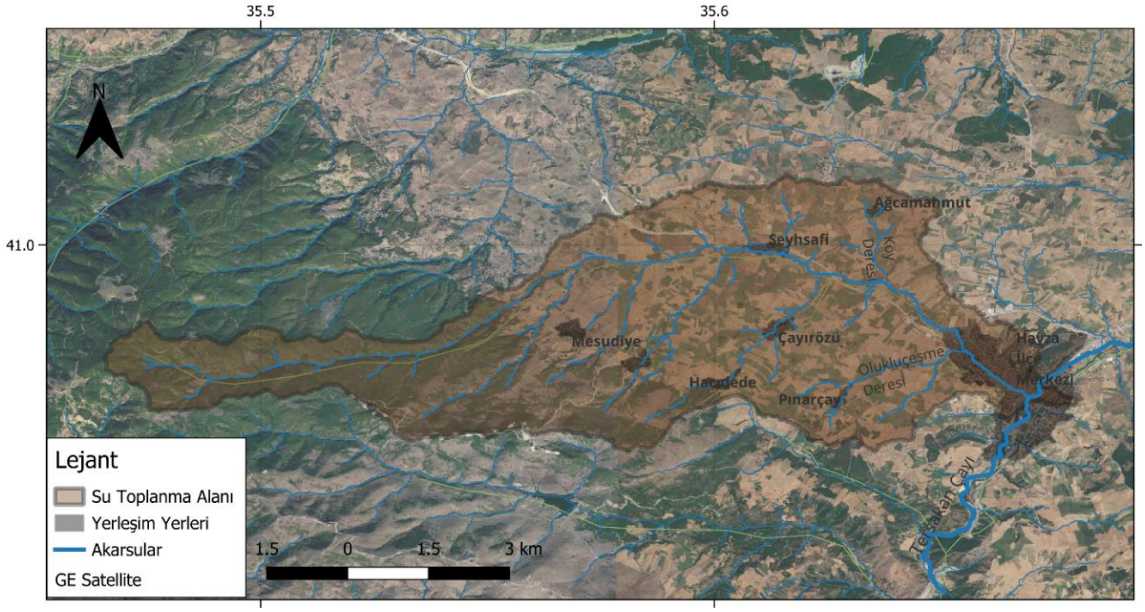
Çalışmanın temel amacı, 12 Mayıs 2026 tarihinde Samsun'un Havza ilçesinde meydana gelen ve ciddi ekonomik kayıplara yol açan taşkın felaketinin hidromorfolojik nedenlerini, Hacıosman Deresi su toplanma alanının morfometrik özellikleri üzerinden analiz etmektir. Taşkın olgusunun yalnızca doğal morfolojik süreçlerle değil, aynı zamanda mühendislik kriterlerine uymayan kentleşme pratikleriyle olan etkileşimi çalışmanın bir diğer önemli dayanağıdır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bölge

Taşkın olayının gerçekleştiği Samsun'un Havza ilçesi, Karadeniz Bölgesi ile İç Anadolu Bölgesi arasında bir geçiş kuşağında yer alır. İlçe merkezi, adını da bu yapısından aldığı gibi nispeten çukur bir havza formundadır ve ortalama rakımı 675 metredir. Kuzeyinde Tuzla Tepesi (854m) ve Güneyinde Yağbasan Tepesinin (852m) bulunduğu yüksek ve eğimli arazilerle çevrilidir. Bu yapı, yağışın dağlık yamaçlardan vadi tabanına doğru yüksek yüzey akış hızı ile ani bir şekilde inmesine zemin hazırlar.

Tersakan Çayı kuzeydoğu yönünden ilçe merkezine ulaşır. Çalışmamızın odak noktası olan Hacıosman (Çayırözü) Deresi (Şekil 1) ise Batıdaki yüksek kotlu ve dik yamaçlardan doğup ilçe merkezine inmektedir. Bu iki akarsu, Havza İlçe Merkezi'nin içerisinden geçerek birleşir ve Yeşilırmak havzasına bağlanır. Bu durum ilçe merkezindeki yerleşim yerleri için taşkın riskini arttırmaktadır.



Şekil 1. Havzanın coğrafi konumu, akarsular ve su toplanma alanını gösteren harita

Su toplanma alanı sınırları içerisine Havza ilçe merkezi de dahil olmak üzere 8 yerleşim yeri girmektedir. 2025 adrese dayalı nüfus sistemine göre Havza ilçe merkezi nüfusu 38103 kişidir. Mahalle statüsündeki diğer yerleşim yerleri ile birlikte su toplanma alanı sınırları içerisinde 39197 kişi yaşamaktadır [4].

2.2. Sayısal Yükseklik Modeli

Hacıosman Deresi su toplanma alanının morfometrik özellikleri hesaplanmadan önce havza sınırları, topografik eğim ve akarsu mecrasını belirlemek için veri işleme, alt havzalara (hidrolojik birimlere) bölme ve drenaj ağı üretimi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

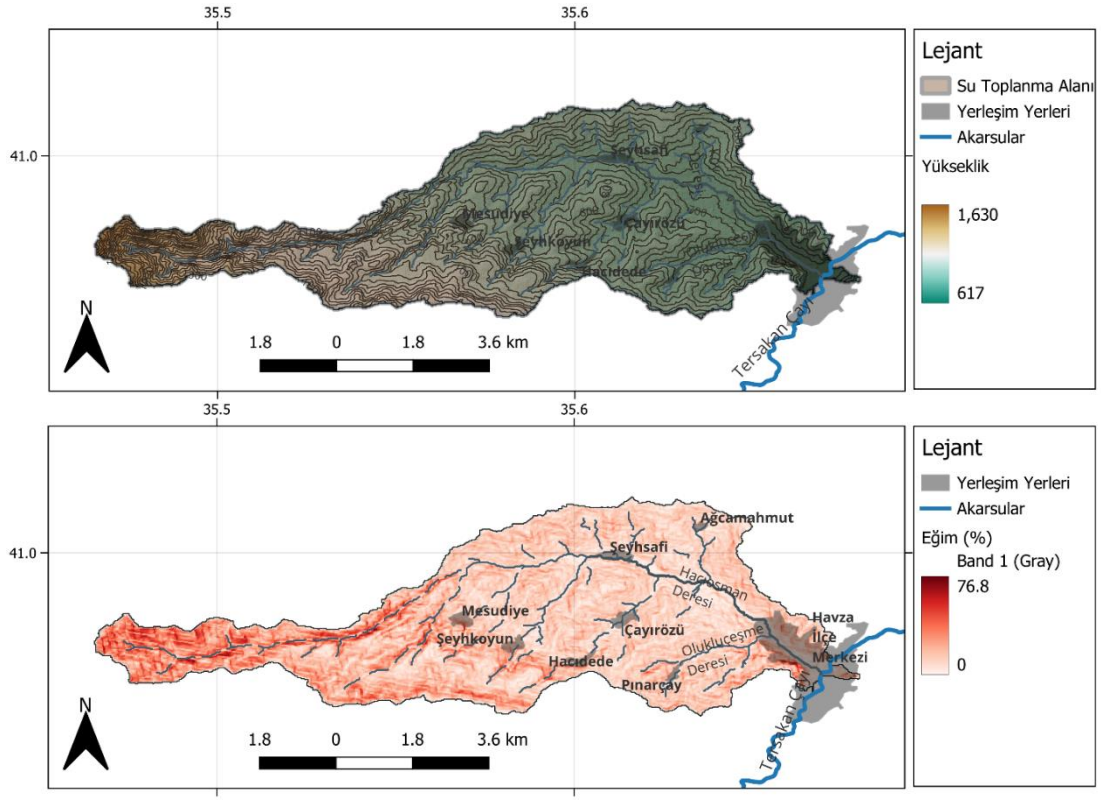
Topografik ve eğim haritalarının oluşturulmasında the Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) tarafından işlenen, eksik veri ve boşlukları ASTER Küresel Dijital Yükseklik Modeli (GDEM) Version 2 [5] kullanılarak tamamlanan, küresel 1 arc second (~30m) çözünürlükte NASA Shuttle Radar Topography Mission Global (SRTM) Version 3 [6] sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılmıştır.

SAGA GIS v.9.11.1 [7] kullanılarak sayısal yükseklik modelindeki (SYM) çukurlar doldurulmuş ve Hacıosman Deresi'ne ait havza sınırları belirlenmiştir. SYM, SAGA GIS ile elde edilen akarsu güzergahları ve su toplanma alanı sınırları ile QGIS ver. 3.44.11 görselleştirme araçları kullanılarak arazi yükseklik haritası ve arazi eğim haritaları (Şekil 2) oluşturulmuştur.

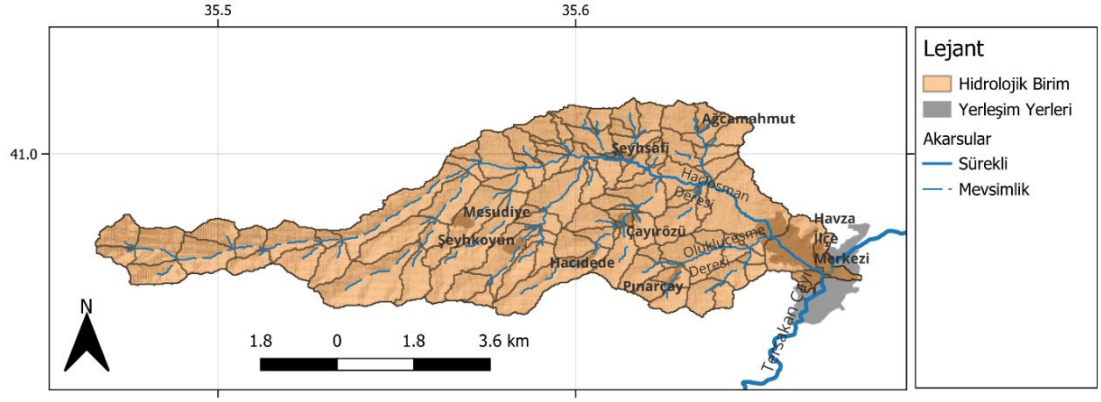
Yükseklik ve eğim haritası (Şekil 2) incelendiğinde Hacıosman Deresi'nin Tersakan Çayı'na bağlandığı noktada rakım 617 m su toplanma alanının en yüksek noktasında rakımın 1630m olduğu görülmektedir. Hacıosman deresinin Tersakan Çayına bağlandığı nokta ile su toplanma alanının en uzak noktası arasındaki mesafe 17,34km'dir. Su toplanma alanının yüksek olan Batı kısımlarının %76,8 eğime ulaşan dik arazilerden oluştuğu ve Doğuya yaklaştıkça arazi eğiminin azaldığı görülmektedir.

2.3. Alt Havzalar ve Drenaj Ağı

SAGA GIS v.9.11.1 [7] kullanılarak Dereyi oluşturan yüzeysel akış güzergahı, akarsu kolları ve bu kollara ait hidrolojik işlem birimleri üretilmiştir. Arazi eğimine göre akış yönü belirlendikten sonra, akış birikimi verileri üzerinden Strahler [8] yöntemine göre derecelendirilmiş drenaj ağı oluşturulmuştur. Son olarak, Hacıosman Deresi'nin ana kollarını temsil eden akarsu mecraları, hidrolojik birimlerin döküm (en çukur) noktaları esas alınarak otomatik olarak sınırlandırılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Arazi yükseklik (a) ve eğim (b) haritası



Şekil 3. Hacıosman Deresi mecrası ve su toplanma alanı

Bu çalışmaya göre Hacıosman Deresinin su toplanma alanı 61,54 km^2 bir alanı kaplamaktadır. Bu alan 97 farklı hidrolojik birime bölünmüş ve SYM'den elde edilen verilerle toplam 74,47 km uzunluğunda akarsu mecrası oluşturulmuştur.

2.4. Doğrusal Morfometrik Parametreler

Doğrusal morfometrik parametreler, drenaj ağının hiyerarşik yapısını, dallanma karmaşıklığını ve akarsu kollarının havza içindeki fiziksel özelliklerini tanımlayan parametrelerdir.

Akarsu Derecesi (Stream Order - S_u):

Akarsu derecesi, bir havzadaki drenaj ağının hiyerarşik yapısını, dallanma karmaşıklığını ve her bir akarsu kolunun sistem içindeki göreceli konumunu ifade eden temel bir sayısal ölçüttür [8]. Bir akarsu ağının çıkış noktasındaki derece (S_u) ne kadar yüksekse, o derenin su toplama havzası o kadar geniş ve kolludur. Bu da şiddetli yağışlarda ana yatağa taşınacak su hacminin ve pik debisinin yüksek olacağı anlamına gelir.

Akarsu Kol Sayısı (Stream Number - N_u):
Bir drenaj havzasında belirli bir akarsu derecesine (u) ait olan toplam akarsu parçası sayısını ifade eder. Horton [9], havzalardaki akarsu derecesi (u) ile o dereceye ait kol sayısı (N_u) arasında ters orantılı, geometrik bir ilişki olduğunu ispatlamıştır. Akarsu derecesi büyüdükçe yani, kollar birleşip ana kanala dönüştükçe, o dereceye ait kol sayısı sistematik olarak azalır. Bu azalış rastgele değildir. Kol sayılarının logaritması alınarak derecelere karşı grafiğe döküldüğünde negatif eğimli bir regresyon doğrusu elde edilir.

Toplam Akarsu Uzunluğu (Stream Lenth – ΣL_u) ve Ortalama Akarsu Uzunluğu (Stream Lenth - $\overline{L_u}$):
Toplam akarsu uzunluğu, drenaj havzasında belirli bir akarsu derecesine (u) ait olan kolların toplam uzunluğunu ifade eden temel morfometrik bir parametredir. Her dereceye ait toplam akarsu uzunluğu değerlerinin logaritması alınarak derecelere karşı grafiğe koyulduğunda akarsu kol sayısı doğrusuna benzer negatif eğimli bir regresyon doğrusu elde edilir.

Ortalama akarsu uzunluğu ise belirli bir dereceye ait kolların toplam uzunluğunun, o derecedeki kol sayısına (N_u) bölünmesiyle elde edilir (Eşitlik 1).

$$\overline{L_u} = \frac{\sum L_u}{N_u} \tag{1}$$

Bir havzadaki akarsu derecesi büyüdükçe ve kollar ana yatağa doğru birleştikçe, o dereceye ait akarsu kollarının ortalama uzunluğu geometrik bir dizi şeklinde artış gösterir.

Uzunluk Oranı (Length Ratio - R_L):
Uzunluk oranı (R_L) [10], Strahler yöntemine bağlı olarak belirli bir dizinin ortalama uzunluğunun bir sonraki dizinin ortalama uzunluğuna oranıdır (Eşitlik 2).

$$\overline{R_L} = \frac{\overline{L_u}}{\overline{L_{u-1}}} \tag{2}$$

Yüksek uzunluk oranı, suyun ana yatakta uzun bir mesafe kat ettiğini gösterir. Bu durum, suyun havza çıkışına varmasını geciktirir. Düşük uzunluk oranları, havzanın üst kısımlarındaki dik ve eğimli yamaçlardan inen suların, ana yatakta yeterince uzun bir mesafe kat edemeden havza çıkışına ulaştığına işaret eder [10].

Çatallanma Oranı (Bifurcation Ratio - R_b):
Havza morfometrisi çalışmalarında akarsu ağının geometrik yapısını, dallanma derecesini ve havzanın taşkın duyarlılığını anlamak için kullanılan en temel çizgisel göstergelerden biridir. Çatallanma oranı (R_b), belirli bir derecedeki akarsu kolu sayısının (N_u), bir üst derecedeki akarsu kolu sayısına (N_{u+1}) bölünmesiyle hesaplanır [11]:

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \tag{3}$$

Bir havzanın ortalama çatallanma oranı bulunurken, tüm dereceler arasındaki oranların aritmetik ortalaması alınır veya kol sayıları ile dereceler arasındaki ilişkinin logaritmik grafiğinden (regresyon doğrusunun eğiminden) yararlanılır [11].

Yüksek çatallanma oranı ($R_b > 5$), drenaj ağımım çok kollu, sık dallanmış yapıda olduğunu ve düşen yağışın çok sayıda yan kol vasıtasıyla ana yatağa son derece hızlı bir şekilde iletileceği anlamına gelir. Düşük çatallanma oranı ($R_b < 3$), havzanın daha uzamış bir geometriye sahip olduğuna işaret edebilir. Bu tür havzalarda suyun ana çıkış noktasına ulaşması zamana yayılır [12-14].

2.5. Alansal Morfometrik Parametreler

Alansal morfometrik parametreler, havzanın geometrik biçimini, yüzeyin akarsular tarafından parçalanma derecesini ve taşkın pikinin zamanlamasını modellemek için kullanılan parametrelerdir.
Drenaj Yoğunluğu (Drainage Density - D_d):

Bir havzanın ne ölçüde verimli ve sık bir akarsu ağıyla yarılmış olduğunu gösteren, havza morfolojisinin en temel parametrelerinden biridir [15]. Havzadaki tüm akarsu kollarının toplam uzunluğunun, havzanın toplam alanına oranıdır (Eşitlik 4).

$$D_d = \frac{\sum L_u}{A} \tag{4}$$

Yüksek drenaj yoğunluğu (D_d > 3), yağış sularının havza yüzeyinde uzun süre seyahat etmeden hemen bir akarsu kanalına ulaştığı anlamına gelmektedir. Bu durum hidrografta taşkın pikinin çok hızlı ve çok yüksek oluşmasına neden olur. Düşük drenaj yoğunluğu (D_d < 1) ise suyun bir kanala ulaşması için yüzeyde veya yer altında daha uzun süre yol alması gerektiğini gösterir [10].

Akarsu Sıklığı (Stream Frequency - F_s):
Havzanın topoğrafik ve jeolojik özelliklerini anlamak için kullanılan temel morfometrik parametrelerden biridir. Drenaj yoğunluğu birim alana düşen akarsu uzunluğunu ölçerken; Akarsu sıklığı birim alana düşen akarsu kolu sayısını ifade eder.

$$F_s = \frac{\sum N}{A} \tag{5}$$

Yüksek akarsu sıklığı, yüksek taşkın riski, düşük akarsu sıklığı ise düşük taşkın riski ile ilişkilendirilir [10, 14].

Şekil Faktörü (Form Faktor - F_f):
Havzanın geometrik şeklini matematiksel olarak ifade eden temel bir morfometrik parametredir [15]. Havzanın şekli, yağışın havza çıkışına ne kadar sürede ve ne yoğunlukta ulaşacağını belirlediği için taşkın analizlerinde hayati bir öneme sahiptir. Şekil faktörü, havza alanının (A), havzanın en uzun eksenine (L) bölünmesiyle elde edilir ve Eşitlik (6) ile ifade edilmektedir.

$$F_f = \frac{A}{L^2} \tag{6}$$

Şekil faktörü boyutsuz bir sayıdır ve genellikle 0 ile 1 arasında değerler alır. Tam bir daire için bu değer 0,785 civarındadır. Yüksek Şekil Faktörü (F_f > 0,5), havzanın geniş ve dairesel (yuvarlak) bir yapıda olduğunu gösterir. Düşük Şekil Faktörü (F_f < 0,3), havzanın dar ve uzun (dikdörtgenimsi/oval) bir yapıda olduğunu gösterir [12, 14, 16].

2.6. Rölyef Morfometrik Parametreler

Rölyef parametreler, Havzanın topoğrafik sarp yapısını, suyun potansiyel enerjisini, yüzeysel akış hızını ve yatak erozyonu taşıma gücünü ortaya koyan parametrelerdir.

Havza Rölyefi (Basin Relief - R):
Havzanın en yüksek noktası ile en düşük noktası (havzanın su çıkış noktası) arasındaki maksimum dikey yükseklik (kot) farkıdır [12, 14, 17].

Rölyef Oranı (Relief Ratio - R_r):
Havza Rölyefi (R) değerinin, havzanın en uzun eksenine (L) bölünmesiyle elde edilen (Eşitlik 7) boyutsuz bir parametredir [11].

$$R_r = \frac{R}{L} \tag{7}$$

Rölyef oranı, suyun havza yüzeyindeki toplanma süresi ve yüzeysel akış şiddeti hakkında fikir verir. Yüksek rölyef oranı (R_r < 0,03), dik yamaçlara ve sarp bir topoğrafyaya sahip havzaları gösterir. Bu tür havzalarda yağışlar yer altına sızmaya vakit bulamadan çok hızlı bir şekilde yüzeysel akışa geçer ve hızla akarsu yatağına yığılır. Düşük rölyef oranı (R_r < 0,01), düz, ova veya geniş plato karakterli havzalarda görülür. Yüzey akış hızı yavaştır. Yağan suyun toprağa sızması için yeterli zamanı vardır. Hidrolik tepki yavaş olduğu için taşkın dalgası gecikir ve hidrograf eğrisi çok daha yayvan ve düşük pikli oluşur [10, 13, 18].

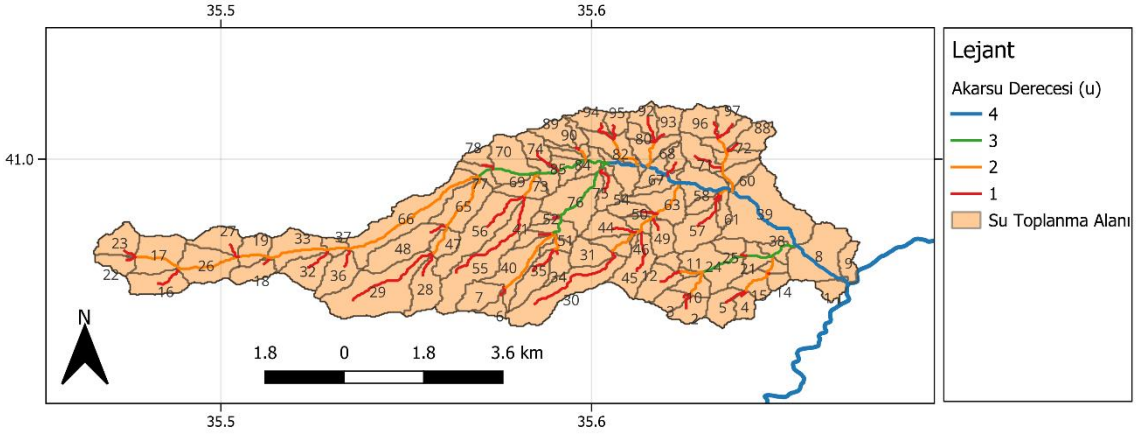
Engebelilik Değeri (Rudgeness Ratio - R_n):
Bir su havzasının topoğrafik sarp yapısını ve akarsu ağı tarafından ne kadar yoğun bir şekilde parçalandığını (yarıldığını) gösteren bir parametredir [19]. Havza rölyef değerinin (R - km), drenaj yoğunluğuyla (D_d – km^2) çarpımı (Eşitlik 8) olarak ifade edilir.

$$R_n = R \cdot D_d \tag{8}$$

Yüksek engebelilik değeri, topoğrafyanın sarp, dik ve akarsular tarafından yoğun bir şekilde yarılmış durumda olduğunu gösterir. Bu tür havzalarda yüzeysel akış çok hızlı gerçekleşir, yağış suları toprağa sızmaya fırsat bulamadan kısa sürede kanal ağına ulaşır. Düşük engebelilik değeri hem kot farkının az olduğunu hem de akarsu ağının nispeten seyrek olduğunu gösterir. Kot farkının az olması ve akarsu kanallarının seyrekliği, yağışın toprağa sızması için daha fazla zaman ve imkan tanır [13, 20].

3. Değerlendirme

Sayısal yükseklik modeli (SYM) ve SAGA GIS v.9.11.1 [7] kullanılarak Hacıosman Deresi ve onu besleyen yan kollarına ait mecra içerisinde yüzey alanı 0,03-3,09 km^2 aralığında değişen 97 adet 1. derece su toplanma alanı oluşturulmuştur. Her bir su toplanma alanının en düşük rakımlı noktasından başlayarak SYM'de en düşük rakımlı güzergahı takip eden Akarsu Derecesi (u) 1-4 arası değişen akarsu güzergahı da bu yazılım kullanılarak çizilmiştir.



Şekil 4. Hidrolojik birimler (su toplanma alanları) ve Hacıosman Deresi kolları dereceleri

SYM kullanılarak oluşturulan derecelendirilmiş drenaj ağı ve su toplanma alanının topografik verilerine göre morfometrik parametreler ile taşkın ile ilişkisi araştırılmıştır. Doğrusal morfometrik parametrelerin akarsu kollarının derecesine göre değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Hacıosman Deresi akarsu kollarının derecesine göre doğrusal morfometrik değerler

Akarsu Derecesi (Su)	Akarsu Kolu Sayısı (Nu)	Toplam Akarsu Uzunluğu (ΣLu)	Ortalama Akarsu Uzunluğu ($\overline{Lu}$)	Uzunluk Oranı (R_L)	Çatallanma Oranı (R_b)
1	49	31070,56	634,09	-	1,750
2	28	26613,92	950,50	1,499	2,545
3	11	8916,15	810,56	0,853	1,375
4	8	7867,65	983,46	1,213	-
TOPLAM	96	74468,28	ORTALAMA	1,188	1,890

Tablo 1'de hesaplanan çatallanma oranı (R_b = 1,890), doğal ve jeolojik dış müdahaleye fazla maruz kalmamış standart havzalarda göre oldukça düşük kalmaktadır. Bu durum, yüzeysel akışın çok fazla kollara ayrılmadan ve yapısal engellere takılmadan ilerleyerek hızlıca ana kanala ulaştığını gösterir.

Horton'a [9] göre, ideal ve litolojik olarak homojen bir su havzasında, akarsu dereceleri büyüdükçe bu kolların ortalama uzunluklarının da artması gerekir. Hacıosman Deresi 3. derece kolların ortalama uzunluğunun (810,56 m), 2. derece kollardan (950,50 m) daha kısa olması doğal akış yasalarından bir

sapmadır. Bu durum, hidrografta suyun toplanma süresini, 3. Derece drenaj hattının bulunduğu Şeyhsafi köyü yakınlarında aniden hızlandıracak bir darboğaz etkisi yaratmaktadır. 3. derece kolların bulunduğu bölgenin hemen öncesinde dik yamaçların başlaması, akarsuyun yatayda uzun bir mesafe kat edemeden hızlıca akmasına neden olmaktadır. Ayrıca su toplanma alanının daralan geometrisi söz konusu darboğaz etkisini daha da arttırmaktadır.

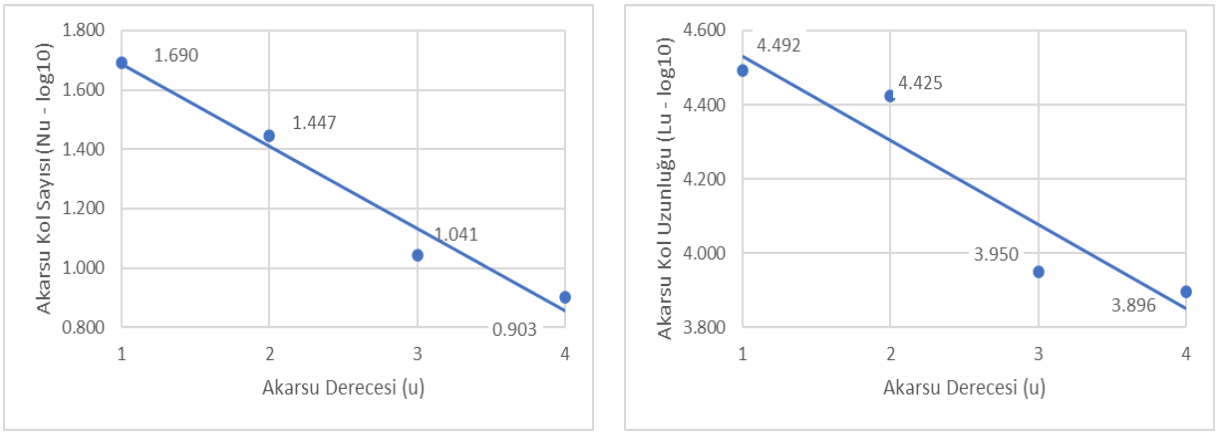
Havzanın biçimini ve suyun yüzeyde dallanma derecesini, dolayısıyla taşkın pikinin gecikmesi veya eşzamanlı yığılmasını modellemek için kullanılan alansal parametreler ile akarsuyun potansiyel enerjisini, akış hızını ve rüsubat taşıma gücünü ortaya koymak için kullanılan rölyef parametreleri de hesaplanmıştır. SYM kullanılarak oluşturulan havzanın geometrik yapısına ve drenaj ağının özelliklerine ve drenaj ağına bağlı alansal ve rölyef morfometrik parametrelerin değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Hacıosman Deresi Morfometrik Değerleri

Drenaj Yoğunluğu (D_d)	Akarsu Sıklığı (F_s)	Şekil Faktörü (F_f)	Havza Rölyefi (R)	Rölyef Oranı (R_r)
1,21	1,56	0,205	1013	0,06

Tablo 2'de verilen şekil faktörünün (F_f = 0,205), 0.3'den küçük olması, su toplanma alanının oldukça ince ve uzun yapıda olduğunu desteklemektedir. Bu yapıdaki havzalarda, yağış ile oluşan yüzeysel akış, çıkış noktasına aynı anda yığılmaz. Uzun eksen boyunca suların toplanıp ana kanala inmesi zaman alacağından, taşkın piki yayvanlaşır ve gecikir. Benzer şekilde Tablo 2'de verilen drenaj yoğunluğunun (D_d = 1,210) ortalama değerlerde bulunması, yüzeyin çok sık kılcal derelerle parçalanmadığını, suyun toprağa sızması için havzada belirli bir potansiyel olduğunu göstermektedir. Bu iki durum ani taşkın riskini azaltan bir etki yaratmaktadır.

Tablo 2'de verilen rölyef oranının (R_r = 0.06) literatür eşik değeri 0,03'den büyük olması, su toplanma alanının oldukça sarp ve yüksek eğimli bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Bu eğim, havza dar ve uzun olsa bile, suyun kinetik enerjisini ve akış hızını dramatik şekilde artırır. Bu tür akarsuların erozyon gücü ve partikül taşıma kapasitesi çok yüksektir. Akarsu kol sayılarının ve toplam kol uzunluğunun logaritması alınarak akarsu derecesine göre grafiğe döküldüğünde ortaya çıkan negatif eğimli bir regresyon doğrusu ise Şekil 5a) ve Şekil 5b)'de sunulmaktadır.



Şekil 5. a) Akarsu kol sayısı ($log_{10}Nu$) ile akarsu derecesi (u) ilişkisi, b) Akarsu kol uzunluğu ($log_{10}\Sigma Lu$) ile akarsu derecesi (u) ilişkisi

Şekil 5a)'da gösterilen akarsu kol sayısı ile akarsu derecesi ilişkisi grafiğinde bulunan regresyon doğrusu, akarsu sayılarının, derece arttıkça geometrik bir dizi halinde azaldığını kanıtlamaktadır. İdeal ve litolojik olarak homojen bir havzada, grafikteki tüm noktalarının tam olarak regresyon çizgisi üzerine oturması beklenir. Şekil 5a)'da ise 2. derece ile 3. derece arasındaki düşüşün doğrunun eğiminden biraz daha dik olduğu ve 3. derece noktasının regresyon çizgisinin biraz altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, 3. derece akarsuların sayısının o alt havza bölgesinde teorik olarak beklenenden biraz daha az

olduğunu ve suların, daralan vadi yapısı ve değişen eğim nedeniyle hızlıca birleştiğini görsel olarak desteklemektedir.

Şekil 5b)'de gösterilen toplam akarsu uzunluğu ile akarsu derecesi ilişkisi grafiğinde bulunan regresyon doğrusu, akarsu uzunluğunun, derece arttıkça geometrik bir dizi halinde azaldığını kanıtlamaktadır. Grafikte 1. ve 2. derece kolların toplam uzunlukları doğrusal regresyon doğrusunun biraz üzerinde konumlanırken, 3. derece kollara ait toplam uzunluk belirgin şekilde regresyon doğrusunun altına düşüyor. Bu durum, 3. derece kolların toplam uzunlukça diğer derecedeki kollardan kısa kaldığını göstermektedir. Bu durum 3. derece drenaj hattının bulunduğu Şeyhsafi köyü yakınlarında oluşan darboğaz etkisini destekleyen bir bulgudur.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Samsun'un Havza ilçe merkezinden geçen Hacıosman Deresinin su toplanma alanının morfometrik özellikleri analiz edilerek derenin mansap bölgesinin taşkın duyarlılığı araştırılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre, su toplanma alanının düşük şekil faktörü (F_f = 0,205) ince-uzun bir geometriye işaret ederken, yüksek rölyef oranı (R_r = 0,06) sistemin sarp ve yüksek eğimli bir topoğrafyaya sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu iki parametrenin eşzamanlı etkisi, yüzeysel akışın kinetik enerjisinin ve akış hızının yüksek olduğunu göstermektedir. Sarp eğim faktörü, su toplanma alanına düşen yağışın sızmaya fırsat bulamadan mansaba doğru hızla ilerlemesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, havzanın dar ve uzun yapısı ise taşkının tek bir ani şok dalgası şeklinde değil, taşkın pikinin ötelenmesiyle birlikte daha uzun bir zaman dilimine yayılan, ardışık dalgalar halinde ulaşmasına yol açmaktadır.

Havzadaki akarsu ağının düşük çatallanma oranı (R_b = 1,890), su kütlesinin yapısal engellere takılmadan ve kollara fazla ayrılmadan direkt bir deşarj rotası izlediğini doğrulamaktadır. Çalışmadaki en dikkat çekici bulgulardan biri ise, Horton'un Akarsu Uzunlukları Kuralından belirgin bir sapma gösteren 3. derece kolların toplam uzunluğunun azalmasıdır (R_L = 0,853). Bu yapısal anomali bölgeleri, topografik veya litolojik kontrollerin etkisiyle suyun hızla birleştiği hidrolik darboğazlar yaratmaktadır. Hacıosman Deresinin 3. Derecedeki kolu ise Şeyhsafi Köyü yakınlarında başlamaktadır. Köyden itibaren ana kanal Tersakan Çayına bağlandığı noktaya kadar 4. Derece olarak ilerlemektedir. Taşkın olayının yaşandığı alan ise Havza şehir merkezinde ana kanalın kesitinin üzerinin kapatıldığı bölgeye denk düşmektedir. Bu durum, tüm yüzeysel akışın birleştiği ana kanalı sınırlandıran yapay bir engel oluşturmuş; memba kısmından sürüklenen rüsubatın, üzeri kapatılmış kesitin girişinde birikip hidrolik kapasiteyi aşmasıyla taşkın olayı tetiklenmiştir. Elde edilen bu bilgiler ışığında, Hacıosman Deresi havzasının suyu ve rüsubatı hızla mansaba ileten yapısı dikkate alınarak, ana kanal üzerindeki yapay engellerin kaldırılması ve bölge için bütüncül bir hidrolik modelleme çalışması yapılması gereklidir.

Bu çalışma, su toplanma alanının doğal morfolojisinin ürettiği yüksek akış potansiyelinin, mansaptaki kentleşme baskısı ve hatalı müdahalelerle birleştiğinde taşkın afetini nasıl kaçınılmaz kıldığını somut olarak ortaya koymakta; havza bazlı entegre taşkın yönetiminin önemini vurgulamaktadır. SAGA GIS gibi CBS yazılımlarından elde edilen ham verilerin bu şekilde doğru işlenmesi ve anlamlandırılması, hidrolojik davranışın hayati önem taşıdığı taşkın duyarlılık çalışmalarında oldukça sağlam bir temel oluşturmaktadır

5. Kaynaklar

[1] Zeybek, İ. (2014). 22 Mayıs 1998 Havza Sel-Taşkın Felaketi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi. 11(1): p. 160–167.

[2] Aras, Ö. (2021). Havza (Samsun) depresyonu'nda doğal afet risk analizi: Ondokuz Mayıs Universitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

[3] İMO. (2026). Samsun'un Havza İlçesinde Yaşanan Sel Felaketi ile İlgili Basın Açıklaması, İnşaat Mühendisleri Odası Samsun Şubesi. p. 1.

[4] TUİK (2025). 2025 yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, in Türkiye İstatistik Kurumu, T.İ. Kurumu, Editor.

[5] Abrams, M., R. Crippen, and H. Fujisada. (2020). ASTER global digital elevation model (GDEM) and ASTER global water body dataset (ASTWBD). Remote Sensing. 12(7): p. 1156.

[6] Farr, T.G., et al. (2007). The shuttle radar topography mission. Reviews of geophysics. 45(2).

[7] Conrad, O., et al. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geosci. Model Dev. 8(7): p. 1991–2007.

[8] Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Eos, Transactions American Geophysical Union. 38(6): p. 913–920.

[9] Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin. 56(3): p. 275–370.

[10] Patton, P.C. and V.R. Baker. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. Water Resources Research. 12(5): p. 941–952.

[11] Schumm, S.A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological society of America bulletin. 67(5): p. 597–646.

[12] Dutal, H. (2023). Using morphometric analysis for assessment of flash flood susceptibility in the Mediterranean region of Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. 195(5): p. 582.

[13] Özdemir, H. (2011). Havza Morfometrisi ve Taşkınlar, Fiziki Coğrafya Araştırmaları; Sistematik ve Bölgesel (s. 457-474). İstanbul: Türk Coğrafya Kurumu Yayınları.

[14] Ekinci, D. (2011). Fiziki coğrafya araştırmaları: sistematik ve bölgesel. Türk Coğrafya Kurumu.

[15] Horton, R.E. (1932). Drainage-basin characteristics. Eos, Transactions American Geophysical Union. 13(1): p. 350–361.

[16] Bayazıt, M. (2003). Hidroloji. İstanbul: Birsen Yay.

[17] Hadley, R. and S.A. Schumm. (1961). Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River basin. US geological survey water-supply paper. 1531: p. 198.

[18] Şen, Z. (2009). Taşkın afet ve modern hesaplama yöntemleri. Su Vakfı.

[19] Strahler, A.N. (1956). Quantitative slope analysis. Geological Society of America Bulletin. 67(5): p. 571–596.

[20] Melton, M.A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology

Baraj Hidrolik Yapılarının Tasarımında HAD Analizlerinin Katkıları ve DSİ Pratiğinde Sağladığı Esneklikler

Seçkin AYDIN*
DSİ Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Ankara, 0000-0002-5731-6909
seckinaydin@dsi.gov.tr

Mehmet Cihan AYDIN
Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Böl., Merkez, Bitlis, 0000-0002-5477-1033
mcaydin@beu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: baraj hidroliği, HAD, dolusavak, havalandırıcı, tasarım

1. Amaç

Hidrolik yapıların projelendirme aşamasında yapının hidrolik açıdan gerçek davranışını tam olarak anlayabilmek, yapının hızlı doğru ve ekonomik projelendirilebilmesi için oldukça önemlidir. Bu durum yüksek debilerin yer aldığı baraj dolusavaklarında daha da önem kazanır. Yapının gerçeğe yakın davranışı fiziksel model deneyleriyle benzeştirilerek daha doğru projelendirmeler yapılabilir. Ülkemizde ve dünyada yaygın olan da proje hazırlandıktan sonra model deneylerinin yapılması ve bu doğrultuda projede gerekiyorsa sonradan revizyonların yapılması yönündeki bir uygulamadır. Bununla beraber model deneylerinin yapılması zaman alıcı ve bazı durumlarda ekonomik olmayabilir. Bu nedenlerle son zamanlarda tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de Baraj hidrolik yapılarının tasarımı aşamasında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tekniklerinin kullanımı artmıştır.

Bu çalışmada Türkiye de DSİ tarafından çeşitli dönemlerde projelendirilirken HAD tekniklerinin tasarıma dâhil edildiği bazı projelerden ve bu tekniklerin tasarıma getirdiği esnekliklerden bahsedilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

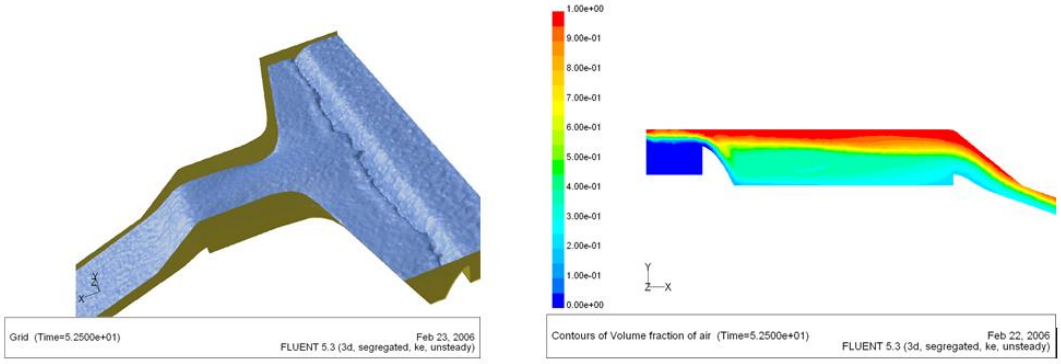
2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (HAD) Analizleri

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) akışkan akımlarının temel denklemlerini bilgisayar yardımıyla çözmekte kullanılan bir tekniktir. Baraj dolusavakları üzerindeki akımlar açık kanal akımlarıdır. Serbest yüzeyli akımların çift fazlı olarak ele alınması, serbest yüzeyin alacağı şeklin belirlenmesi ve zamana bağlı değişmesi ve serbest yüzeyin sabit bir sınır olarak alınamaması, türbülans etkileri, cidar pürüzlülükleri gibi etmenlerbu tür problemlerin sayısal modellenmesini zorlaştıran etmenlerin başında gelir[1]. HAD analizleri, çok fazlı akımların modellenebilmesi için Dispersed Phase Model (DPM), Volume of Fluid Model (VOF), Algebraic Slip Mixture Model (ASMM) ve Cavitation Model gibi seçenekleri mevcuttur. Ancak son zamanlarda bu modellerin birkaçının özelliğini birleştiren hibrid modeller de kullanılmaya başlanmıştır. Analizlerde kullanılacak modeller seçilirken diğer tüm mühendislik analizlerinde olduğu gibi problemde ön plana çıkan parametreler dikkate alınır. Örneğin su yüzü profillerinin öncelikli olduğu tasarımlarda VOF model daha hassas su yüzü profili verdiği için tercih edilir. Ancak hava su karışımının önemli olduğu akımlarda ise farklı Euler-Euler karışım modelleri tercih edilebilmektedir.

2.1.1 Tasarım aşamasında HAD analizleri ile değerlendirilen barajlar

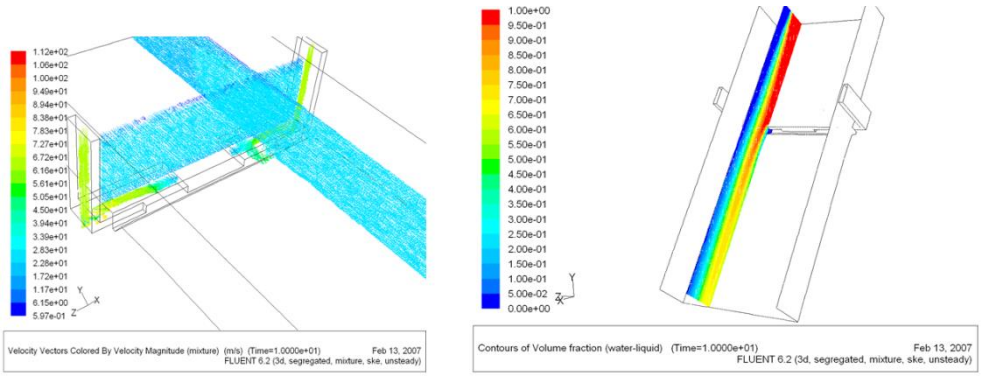
Baraj dolusavaklarının hidrolik performansının HAD analizleri ile değerlendirilmesi ülkemizde ilk defa Foz Do Areia barajının dolusavak prototip ölçümleri ile HAD sonuçlarının karşılaştırıldığı 1.Ulusal Barajlar kongresinde yapılan çalışma ile gündeme gelmiştir [2]. Bu çalışma ile HAD analizlerinin avantajları ve tasarıma getireceği esneklikler ile tasarım ekonomisine sağlayacağı katkıya dikkat çekilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların dikkat çekici düzeyde verimli olması ile DSİ bünyesinde hazırlanan projelendirme çalışmaları içerisinde HAD analizleri ile tasarım değerlendirme süreci ilk olarak 2005 yılı içerisinde Kars Barajı dolusavak yapısının yandan alışlı teknesinin analizleri ile başlamıştır [3]. Bu analizlerde 120 m uzunluğundaki tekne 365 645 tedrahedral elemana bölünmüş ve 2465 m^3/s debide ASM (Algebraic Slip Mixture) model ve k-ε türbülans modeli ile FLUENT yazılımı kullanılarak analizler tamamlanmış akabinde model deneyleri yapılmamıştır. Bu dönem içerisinde inşaatı devam etmekte olan

Muğla Akgedik Barajında karşıdan alışlı “T” tipi dolusavak olarak adlandırılan özel bir yapıya sahip olan ve model deneyleri yapılan dolusavak yapısı için CFD analizleri yapılmış ve analizlerle model deneyleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda CFD analizlerinin oldukça hızlı ve değerli veriler üretebildiği görülmüştür. Bu analizde de sayısal model 554 840 tedrahedral elemana ayrılmış ASM (Algebraic Slip Mixture) model ve *k-ε* türbülans modeli ile FLUENT yazılımı kullanılarak analizler tamamlanmıştır (Şekil 1.) [4].



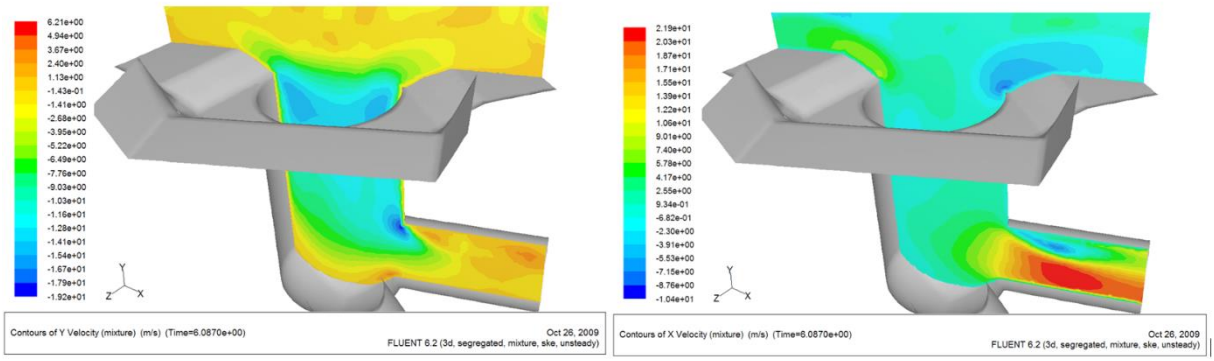
Şekil 1. Muğla Akgedik Barajı maksimum kesitte ve genel su yüzü profili görümü [4]

Dolusavak yapıları üzerinde bulunan havalandırıcı performanslarının belirlenmesinde saha uygulamasına dönük ilk sayısal çalışma, Aydın ili merkezinde projelendirilen Oyuk Barajı dolusavak havalandırıcısı olmuştur. Yapılan HAD analiz sonuçlarına göre özellikle düşük debi değerlerinde (<265 m^3/s) sayısal analiz yönteminin haricindeki ampirik formüllerle verilen ve klasik havalandırıcı yaklaşımlarıyla elde edilen formüllerin kullanım sınırı aşılması nedeniyle anlamsız sonuçlar verdiği belirlenmiş; tasarlanan havalandırıcının olması gereken hava karışım oranından (%7~9) oldukça fazla hava karışımı sağladığı (%33~35) tespit edilerek tasarım, nümerik analiz sonuçları doğrultusunda revize edilmiştir. Bu analizlerde ASM (Algebraic Slip Mixture) modeli ve hava karışım olayında türbülansın etkisini dikkate almak için k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Model 485 505 tetrahedral hücreye ayrılarak FLUENT yazılımı ile analizler yapılmıştır [5]. Bu çalışmalar, HAD analizlerinin baraj hidrolik yapılarında oldukça pratik ve verimli olduğu gerçeğini ortaya koymuştur (Şekil 2).



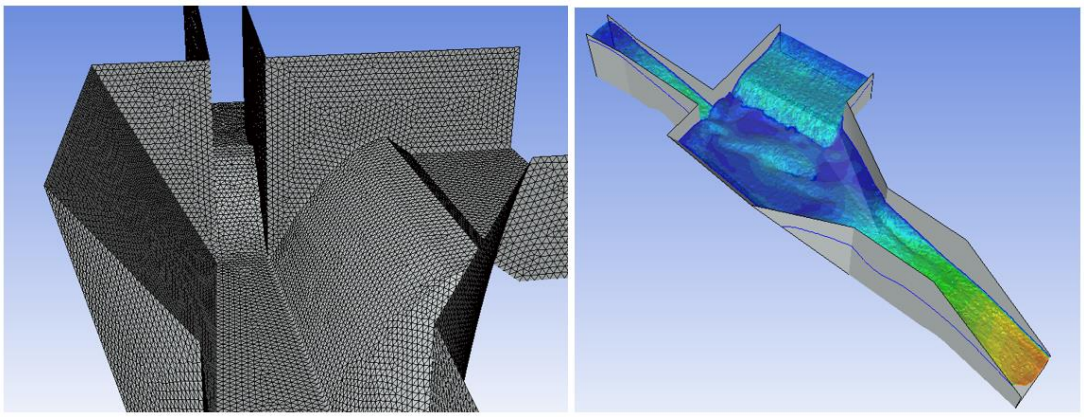
Şekil 2. Aydın Oyuk Barajı 530 m^3/s için baca kesitinde hız vektörleri ve jetin görünümü [5]

2009’li yıllarda Kağızman ilçe sınırları içerisinde bulunan Sefaköy Barajı masaya yatırılmıştır. Bu barajda ekonomik nedenlerden dolayı kuyu tipi bir dolusavak projelendirilmiş olup kapasite 2090 m^3/s lik debi için HAD analizleri yapılmıştır (Şekil 3). Modelin çözümlenmesi aşamasında su yüzünün net görünümünü elde edebilmek için VOF (Volume Of Fluid) model kullanılmış ve türbülans etkilerini modellemek için ise *k-ε* standart türbülans modeli seçilmiştir. Model bilgisayar kapasitesi ve hesap süresi dikkate alınarak 366 135 tetrahedral elemana ayrılmış ve FLUENT yazılımı kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizler sonrasında mevcut tasarımın çok ciddi sorunları tespit edilmiş ve HAD sonuçları doğrultusunda tasarım hızlı şekilde revize edilebilmiştir [6].



Şekil 3. Sefaköy Barajı şaft dolusavak 1270 m^3/s için x ve y doğrultusu hız konturları [6]

Gene aynı şekilde 2008 yılında tasarlanan Hatay Büyük Karaçay Barajında dolusavak klasik yandan alışlı bir tekne olarak tasarlanmış, ilave olarak aynı tekneye su verebilen radyal bir kapak ilave edildiği için tasarım kompleks bir hale gelmiştir. Söz konusu tasarım için model deneyleri yapılmış bu deney sonuçlarına göre tasarımda ciddi değişikliklere gidilmiştir. Bu süreçte bu dolusavak için HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve model deneyi ile tespit edilen aksaklıklar başarılı bir şekilde HAD analizi ile de tespit edilebilmiştir. Bu çalışmada da analizde çok fazlı akım modeli VOF (Volume Of Fluid), "Open channel flow" seçeneğiyle birlikte kullanılmış ve türbülans modeli olarak da "k-epsilon" ve "RSM (Reynolds Stress Model)" tercih edilmiştir. Sayısal model yaklaşık 1.050.000 tetra-hibrit üç boyutlu sonlu elamana bölünerek ANSYS-FLUENT yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4) [7].



Şekil 4. Büyük Karaçay Barajı sayısal modeli ve 1076 m^3/s için su yüzü profili [7]

İlerleyen süreç içerisinde DSİ pratiğinde HAD analizleri baraj hidrolik yapılarının performans değerlendirmesinde daha belirgin rol oynamaya başlamış ve bu süreçte hidrolik yapılar haricinde rezervuar heyelanları da HAD analizleri ile değerlendirilmeye başlanmıştır. Özelikle 2013 ve 2015 yıllarında Andıraz Barajı ve Tersun Barajları göl alanları rezervuar heyelanları başarılı şekilde HAD analizleri ile modellenebilmiştir [8], [9]. 2016 sonrasında DSİ de su yapıları tasarımlarında sayısal model kullanımı hız kazanmaya başlamış ve özellikle DSİ TAKK Hidrolik Laboratuvarında 727 m3/s kapasiteye sahip Turhal Barajı labirent dolusavağı, 190 m3/s kapasiteli Kale Barajı kuyu tipi dolusavağı, 4580 m3/s kapasitede Karakurt Barajı, 1562 m3/s Sivan Barajı dolusavakları ve Yusufeli Barajı enerji kırıcı havuz ve dolusavakları ve Melen Barajı dolusavağı v.b. birçok proje deneysel modeller yanında yapı sayısal olarak da modellenerek hızlı ve etkili tasarım değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

3. Değerlendirme

Su yapılarının tasarımı aşamasında yapının hidrolik açıdan gerçek davranışını belirlemek emniyetli ve ekonomik bir tasarım için oldukça hayati bir önem taşımaktadır. Ancak mühendislik problemleri içerisinde su yapılarının tasarımında her zaman hidrolik çözümleme sağlıklı olarak gerçekleşemez. Bunun başlıca nedenleri olarak; yapının düşeyde veya yatayda hidrolik belirsizliklere neden olacak düzensizliklere sahip olması, hava ile karışmış iki fazlı yüksek hızlı akımının etkisi, lokal düzensizlikler,

köprü ayakları, eğri yüzeyli duvarlar vb. birçok tasarıma girmek zorunda olan unsurlar yapının hidrolik çözümlenmesini karmaşık hale getirecektir. Özellikle Barajların dolusavaklarında bu belirsizlikler yüksek hızlı akımlar nedeniyle daha da belirginleşir. Bilgisayar teknolojisinin getirdiği üstünlüklerle beraber tasarıma hız kazandırması model deneylerinin aksine tasarıma paralel olarak yürütülmesi gibi nedenlerden ötürü HAD analizleri tasarımcılar tarafından model deneylerine tercih edilmektedir. HAD modelleri ile hidrolik bir yapının bir bölümünün tasarımı yapılabildiği gibi mevcut bir bölümünün performansı da oldukça başarılı bir şekilde değerlendirilebilmektedir [4]. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile laboratuvar ortamında yapılan birçok deney ve modeller bilgisayar ortamında başarı ile çözülmekte ve tasarım aşamasında çok büyük hız ve esneklik sağlayabilmektedir. Akışkanlar Mekaniği çalışmalarında kullanılan sayısal analiz yöntemleri dolusavak tasarımında performansın model deneylerini beklemeden tasarım aşamasında tasarıma paralel hızlı bir şekilde değerlendirilmesine ve tatmin edici sonuçlar alınabilmesine olanak sağlar. Bu noktada DSİ gerek baraj hidrolik yapıları, gerek rezervuar heyelanları, gerek taşkın alanları v.b. problemlerde geleneksel fiziksel modellemelerin yanı sıra kritik kararların alınmasında, HAD analizlerini akış davranışlarını detaylıca modellemek ve olası riskleri öngörerek hidrolik yapıyı optimize etmek amacıyla standart analiz süreçlerine entegre etmektedir.

4. Sonuçlar

Yukarıdaki örneklerden anlaşılacağı üzere, baraj hidrolik yapılarına ait deneysel model verileri, sayısal analizler yardımıyla oldukça yüksek oranda benzeşim (simülasyon) yapılabilmekte, bu sayede model deneyi yapılması zor olan zaman kısıtlı durumlarda doğrudan sayısal analizlerle tasarımlar başarı ile değerlendirilebilmektedir. Zikredilen örnek projelerde yapılan çalışmalarda HAD analizleri tasarımların hızlı şekilde değerlendirilmesini sağlamış ve söz konusu projelerin bazılarında ciddi ekonomik kazanımlar gerçekleşmiştir. HAD analizleri, söz konusu projelerde maliyet optimizasyonunun ötesinde, yapının yüksek debi koşullarında güvenli, fonksiyonel ve sürdürülebilir bir performans sergileyecek şekilde tasarlanmasını sağlamıştır. Barajlar gibi büyük su yapılarının her biri kendine özgü karakteristiklere sahip birer prototip olduğundan, bu tür yapıların geleneksel mühendislik tasarımlarının yanı sıra fiziksel benzeşim modelleriyle incelenmesi bugüne kadar elzem olmuştur. Ancak yürütülen fiziksel model deneylerinin oldukça zahmetli, zaman alıcı ve maliyetli olduğu düşünüldüğünde çağımızın gerektirdiği yüksek başarımlı simülasyon tekniklerinin bu tür projelerde kullanımı artık mümkün olabilmektedir. Özellikle türbülanslı akışlar gibi karmaşık akışkanlar mekaniği problemlerinin ve sayısal modellerin oluşturduğu kabuller ve belirsizlikler bu tür sayısal modellemeleri oldukça zorlaştırsa da günümüze uzanan çok sayıdaki çalışma sayısal modellemelerin hatırı sayılır bir gelişme gösterdiğini işaret etmektedir. Bilimsel ve teknik bir altyapıya sahip olması, gerçek fiziksel modellere kıyasla daha pratik, esnek ve ekonomik sonuçlar sunması gibi avantajları, son zamanlarda akademinin yanı sıra uygulamacıların da dikkatini çekmeyi başarmıştır. Bununla birlikte bu tür sayısal modellerin dikkatli kullanılması gerekmektedir. Elde edilen sonuçların kullanan kişinin bilimsel yeterliliğinin yanında sayısal ağ yapısı, seçilen türbülans ve ayrıklaştırma modellerine karşı duyarlılıkları gibi pek çok hususa dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle sayısal modelleri gerçeğe yakın fiziksel sonuçlar verdiğine emin olmak için kapsamlı hata analizlerinden geçirilmesi gerekir. Bu aşamada, deneysel çalışmalardan elde edilen fiziksel ölçüm sonuçlarının sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılması gerekliliği, fiziksel modellerin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Ön proje aşamasında literatürde geçerliliği kanıtlanmış sayısal modelleme tekniklerinin tercih edilmesi; kesin proje aşamasında ise sayısal hatalardan arındırılmış ve fiziksel model deneyleriyle yeterince doğrulanmış Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modellerinin kullanılması uygun bir yaklaşım olacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Aydın, M. C. (2005). Alttan alışlı dolusavak havalandırıcıların HAD analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 141s

[2] Aydın, M. C., Aydın, S. (2004). Dolusavak şut kanalları üzerindeki havalandırıcı performanslarının CFD modelleri ile değerlendirilmesi, I. Ulusal Barajlar ve Hidroelektrik Santraller kongresi, DSİ Genel Müdürlüğü, Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Ankara.

[3] Aydın, M. C., Aydın, S. (2005). Kars Barajı Yandan Alışlı Dolusavak Teknesinde 3D Analiz Uygulaması, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu 21–24 Eylül 2005 Gümüldür/İzmir, s:599–610.

[4] Aydın, S, Aydın, M.C, (2007). Dolusavaklarda Hidrolik Karakteristiklerin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi Fırat Ünv. Fen ve Mühendislik Bil. Dergisi 18(4),521-533,2006

[5] Aydın, S, Aydın, M.C, (2007). Oyuk Barajı Dolusavak Havalandırıcısı Tasarımının Sayısal Analiz Yardımı ile Değerlendirilmesi III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu 10–14 Eylül 2007 Gümüldür/İzmir, s:599–610.

[6] Aydın, S. “Sefaköy Barajı Dolusavağı CFD Analizi Raporu”, 2009, Ankara

[7] Aydın, M.C, Aydın, S (2014) Büyük Karaçay Barajı Dolusavağının CFD Analizi ile Değerlendirilmesi, 4.UBGS, Fırat Üniversitesi,Elazığ, s:651-664

[8] Andıraz Barajı Rezervuar Heyelanları Raporu, DSİ,2013

[9] Tersun Barajı Rezervuar Heyelanları Raporu, DSİ,2013

[10] FLUENT Inc., 2005. Fluent version 6.2

Sinop Kıyılarında İklim Değişikliğinin Modellenmesi

Asu İNAN*
Gazi Üniversitesi Deniz ve Su Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 0000-00003-2569-2456
asuinan@gazi.edu.tr

Mehmet Berkay GÜNDOĞDU
Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 0009-0005-0962-640X
26830801036@gazi.edu.tr

Anahtar Kelimeler: iklim değişikliği, Karadeniz, Sinop, su seviyesi değişimi, Hydrotam-3D

1. Amaç

Türkiye denizlerinde yapılan çalışmalar, son yıllarda deniz suyu sıcaklıklarında belirgin artışlar meydana geldiğini ve en yüksek sıcaklık artışlarının Karadeniz'de gözlendiğini ortaya koymaktadır [1]. Orta Karadeniz özelinde yapılan bir çalışmada ise Sinop istasyonunda gelecek dönem için deniz suyu sıcaklıklarında SSP2-4.5 senaryosunda yaklaşık 0,93 °C, SSP5-8.5 senaryosunda ise yaklaşık 0,98 °C yıllık ortalama artış öngörülmesi, Sinop kıyılarının iklim değişikliğine duyarlılığını göstermektedir [2]. Ayrıca Karadeniz'de iklim değişikliğine bağlı olarak gelecekte belirgin dalga yüksekliklerinde artışlar ve ekstrem dalga koşullarında değişimler beklenmesi, kıyı erozyonu, taşkın riski, liman yapıları ve kıyı savunma sistemleri açısından bölgenin önemini artırmaktadır [3].

Karadeniz'in yarı kapalı bir deniz olması, rüzgâr ve dalga ikliminin bölgesel koşullara duyarlı biçimde değişmesi ve Sinop'un Karadeniz'e açık kıyı morfolojisi nedeniyle dalga ve su seviyesi değişimlerinden doğrudan etkilenebilecek bir konumda bulunması, çalışma alanı olarak bu bölgenin seçilmesinde temel gerekçeyi oluşturmaktadır [4]. Ayrıca iklim değişikliğine bağlı deniz suyu sıcaklığı, su seviyesi ve dalga koşullarındaki değişimler; deniz canlılarının beslenme, üreme ve göç davranışlarını etkileyerek Karadeniz ekosistemi ve balıkçılık faaliyetleri üzerinde de baskı oluşturabilecektir [1], [2].

Bu çalışmanın amacı, Sinop kıyı kesimlerinde iklim değişikliğinin deniz suyu seviyesi üzerindeki olası etkilerini HYDROTAM-3D modeli kullanılarak incelemek ve gelecek dönemlere ilişkin RCP 4.5 ile RCP 8.5 iklim senaryoları kapsamında deniz seviyesi değişimlerini değerlendirmektir (Şekil 1). Karadeniz'in Sinop kıyı alanına ait hidrodinamik koşulların belirlenebilmesi amacıyla HYDROTAM-3D modeli kullanılmış; Feç, rüzgâr iklimi, dalga iklimi ve su seviyesi değişimi parametreleri dikkate alınmıştır. Rüzgâr ve dalga iklimi analizlerinde Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi'ne ait ECMWF verilerinden yararlanılmıştır. Elde edilen model sonuçları doğrultusunda, iklim değişikliğine bağlı olarak gelecekte meydana gelebilecek deniz seviyesi değişimleri analiz edilmiş ve Sinop kıyıları açısından olası etkiler değerlendirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, Sinop kıyı kesimlerinde iklim değişikliğinin deniz suyu seviyesi üzerindeki olası etkilerini HYDROTAM-3D modeli kullanılarak incelemek ve gelecek dönemlere ilişkin RCP 4.5 ile RCP 8.5 iklim senaryoları kapsamında deniz seviyesi değişimleri değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Hydrotam-3D Nedir?

HYDROTAM-3D, kıyı ve deniz alanlarında hidrodinamik süreçlerin, rüzgâr-dalga ikliminin ve su seviyesi değişimlerinin sayısal olarak incelenmesi amacıyla geliştirilmiş, CBS ile bütünleşik çalışan üç boyutlu baroklinik bir sayısal modeldir [6].

Web tabanlı ve bulut bilişim altyapısına sahip olan HYDROTAM-3D'de hesaplama süreçleri büyük ölçüde sunucu tarafında yürütüldüğünden, kullanıcıların yerel bilgisayarlarına ek yazılım kurmasına veya yüksek işlem gücüne sahip donanım kullanmasına gerek kalmamaktadır [6].

Küresel ısınmaya bağlı okyanus ısıl genleşmesi ve buzulların erimesi, deniz seviyesindeki değişimin temel nedenleri arasında gösterilmektedir [7]. HYDROTAM-3D'nin farklı kıyı mühendisliği problemlerinde uygulanabilirliği; Fethiye İç Körfezi'nde mikroplastik taşınımının modellenmesi ve Göksu kıyılarında erozyon süreçlerinin incelenmesi gibi çalışmalarda da ortaya konulmuştur [8], [9].



Şekil 1. İnceleme Alanı ve Verilerin Kullanılması Amacıyla Seçilen Nokta [5]

2.1.1 Feç modülü

HYDROTAM-3D'de yer alan Feç modülü, çalışma alanında seçilen denizel nokta için rüzgârın kara engeline uğramadan etkili olabileceği dalga kabarma mesafesini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Elde edilen Feç mesafeleri, rüzgârın dalga oluşumu üzerindeki etkisini değerlendirmek ve dalga iklimi analizlerine temel oluşturmak açısından önemlidir. Bu çalışmada Sinop kıyı kesimi için hesaplanan Feç değerleri, mevcut durum ile RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarında rüzgâr-dalga koşullarının değerlendirilmesinde yardımcı bir girdi olarak kullanılmıştır. Tablo 1'e göre seçilen Sinop kıyı noktasında en yüksek efektif feç uzunluğu Kuzeybatı yönünde 521982,6 m olarak elde edilmiştir. Kuzey, Kuzey-Kuzeydoğu ve Kuzeydoğu yönlerinde de yüksek feç değerleri görülürken, güney ve doğu sektörlerinde feç uzunlukları oldukça düşüktür. Bu durum, Sinop kıyısında dalga oluşumu açısından en etkili yönlerin kuzey ve özellikle kuzeybatı sektörü olduğunu göstermektedir.

2.1.2 Rüzgar iklimi alt modeli

Bu çalışmada Sinop kıyı kesimine ait rüzgâr iklimi, HYDROTAM-3D modeli kapsamında mevcut durum, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. HYDROTAM-3D Rüzgâr İklimi Alt Modeli, seçilen kıyı bölgesine ait meteorolojik rüzgâr verilerini kullanarak rüzgârın yön, hız ve oluşum sıklığı bakımından analiz edilmesini sağlamaktadır.

Karadeniz'in bölgesel ölçekte değişken rüzgâr koşullarına sahip olması, iklim değişikliğine bağlı olarak gelecekte dalga ikliminde meydana gelebilecek değişimlerin kıyı süreçleri, kıyı yapıları ve kıyı alanı yönetimi açısından değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca Aydoğan vd. (2021) çalışmasında Sinop'un Karadeniz dalga iklimi analizlerinde seçilen noktalardan biri olarak ele alınması, bu bölgenin çalışma alanı olarak seçilmesini desteklemektedir [4].

Tablo 1. Seçilen noktanın efektif feç uzunlukları [10]

Yön	Açı (°)	Efektif Feç (m)
Kuzey	0	320599,6

Kuzey-Kuzeydoğu	22,5	352373,9
Kuzeydoğu	45	362698,8
Doğu-Kuzeydoğu	67,5	222882,7
Doğu	90	605,8
Doğu-Güneydoğu	112,5	319,73
Güneydoğu	135	201,47
Güney-Güneydoğu	157,5	245,69
Güney	180	273,41
Güney-Güneybatı	202,5	314,97
Güneybatı	225	438,76
Batı-Güneybatı	247,5	1114,99
Batı	270	5242,04
Batı-Kuzeybatı	292,5	166864,9
Kuzeybatı	315	521982,6
Kuzey-Kuzeybatı	337,5	289833,9

Yapılan analizler sonucu, rüzgar iklimi alt modülünde mevcut durum, RCP4.5 ve RCP8.5 verileri analiz edilmiştir (Tablo 2). RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının incelendiği durumda veri bitiş tarihinin 2100 yılına kadar olması gelecek senaryoların doğruluğu açısından önemli bir yere sahiptir. Baskın yönün RCP4.5 senaryosunda değişmesi gelecek yıllarda deniz karakteristiklerinin iklim değişikliği ile beraber değişebileceği anlamı taşımaktadır. Sinop kıyılarında mevcut durumda baskın rüzgâr yönü batı olup en yüksek hızlar mevcut durumda görülmektedir. RCP 4.5 senaryosunda baskın yön batı-kuzeybatıya değişirken, RCP 8.5 senaryosunda tekrar batı yönü baskın hale gelmektedir. Genel olarak gelecek senaryolarında rüzgâr hızlarının mevcut duruma göre azaldığı görülmektedir (Tablo 2).

2.1.3 Dalga iklimi alt modeli

HYDROTAM-3D'de dalga oluşumu; rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve feç mesafesi dikkate alınarak CEM ampirik modeli ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada Sinop kıyıları için mevcut durum, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında dalga iklimi değerlendirilmiş; uzun dönem dalga istatistikleri log-lineer yöntemle analiz edilerek belirgin dalga yüksekliği ile aşılma olasılığı arasındaki ilişki incelenmiştir [6]. Dalga iklimi parametreleri özelinde incelenen log-lineer uzun dönem dalga istatistiği modülü, mevcut durum, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları ile incelenmiştir. Log-lineer uzun dönem dalga istatistiği tabloları incelendiğinde korelasyon katsayılarının 0,99 olduğu açıkça görülmüştür. Bu kapsamda, incelenen senaryoların doğruluğu analiz edilmiştir.

Tablo 2. Rüzgar parametrelerinin senaryolardaki değerleri

	Aşılma Süresi(Saat/yıl)	Hız (metre/saniye)
Mevcut Durum Baskın Yön: Batı	1	19,69
	5	15,92
	10	14,30
RCP4.5 Baskın Yön: Batı-Kuzeybatı	1	16,65
	5	13,89
	10	12,69
RCP8.5 Baskın Yön: Batı	1	17,21
	5	14,00
	10	12,61

Tablo 3'e göre Sinop kıyılarında belirgin dalga yüksekliği gelecek senaryolarında mevcut duruma göre artış göstermektedir. Mevcut durumda 1 saat/yıl aşılma süresi için Hs değeri 4,60 m iken, bu değer RCP 4.5 senaryosunda 6,05 m'ye, RCP 8.5 senaryosunda ise 6,26 m'ye yükselmektedir. Benzer şekilde 12 saat/yıl aşılma süresinde de Hs değeri 3,17 m'den RCP 4.5'te 4,24 m'ye ve RCP 8.5'te 4,35 m'ye

çıkmaktadır. Bu sonuçlar, iklim değişikliği senaryoları altında Sinop kıyılarında dalga etkisinin artabileceğini göstermektedir.

Tablo 3. Dalga parametrelerinin senaryolardaki değerleri

	Aşılma Süresi(Saat/yıl)	Belirgin Dalga Yüksekliği:H_s (m)	T_m (sn)
Mevcut Durum Baskın Yön: Batı-Kuzeybatı	1	4,60	8,11
	12	3,17	7,25
RCP4.5 Baskın Yön: Batı-Kuzeybatı	1	6,05	8,63
	12	4,24	7,66
RCP8.5 Baskın Yön: Batı	1	6,26	8,42
	12	4,35	7,51

2.1.4 Su seviyesi değişimi alt modeli

HYDROTAM-3D'de yer alan Su Seviyesi Değişimi Alt Modülü, çalışma alanına ait aylık su seviyesi verilerinin değerlendirilmesi ve zaman içerisindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu modül kapsamında, seçilen kıyı bölgesi için aylık ortalama su seviyesi değerleri modele tanımlanmakta ve su seviyesindeki değişimler grafiksel olarak analiz edilebilmektedir. Böylece mevcut durum ile gelecek iklim senaryoları altında deniz suyu seviyesinde meydana gelebilecek artış veya azalış eğilimleri karşılaştırılabilmektedir.

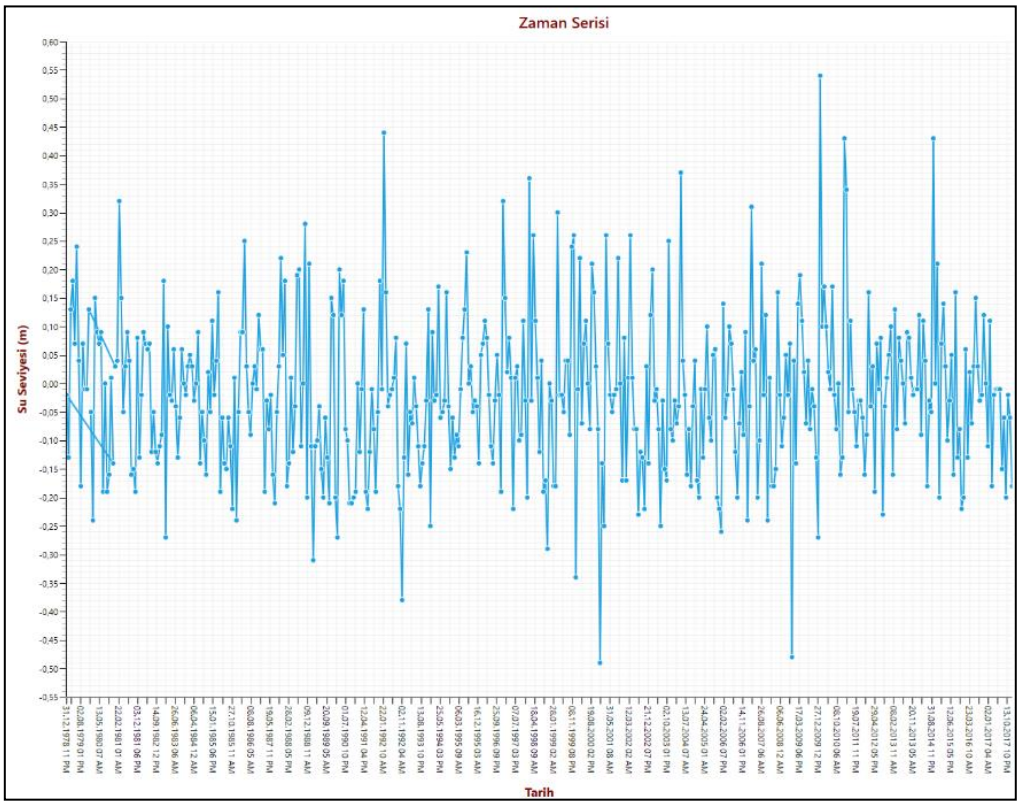
Benzer şekilde literatürde HYDROTAM-3D'nin, iklim değişikliği etkilerinin kıyı ve deniz yapıları üzerindeki olası sonuçlarını değerlendirmek amacıyla rüzgâr, dalga, akıntı, fırtına kabarması ve su seviyesi değişimi gibi çevresel parametreleri birlikte ele alan bütüncül bir modelleme altyapısı sunduğu belirtilmektedir [11]. Bu nedenle bu çalışmada su seviyesi değişimleri yalnızca aylık ortalama değerler üzerinden değil, rüzgâr ve dalga koşullarıyla ilişkili hidrodinamik etkilerle birlikte değerlendirilmiştir [11].

Deniz suyu seviyesi değişimleri incelendiğinde, mevcut durumda değerlerin çoğunlukla -0,20 m ile 0,20 m arasında yoğunlaştığı ve ekstrem değerlerin yaklaşık -0,50 m ile 0,55 m aralığında kaldığı görülmektedir (Şekil 2). RCP 4.5 senaryosunda salınım aralığı mevcut duruma göre belirgin biçimde genişlemekte; su seviyesi yaklaşık -1,20 m'ye kadar düşerken 1,45 m'ye kadar yükselmektedir (Şekil 3). RCP 8.5 senaryosunda ise değerler geniş bir aralıkta değişmekte ve yaklaşık -1,00 m ile 1,00 m arasında ekstrem salınımlar görülmektedir (Şekil 4). Genel olarak değerlendirildiğinde, gelecek iklim senaryolarında ortalama deniz seviyesi değişiminden çok, ekstrem değerlerin ve salınım aralığının artması dikkat çekmektedir.

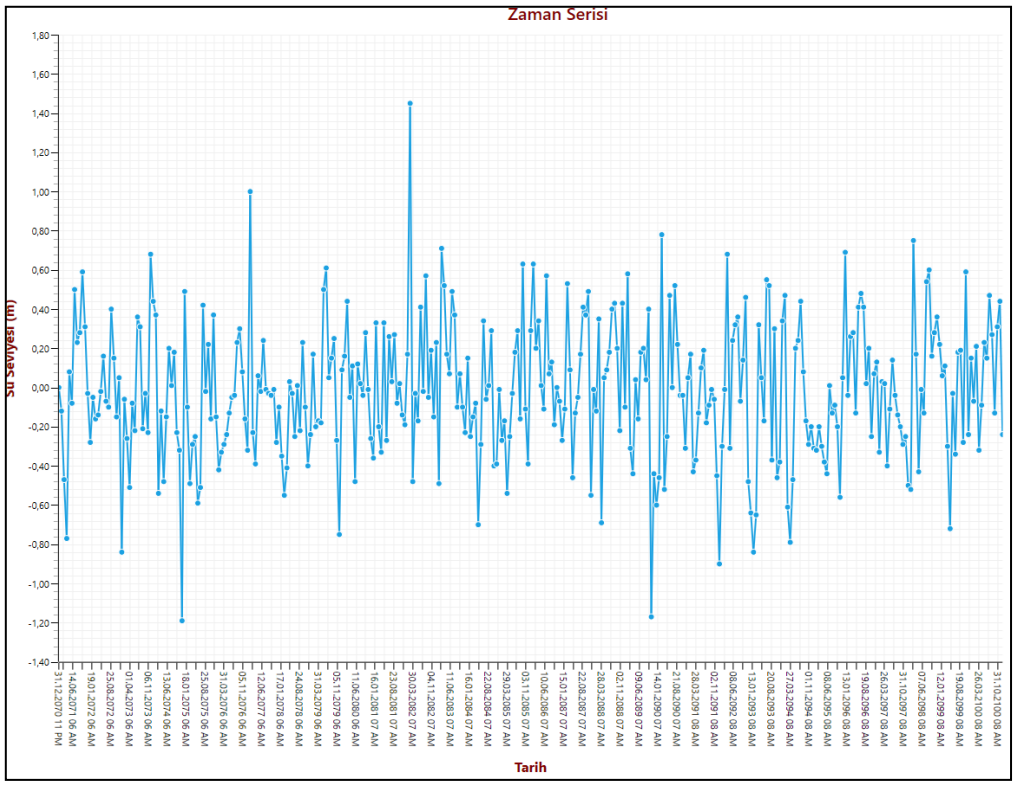
Genel olarak üç zaman serisi birlikte değerlendirildiğinde, iklim değişikliği senaryoları altında ortalama su seviyesi değişiminden ziyade ekstrem değerlerin ve salınım aralığının önem kazandığı anlaşılmaktadır.

3. Değerlendirme

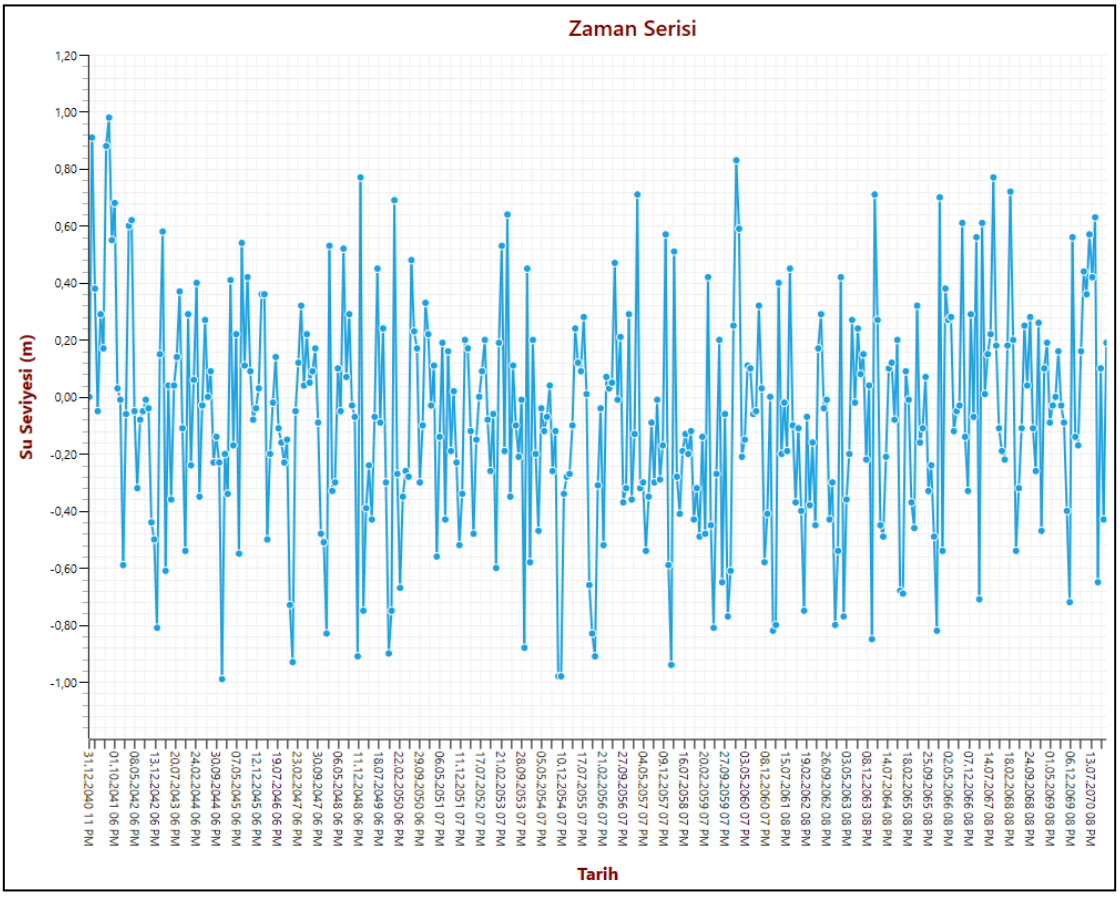
Su seviyesi değişimi analizlerinde mevcut durum için ortalama su seviyesi yaklaşık -0,02 m olarak elde edilmiştir. RCP 4.5 senaryosunda ortalama değer mevcut duruma oldukça yakın olup yaklaşık -0,02 m olarak hesaplanırken, RCP 8.5 senaryosunda ortalama su seviyesi yaklaşık -0,08 m olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, gelecek senaryo verilerinde su seviyesi değişim aralığının mevcut duruma göre belirgin biçimde genişlediği görülmektedir. Mevcut durumda su seviyesi -0,49 m ile 0,54 m arasında değişirken, RCP 4.5 senaryosunda bu aralık -1,19 m ile 1,45 m'ye, RCP 8.5 senaryosunda ise -0,99 m ile 0,98 m'ye ulaşmaktadır.



Şekil 2. 1978-2017 yılları arasında deniz suyu seviyesi aylık değişimi [10]



Şekil 3. RCP 4.5 2070-2100 yılları arasında deniz suyu seviyesi aylık değişimi [10]



Şekil 4. RCP 8.5 2040-2070 yılları arasında deniz suyu seviyesi aylık değişimi [10]

Yıllık ortalama değerler incelendiğinde, mevcut durum veri setinde en düşük yıllık ortalama 1989 yılında, en yüksek yıllık ortalama ise 2010 yılında görülmüştür. RCP 4.5 senaryosunda en düşük yıllık ortalama 2078 yılında, en yüksek yıllık ortalama ise 2082 yılında elde edilmiştir. RCP 8.5 senaryosunda ise en düşük yıllık ortalama 2058 yılında, en yüksek yıllık ortalama 2041 yılında belirlenmiştir. Bu bulgular, gelecek senaryolarında ortalama değerlerden ziyade aylık ve yıllık salınımların büyüklüğünde artış olduğunu göstermektedir.
Trend analizleri, mevcut durumda su seviyesi değişiminde oldukça sınırlı bir artış eğilimi bulunduğunu göstermektedir. RCP 4.5 senaryosunda zayıf bir artış eğilimi, RCP 8.5 senaryosunda ise zayıf bir azalma eğilimi hesaplanmıştır. Ancak doğrusal eğilim katsayılarının açıklayıcılığı düşük olduğundan, su seviyesi değişimlerinin tek başına doğrusal bir eğilim ile açıklanmasının yeterli olmadığı değerlendirilmiştir. Bu nedenle Sinop kıyıları açısından asıl dikkat edilmesi gereken unsur, ortalama su seviyesi değişiminden çok ekstrem değerlerin ve salınım aralığının gelecek senaryolarında büyümesidir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Sinop kıyı kesimlerinde iklim değişikliğine bağlı deniz suyu seviyesi değişimleri HYDROTAM-3D modeli kullanılarak mevcut durum, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre HYDROTAM-3D modeli; feç, rüzgâr iklimi, dalga iklimi ve su seviyesi değişimi parametrelerinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayarak kıyı alanındaki hidrodinamik koşulların bütüncül biçimde analiz edilmesine imkân tanımaktadır.

Çalışma sonucunda, Sinop kıyılarında açık deniz etkisinin özellikle kuzeybatı, kuzey ve kuzeydoğu yönlerinde daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Bu yönlerdeki yüksek feç uzunlukları, rüzgâr kaynaklı dalga oluşumu açısından önemli bir potansiyele işaret etmektedir. Rüzgâr ve dalga iklimi analizleri ise hâkim yön karakterinin senaryolar arasında büyük ölçüde korunduğunu, ancak rüzgâr ve dalga büyüklüklerinde senaryolara bağlı değişimlerin meydana gelebileceğini göstermiştir.

Su seviyesi analizlerinde mevcut durum ile RCP 4.5 senaryosunun ortalama değerlerinin birbirine yakın olduğu, RCP 8.5 senaryosunda ise ortalama su seviyesinin daha düşük hesaplandığı görülmüştür. Buna karşın, gelecek senaryolarında su seviyesi değişim aralığının mevcut duruma göre belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir. Mevcut durumda maksimum su seviyesi 0,54 m iken, bu değer RCP 4.5 senaryosunda 1,45 m'ye ve RCP 8.5 senaryosunda 0,98 m'ye ulaşmıştır. Benzer şekilde minimum değerler de gelecek senaryolarında daha düşük seviyelere inmektedir.
Bu sonuçlar, Sinop kıyıları için iklim değişikliğinin etkisinin yalnızca ortalama deniz seviyesi değişimi üzerinden değil, aynı zamanda ekstrem su seviyesi değerleri ve salınım aralığındaki artış üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle kıyı yapıları, liman alanları, kıyı koruma sistemleri ve düşük kotlu kıyı bölgeleri için tasarım ve planlama süreçlerinde gelecek iklim senaryolarına dayalı yüksek su seviyesi koşullarının dikkate alınması önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, HYDROTAM-3D modeli ile elde edilen bulgular, Sinop kıyı kesiminde iklim değişikliğine bağlı hidrodinamik değişimlerin değerlendirilmesinde kullanılabilir bir sayısal modelleme altyapısı sunduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı zaman aralıkları, daha uzun projeksiyon dönemleri ve kıyı taşkınına duyarlı alanlar birlikte değerlendirilerek Sinop kıyıları için daha ayrıntılı risk analizleri gerçekleştirilebilir.

5. Kaynaklar

[1 Demircan, M. (2022). İklim Değişikliğinin Türkiye Denizlerine ve Su Ürünleri Yetiştiriciliğine Etkisi. JENAS Journal of Environmental and Natural Studies, 4(2), 96-108.

[2] Nacar, S., Mete, B., Tokgöz, B. S., & Bayram, A. (2024). İklim Değişikliğinin Deniz Suyu Sıcaklıkları Üzerindeki Olası Etkilerinin Değerlendirilmesi: Orta Karadeniz Örneği. International Journal of Engineering Research and Development, 16(1), 279-289.

[3] Rusu, L. (2024). Climate Change Impact on the Future Sea State Conditions in the Black Sea. Journal of Coastal Research, 113(SI), 200-204.

[4] Aydoğan, B., Görmüş, T., Ayat, B., & Çarpar, T. (2021). Analysis of potential changes in the Black Sea wave power for the 21st century. Renewable Energy, 169, 512-526.

[5] Google Earth Pro. (2026). Sinop kıyı kesimi ve çalışma noktası uydu görüntüsü. Görüntü verisi: © Google / Maxar Technologies. Erişim tarihi: 11 Temmuz 2026

[6] Balas, L., İnan, A., Yılmaz, N., & Cebe, K. (2012). HYDROTAM: 3D Model for Hydrodynamic and Transport Processes in Coastal Waters. International Congress on Environmental Modelling and Software.

[7] IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis — Chapter 9: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change

[8] Genç, A. N., Vural, N., & Balas, L. (2020). Modeling transport of microplastics in enclosed coastal waters: A case study in the Fethiye Inner Bay. Marine Pollution Bulletin, 150, 110747.

[9] Genç, A. N., İnan, A., Yılmaz, N., & Balas, L. (2013). Modeling of erosion at Göksu coasts. Journal of Coastal Research, 65(SI), 2155-2160.

[10] HYDROTAM (2026). HYDROTAM-3D model çıktıları: Sinop kıyı kesimi feç, rüzgâr, dalga ve su seviyesi analizleri

[11] Uğurlu, A., Balas, E. A., Balas, C. E., & Akbaş, S. O. (2024). Unleashing the potential of a hybrid 3D hydrodynamic monte carlo risk model for maritime structures' design in the imminent climate change era. Journal of Marine Science and Engineering, 12(6), 931.

Ogee Savaklarda Kullanılan Farklı Baffle Blok Geometrilerinin Hidrolik Performansının HAD ile Değerlendirilmesi

Binhan ARIK*
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü Gülbahçe Kampüsü 35430 Urla/İzmir,
0000-0003-4930-8885
binhanarik@iyte.edu.tr

Ahmet Bora BAYÇORA
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü Gülbahçe Kampüsü 35430 Urla/İzmir,
borabaycora1@gmail.com

Şebnem ELÇİ
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü Gülbahçe Kampüsü 35430 Urla/İzmir,
0000-0002-9306-1042
sebnemelci@iyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler: ogee savak, baffle blok, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), enerji sönümleme, kavitasyon

1. Amaç

Ogee savaklarda yüksek akım hızları, mansapta önemli miktarda enerji oluşmasına neden olmakta ve bu durum yapı güvenliği ile akım kontrolü açısından etkin enerji sönümleme yöntemlerini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla kullanılan blokların hidrolik performansı; blok geometrisi, yerleşim düzeni ve akım koşullarına bağlı olarak değişmektedir [1, 2, 3]. Literatürde farklı blok geometrileri ve yerleşimlerinin enerji sönümleme performansına etkisi çeşitli çalışmalarda incelenmiş olmakla birlikte, aynı hidrolik koşullar altında farklı geometrilerin sistematik olarak karşılaştırıldığı çalışmalar görece sınırlıdır [2, 4].

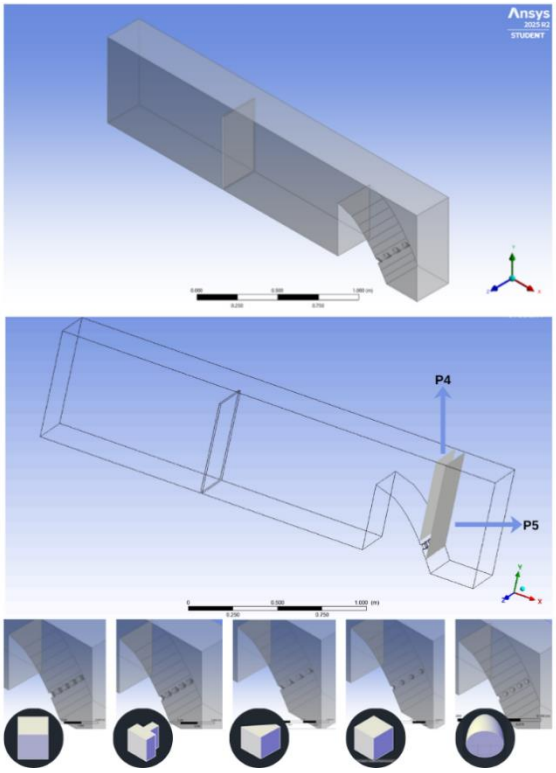
Bu çalışmada, ogee savak yüzeyine yerleştirilen beş farklı blok geometrisinin (küp, T, trapez, elmas ve kubbe) hidrolik performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, blok öncesi ve sonrası kesitlerden elde edilen hız ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) değişimleri üzerinden enerji sönümleme davranışı incelenmiş ve farklı debi ile blokaj oranlarının etkisi altında geometrilerin performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, basınç ve hız değerleri kullanılarak blok geometrilerinin kavitasyon potansiyeli değerlendirilmiştir. Tüm bu karşılaştırmalar sonucunda en uygun blok geometrisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Ogee savak üzerine yerleştirilen farklı blok geometrilerinin akım karakteristikleri üzerindeki etkisi üç boyutlu sayısal modelleme ile incelenmiştir. Sayısal analizler ANSYS Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplama bölgesi; memba haznesi, ogee savak ve mansap kanalından oluşmaktadır. Ogee savak profili USBR tarafından önerilen standart profil esas alınarak oluşturulmuş [5]; savak yüksekliği 0,40 m, genişliği 0,55 m ve uzunluğu 0,42 m olarak tanımlanmıştır. Enerji sönümleme amacıyla kullanılan bloklar savak yüzeyi üzerine tek sıra halinde yerleştirilmiştir. Sayısal modelin genel görünümü, blokların savak üzerindeki yerleşimi ve incelenen blok geometrileri Şekil 1'de sunulmuştur.

Serbest yüzeyli akımın modellenmesinde hava ve su fazlarının birlikte tanımlanmasına olanak sağlayan Hacim Akışkanlığı (Volume of Fluid, VOF) yöntemi kullanılmıştır. Türbülans etkileri, akım ayrılması ve yüksek kayma bölgelerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan k-ω SST modeli ile temsil edilmiştir [6, 7]. Hesaplama bölgesinde hibrit ağ yapısı kullanılmıştır ve savak yüzeyi ile blokların bulunduğu akım değişimlerinin daha belirgin olması beklenen bölgelerde yerel ağ sıklaştırması uygulanmıştır. Farklı ağ yoğunlukları kullanılarak gerçekleştirilen ağ bağımsızlık analizi sonucunda, çözüm doğruluğu ve hesaplama süresi birlikte değerlendirilerek nihai ağ yapısı belirlenmiştir. Buna göre genel ağ elemanı boyutu yaklaşık 0,03 m olarak belirlenirken, yerel ağ sıklaştırması uygulanan savak ve blok çevresinde bu değer 0,005 m'lik daha ince ağ yapısına düşürülmüştür. Savak yüzeyinde sınır

tabaka davranışının daha iyi temsil edilebilmesi amacıyla üç adet sınır tabaka (inflation) katmanı uygulanmış ve yakın duvar çözünürlüğü, standart duvar fonksiyonlarının kullanımına uygun olacak şekilde $30<y^{+}<300$ aralığında tutulmuştur. Katı yüzeylerde kaymama sınır koşulu uygulanmış, giriş sınır koşulu ise incelenen debilere göre tanımlanmıştır.



Şekil 1. Savak model görünümü, P4 ve P5 kesitleri gösterimi, blok yerleşimleri, blok türleri

Geometri etkisinin belirlenmesi amacıyla küp, T-şekli, trapez, elmas ve kubbe olmak üzere beş farklı blok geometrisi ele alınmıştır. Her geometri 5, 8,8, 25 ve 45,7 L/s olmak üzere dört farklı debi ve 0,163, 0,218, 0,380 ve 0,490 olmak üzere dört farklı blokaj oranı altında analiz edilmiştir. Böylece her bir geometri için 16, toplamda 80 farklı sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Blokaj oranı, kanal genişliği içerisindeki toplam blok genişliğinin kanal genişliğine oranı olarak tanımlanmıştır. İncelenen blokaj oranları, literatürde blok uygulamalarında kullanılan blokaj seviyeleri de dikkate alınarak belirlenmiştir [8]. Yan duvar etkisini azaltmak amacıyla bloklar her iki yan duvardan 2 cm içeride yerleştirilmiştir.

Farklı geometrilerin akım üzerindeki etkisini karşılaştırmak amacıyla blok bölgesinin hemen öncesinde P4 (x=2,33 m) ve hemen sonrasında P5 (x=2,49 m) olmak üzere iki kesit tanımlanmıştır (Şekil 1).

Sonuçların işlenmesi CFD-Post ortamında gerçekleştirilmiş ve yalnızca su fazının değerlendirilmesi amacıyla her iki kesitte su hacim oranı eşik değeri 0,5 olacak şekilde Iso Clip uygulanmıştır. Islak kesit alanı üzerinden alan ortalamalı basınç, hız ve TKE değerleri hesaplanmıştır. Blok geometrilerinin hidrolik performansının karşılaştırılmasında hız ve TKE değerleri kullanılmış ve farklı giriş koşullarının etkisini azaltmak amacıyla bu parametreler blok sonrası ve blok öncesi değerlerin oranı (P5/P4) alınarak normalize edilmiştir.

Kavitasyon potansiyeli, basınç ve hız değerlerinden hesaplanan kavitasyon indeksi (σ) kullanılarak değerlendirilmiş, indeks Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır:

$$\sigma = \frac{P_{abs} - P_v}{0{,}5\rho V^2} \tag{1}$$

Burada P_{abs} mutlak basıncı, P_v suyun buhar basıncını, ρ su yoğunluğunu ve V ortalama akım hızını ifade etmektedir.

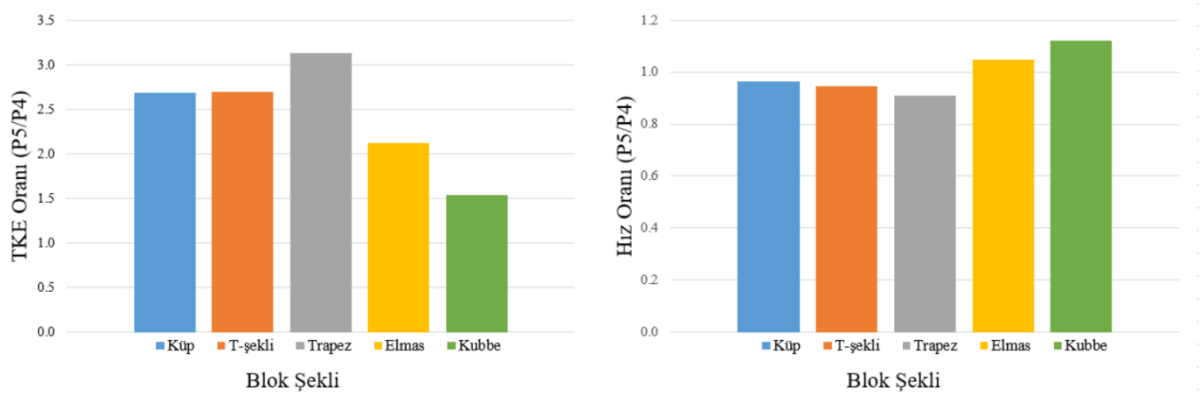
CFD-Post'tan elde edilen basınç değerleri gösterge (gauge) statik basınç olduğundan, kavitasyon indeksi hesabında kullanılacak mutlak basınç atmosfer basıncı dikkate alınarak Eşitlik (2) ile belirlenmiştir.

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm} \quad (2)$$

Atmosfer basıncı P_{atm}=101325 Pa olarak alınmıştır. Suyun 20 °C'deki buhar basıncı P_v=2339 Pa, yoğunluğu ρ=998,2 kg/m^3 olarak kullanılmıştır.

3. Değerlendirme

Blok geometrilerinin akım karakteristiklerine etkisi, farklı blokaj oranı ve debi koşullarında hız ve TKE değişimleri üzerinden değerlendirilirken, basınç ve hız değerlerinden hesaplanan kavitasyon indeksi yardımıyla geometrilerin kavitasyon potansiyeline bakılmıştır.

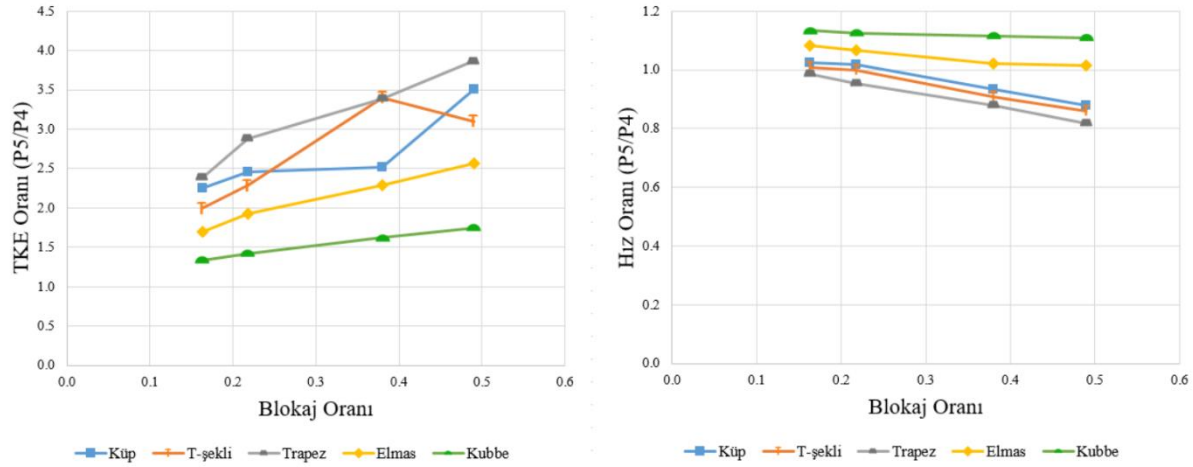


Şekil 2. Farklı blok geometrileri için (a) TKE ve (b) hız oranlarının (P5/P4) karşılaştırılması

Farklı blok geometrilerine ait ortalama TKE ve hız oranları Şekil 2'de verilmiştir. TKE oranlarının tüm geometrilerde 1'in üzerinde olduğu ve blok bölgesi sonrasında TKE'nin arttığı görülmektedir (Şekil 2a). Bu artış en belirgin biçimde trapez geometride gerçekleşirken, kubbe geometri en düşük TKE oranını vermiştir. Küp ve T-şekilli bloklar birbirine yakın sonuçlar göstermiş, elmas geometri ise daha düşük bir TKE artışı oluşturmuştur. Hız oranlarında ise ters yönde bir eğilim ortaya çıkmış; en düşük değer trapez, en yüksek değer kubbe geometride elde edilmiştir (Şekil 2b). Küp, T-şekilli ve trapez geometrilerde hız oranının 1'in altında kalması, blok bölgesi sonrasında ortalama hızın azaldığını göstermektedir.

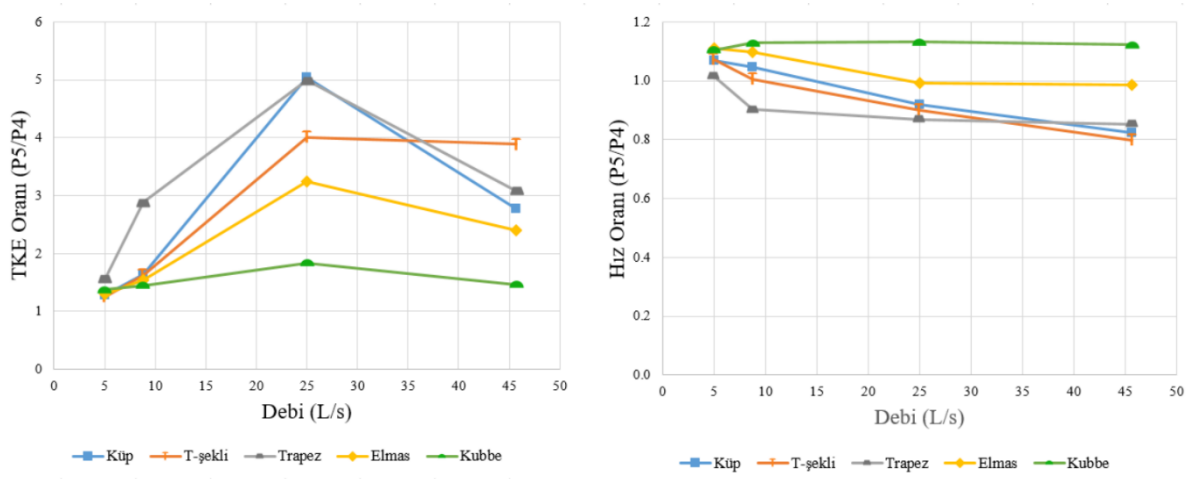
TKE ve hız sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, trapez ve kubbe geometrilerinin belirgin biçimde karşıt hidrolik davranış sergilediği görülmektedir. Trapez geometrinin yüksek TKE artışı ile birlikte daha düşük hız oranı oluşturması, ortalama akım enerjisinin daha büyük bir bölümünün türbülanslı hareketlere aktarılmasıyla ilişkilendirilebilir. Buna karşılık kubbe geometrisinde yüksek hız oranının korunması ve TKE artışının sınırlı kalması, daha yumuşak bir akım geçişine işaret etmektedir. Bu karşıtlık, blok geometrisinin akım hızındaki değişim ile türbülans oluşumu arasındaki denge üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Blokaj oranındaki değişimin etkisi incelendiğinde, geometrilerin aynı yönde fakat aynı şiddette tepki vermediği görülmektedir (Şekil 3). TKE oranı genel olarak blokaj oranıyla birlikte artarken, bu artış trapez geometride daha belirgin olmuş ve trapez tüm aralık boyunca yüksek değerlerini korumuştur. Kubbe geometri ise hem daha düşük TKE oranları vermiş hem de blokaj oranındaki değişimlere daha sınırlı tepki göstermiştir. Küp geometride özellikle en yüksek blokaj oranında belirgin bir artış ortaya çıkarken, T-şekilli geometride TKE oranının 0,380'e kadar yükselip 0,490'da bir miktar azalması, blokaj oranındaki artışın her geometri için doğrusal bir türbülans artışı oluşturmadığını göstermektedir.



Şekil 3. Farklı blokaj oranlarında blok geometrileri için (a) TKE ve (b) hız oranlarının (P5/P4) değişimi

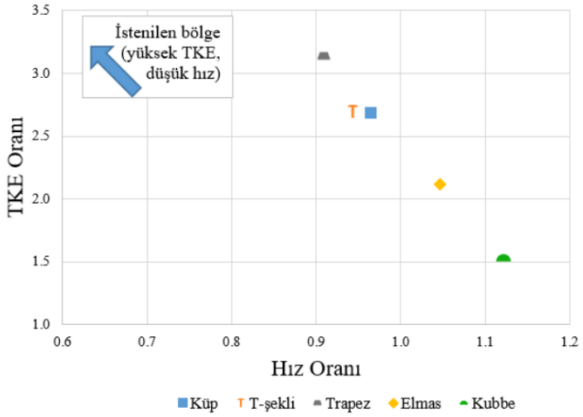
Hız oranlarında ise daha düzenli bir eğilim gözlenmiş ve blokaj oranı arttıkça değerler genel olarak azalmıştır. Trapez geometri bu açıdan da daha belirgin bir değişim gösterirken, kubbe geometri yüksek hız oranlarını büyük ölçüde korumuştur. Elmas geometrinin hız oranındaki sınırlı değişim de bu geometrinin blokaj oranına karşı daha düşük bir duyarlılığa sahip olduğunu düşündürmektedir. TKE ve hız sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi, blokaj oranının akım üzerindeki etkisinin yalnızca akım kesitindeki daralmayla açıklanamayacağını; blok şeklinin akımla kurduğu etkileşimin de bu değişimde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Farklı debilerde blok geometrileri için (a) TKE ve (b) hız oranlarının (P5/P4) değişimi

Debi etkisi incelendiğinde ise blokaj oranında gözlenen değişimden farklı bir eğilim göstermiştir (Şekil 4). TKE oranları çoğu geometride debiyle sürekli artmak yerine 25 L/s'de en yüksek seviyeye ulaşmış ve 45,7 L/s'de yeniden azalmıştır. Bu değişim özellikle küp ve trapez geometrilerde belirginleşirken, kubbe geometrinin TKE oranı tüm debilerde daha düşük kalmış ve daha sınırlı değişim göstermiştir. T-şekilli geometride ise 25 L/s'ye kadar görülen artışın ardından TKE oranının yaklaşık aynı seviyede kalması, debi değişiminin türbülans üzerindeki etkisinin geometriye bağlı olduğunu göstermektedir (Şekil 4a).

Hız oranlarında aynı ara debi davranışı görülmemiş; değerler artan debiyle genel olarak azalmış veya sınırlı değişim göstermiştir (Şekil 4b). Trapez geometri düşük hız oranlarını korurken, kubbe geometri tüm debilerde en yüksek değerleri vermiş ve debi değişimine karşı daha az duyarlı kalmıştır. TKE ve hız eğilimleri birlikte ele alındığında, özellikle küp ve trapez geometrilerin debi değişimine daha güçlü tepki verdiği, kubbe geometrinin ise her iki parametre açısından daha kararlı bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu farklılık, debinin blok bölgesindeki akım üzerindeki etkisinin blok geometrisiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Blokaj oranı ve debinin birlikte değerlendirilmesiyle farklı blok geometrilerine ait ortalama hız ve TKE oranlarının karşılaştırılması

Blokaj oranı ve debinin birlikte etkisini değerlendirmek amacıyla, her bir blok geometrisi için tüm çalışma koşullarından elde edilen ortalama hız ve TKE oranları Şekil 5'te birlikte gösterilmiştir. İki parametre arasında genel olarak ters yönlü bir ilişki görülmüş; daha düşük hız oranına sahip geometriler daha yüksek TKE oranları oluşturmuştur. Trapez geometri, en düşük ortalama hız oranıyla birlikte en yüksek ortalama TKE oranını vererek diğer geometrilerden ayrılmıştır. Küp ve T-şekilli geometriler trapeze yakın bir davranış gösterirken, elmas geometri daha yüksek hız ve daha düşük TKE oranlarıyla orta düzeyde kalmıştır. Kubbe geometri ise en yüksek hız ve en düşük TKE oranıyla karşıt uçta yer almıştır.

Bu genel dağılım, blokaj oranı ve debi ayrı ayrı değerlendirildiğinde gözlenen geometriye bağlı eğilimlerin tüm çalışma koşulları birlikte ele alındığında da korunduğunu göstermektedir. Özellikle trapez geometrinin hız azalması ve türbülans artışını birlikte sağlaması, incelenen geometriler arasında enerji sönümleme açısından daha avantajlı bir hidrolik davranış sergilediğini göstermektedir.

Tüm debi ve blokaj oranı koşullarında elde edilen kavitasyon indekslerinin ortalaması alınarak her blok geometrisi için P4 ve P5 kesitlerine ait değerler Tablo 1'de sunulmuştur. Tüm geometrilerde ortalama kavitasyon indekslerinin 1'in oldukça üzerinde olması, incelenen koşullarda düşük kavitasyon eğilimini göstermektedir.

Tablo 1. Farklı blok geometrileri için P4 ve P5 kesitlerindeki ortalama kavitasyon indeksleri

Geometri	Ortalama σ (P4)	Ortalama σ (P5)
Küp	44,37	50,24
T-Şekli	42,75	50,10
Trapez	41,66	51,33
Elmas	41,93	38,44
Kubbe	44,94	35,76

Kavitasyon değerlendirmesi, blok geometrisinin P4 ve P5 kesitleri arasındaki kavitasyon indeksi değişimi üzerinde de etkili olduğunu göstermiştir. Küp, T-şekli ve trapez geometrilerinde blok sonrasında ortalama kavitasyon indeksinde artış görülürken elmas ve kubbe geometrilerinde azalma belirlenmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, ogee savak üzerine yerleştirilen beş farklı blok geometrisinin hidrolik performansı farklı debi ve blokaj oranları altında sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, blok geometrisinin akım hızının azaltılması ve türbülans oluşumu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Genel olarak artan blokaj oranıyla TKE oranı yükselirken hız oranı azalmış, ancak bu değişimin büyüklüğü geometrilere göre farklılık göstermiştir. Debinin etkisinde ise TKE için doğrusal bir değişim gözlenmemiş ve çoğu geometride en yüksek TKE oranı 25 L/s debide elde edilmiştir.

Tüm çalışma koşulları birlikte değerlendirildiğinde, trapez geometri en yüksek ortalama TKE oranı ile en düşük ortalama hız oranını birlikte sağlayarak enerji sönümleme açısından en avantajlı hidrolik davranışı göstermiştir. Kubbe geometri ise düşük TKE artışı ve yüksek hız oranıyla daha sınırlı bir etki oluştururken, küp ve T-şekli geometriler trapeze daha yakın bir performans sergilemiştir. Elde edilen bulgular, blok tasarımında yalnızca blokaj oranının artırılmasının yeterli olmadığını, blok geometrisinin debi ve blokaj oranıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda trapez geometri, incelenen koşullar altında ogee savaklarda enerji sönümleme performansının geliştirilmesi açısından öne çıkan seçenek olarak belirlenmiştir.

Kavitasyon indeksi sonuçları ayrıca, blok geometrisinin kavitasyon potansiyelinde etkili olduğunu göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1002-Hızlı Destek Programı kapsamında, 225M810 numaralı proje ile desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

[1] Peterka, A. J. (1958). Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. Engineering Monograph No. 25, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver.

[2] Karimi Chahartaghi, M., Nazari, S., Solimani Babarsad, M. (2020). Investigating the effects of the block geometries and sidewall divergences on the local scour downstream of baffled chute spillways. Advances in Civil Engineering, 2020, 2978602.

[3] Al-Fatlawi, M., Al-Shuker, A. (2023). Experimental investigation of energy dissipation in ogee spillway using new distributions of dissipation blocks. E3S Web of Conferences, 427, 04006.

[4] Kumcu, S. Y., Ispir, K. (2022). Experimental and numerical modeling of various energy dissipater designs in chute channels. Applied Water Science, 12, 266.

[5] United States Bureau of Reclamation (USBR). (1987). Design of Small Dams. 3rd ed., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 860p.

[6] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32(8), 1598–1605.

[7] Moroni, M., Castellino, M., De Girolamo, P. (2022). Numerical and physical modeling of Ponte Liscione (Guardialfiera, Molise) dam spillways and stilling basin. Hydrology, 9(12), 214.

[8] Maatooq, J. S., Taleb, E. R. (2018). The effects of baffle blocks locations and blockage ratio on the sequent depth and velocity distribution of forced hydraulic jump. 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 120–130.

Düşüm Havuzlarında Hidrolik Sıçrama Performansının OpenFOAM ile İncelenmesi

Cem YILMAZER*
İstanbul Medipol Üniversitesi, 34815, İstanbul, Türkiye, 0000-0001-8598-9468
cem.yilmazer@medipol.edu.tr

Anahtar Kelimeler: hesaplamalı akışkanlar dinamiği, OpenFOAM, dolusavak, hidrolik sıçrama.

1. Amaç

Bu çalışma kapsamında bir dolusavak ve son eşikli düz bir düşüm havuzu yapısının hidrolik performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Literatürde bilhassa akademik çalışmalarda oldukça ilgi gören OpenFOAM v13 yazılımı tercih edilmiştir. Bu çalışmanın amacı geliştirilen sayısal modeli ampirik denklemlerle elde edilen sonuçlarla doğrulamaktır. Tasarım kriterleri çerçevesinde modelin hidrolik sıçramanın fiziğini ne ölçüde yakalayabildiği tartışılmıştır. Bir su yapısı prototipinin laboratuvar koşullarında modellemesindeki kısıtlıklar düşünüldüğünde doğrulanmış sayısal modeller önem kazanmaktadır.

Literatürde deneysel veriler ve teorik ampirik ifadelerle sayısal modellerin doğrulanmasına dair birçok çalışma bulunmaktadır. Araştırmacılar başta OpenFOAM olmak üzere temel HAD çözücülerine başvurmuşlardır [1-5]. Çalışmalarda farklı türbülans modeli seçimine göre farklı sınır koşullarında sayısal modelin kapasitesi ve limitleri tartışılmıştır. Savaklanan akımın düşüm havuzunda hidrolik sıçramaya uğrayarak enerjisini sönümlenmesi beklenmektedir. Dolayısıyla türbülans kaynaklı büyük bir enerji harcanımı söz konusudur. İşte bu noktada doğru türbülans modelinin seçimi ile kurulan bir sayısal modelde yapının performansının incelenmesi önemli olmaktadır. Türbülans modelinin hidrolik sıçrama için oldukça kritik olduğu literatürde vurgulanmaktadır [6]. Ayrıca OpenFOAM çözücüsünün hidrolik sıçramanın modellenmesinde gerçekçi ve hassas sonuçlar verdiği ifade edilmiştir [7]. Dolayısıyla hidrolik sıçrama gibi türbülans modeli seçiminin ön plana çıktığı sayısal modellemelerde geniş türbülans modelleme altyapısıyla OpenFOAM tercih edilebilir olmaktadır [8].

2. Materyal ve Yöntem

Bir HAD modeli kurulurken belirli bir iş akışından söz etmek mümkündür. Önce incelenecek akım alanı ve bu akımın etkileşime girdiği katı cidar geometrisi oluşturulur. İkincil olarak bu akım alanında Sonlu Hacimler Yönteminin uygulanması için hesaplama ağı yapısı oluşturulmalıdır. HAD metodunun temelini oluşturan Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemlerin ayrıklaştırılması için ilgili sınır koşulları tanımlanmalıdır. Benzer şekilde ilgili çözücü algoritması akışkanlar dinamiği problemine göre seçilmelidir. Ardından yakınsama kriterleri çerçevesinde modelin çözümü gerçekleştirilir.

2.1 Akım probleminin tanımlanması

Bu çalışma kapsamında seçilen ve incelenen akım alanı içerisinde bulunan ogee hidrolik profili United States Bureau of Reclamation (USBR) standardına göre Denklem 1 ile ifade edilen bağıntı ile belirlenmiştir [9]. Dolusavak sonrası son eşik barındıran düz düşüm havuzlu bir akım alanı oluşturulmuştur (Şekil 1a).

$$\left(\frac{y}{H_d}\right) = 0.5\left(\frac{x}{H_d}\right)^{1.85} \quad (1)$$

Girişte 6 m yükseklikte olacak şekilde sabit hidrolik yüke sahip su girişi tanımlanmıştır. Tasarım koşulları olarak burada hız q=3.6 $m^3/s/m$ birim debiye tekabül edecek şekilde V=0.6 m/s seçilmiştir. Akım alanı bu çalışmada Z ekseninde tek hücre kullanılarak 2B yaklaşımıyla çözülmüştür. Sonlu hacimler yöntemi gereği tek hücrede yanal yüzeyler boş sınır koşulu olarak bırakılmıştır. Üst sınırda atmosferik koşullar için akım alanına hava giriş çıkışına izin verecek şekilde tanımlanmıştır. Benzer şekilde girişte 6 m'den üste kalan kısım yine atmosfere açık olarak bırakılmıştır. Çıkış sınır koşulunda sisteme giren debinin akım alanında uzaklaşmasına izin verecek şekilde ve geriye doğru akım etkisini sönümleyecek şekilde belirlenmiştir (Şekil 1).

2.2 Akım parametreleri

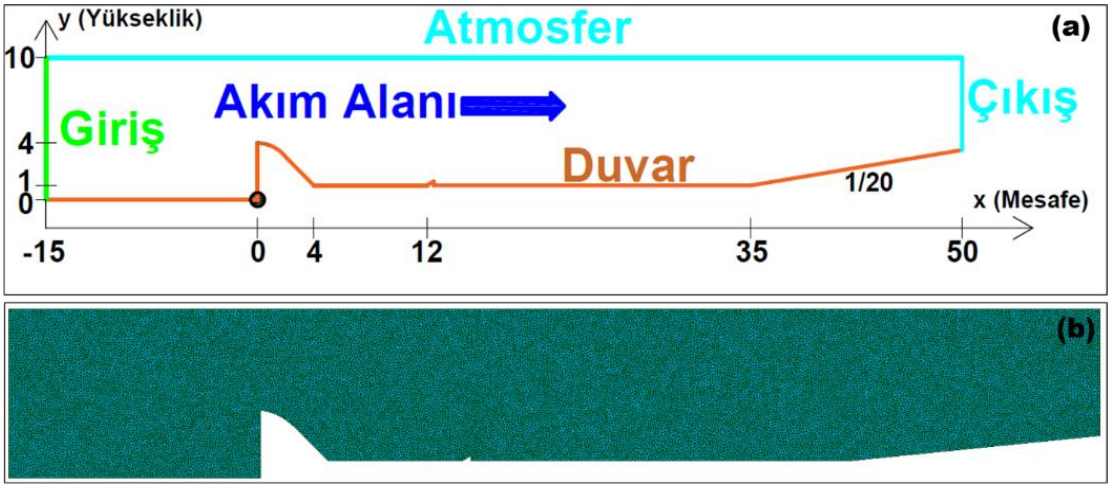
Bu çalışmada kullanılan C_d=0,4920 boyutsuz debi katsayısı Denklem 2 ile hesaplanmıştır. Burada q 2B bir model kurduğumuz için birim debi olmak üzere g yerçekimi ivmesi ve H_e ise kret üstü proje savak yükü (toplam enerji yükü) olarak dikkate alınmaktadır (Denklem 2). Belanger Momentum denklemi kullanılarak dolu savak sonrası düşüm havuzunda teorik olarak sıçrama sonrası derinlik (y_2=2,62 m) hesaplanmıştır (Denklem 3). Burada, y_1 ise sıçrama öncesi su seviyesi ve Fr_1 yine y_1 noktasında Froude sayısını ifade etmektedir. Sayısal modelde Belanger formülü kullanılırken su yüzeyindeki salınım ile değişen y_1 değerinin zamansal ortalaması alınarak hesap yapılmıştır. Dolusavaktan önce x=-2 m noktasında y_1 su seviyesi ve y_2 için ise x=11 m mesafede son eşikten hemen öncesi belirlenmiştir. Geliştirilen MATLAB kodu vasıtasıyla 0,1 zaman aralıklarıyla kaydedilmiş veri setinde simülasyonda akımın yarı kararlı hale gelmesinden itibaren simülasyon sonuna kadar olan süreye kadar verilerin zamansal ortalaması alınarak istatistiksel olarak tutarlı daha güvenilir parametre sonuçları elde edilmiştir. Böylece gerçekleştirilen farklı koşullarda sayısal modelin hidrolik sıçrama formunu tam yakalayacak şekilde yarı kararlı hale gelmesi beklenmiştir.

$$q = C_d\sqrt{2g}H_e^{1.5} \tag{2}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1\right) \tag{3}$$

Hata metriği olarak da Denklem 4'te verilen bağıl hata (e) yaklaşımından yararlanılmıştır. Buna göre OpenFOAM aracılığıyla elde edilen parametreler (D_{num}), sırasıyla Denklem 2 ile 3 tarafından hesaplanan teorik C_d ve y_2 parametreleri (D_{teorik}) ile karşılaştırılmıştır.

$$e = \left|\frac{D_{num} - D_{teorik}}{D_{teorik}}\right| * 100 \tag{4}$$



Şekil 1. (a) Akım alanının geometrik özellikleri ve (b) Hesaplama ağı

3. Değerlendirme

Bir sayısal modelde belirli oranda küçültülen hücre boyutuyla ideal hesaplama ağına asimptotik olarak yaklaşılmaktadır. Bu sebeple kurulan sayısal modeldeki parametrelerin veya o parametreler ait hata metriğinin değişim miktarı dikkate alınmaktadır [10]. Tablo 1 açıkça göstermektedir ki kalın ağ tiplerinde y_2 hata oranı çok yüksektir. Bu durum hidrolik sıçramada enerji sönümlemediğini açıkça göstermektedir. Hata metriklerindeki asimptotik yaklaşım (özellikle y_2 için) uygun bir hesaplama ağı çalışmasının başarılı şekilde gerçekleştirildiği göstermektedir. Mevcut hata metrikleri dikkate alındığında çok ince hesaplama ağında 3 katına çıkan hesaplama süresi ve yüksek hafıza gerekliliği düşünülünce optimum bir tercih olmamaktadır. Sonuç olarak bu sayısal model için optimum olarak 107297 hücre sayısı ile ince hesaplama ağı tipi tercih edilmiştir. Hesaplama ağındaki hücre boyutu ne kadar büyürse hidrolik sıçramada belirgin şekilde fiziksel olarak olması gereken çevrilerin ve vorteklerin oluşamadığı

görülmektedir. Diğer bir ifadeyle simülasyonun çözünürlüğü kaybolmaktadır. Elbette hesaplama ağının küçülmesi ile çözünürlük artarak vorteks ve çevri oluşumları belirginleşmeye başlamaktadır. Fakat küçültme oranında hesaplama maliyetleri ve hafıza kullanımı dikkate alınmaktadır. Sayısal modelin verimliliği açışından optimum hesaplama ağı niteliksel olarak da seçilmelidir (Şekil 2b).

Tablo 1. Ağ bağımsızlığı çalışması için kullanılan farklı ağ tiplerinin karşılaştırılması

Ağ (Mesh) Tipi	Hücre Sayısı	Hesaplama Süresi (s)	Sayısal Model - C_d	C_d Hata Metriği (%)	Sayısal Model - y_2 (m)	y_2 Hata Metriği (%)	Doğrulama Durumu
Çok Kalın (Coarsest)	9827	141	0,4627	5,95	2,6452	13,11	Başarısız (>%10)
Kalın (Coarse)	21667	324	0,4780	2,84	2,6328	12,47	Başarısız (>%10)
Orta (Medium)	48073	1537	0,4781	2,82	2,4285	2,93	Başarılı (<%10)
İnce (Fine)*	107297	6757	0,4649	5,50	2,2941	2,71	Mükemmel (<%10 ve ideal süre)
Çok İnce (Finest)	241290	19962	0,4696	4,55	2,3563	0,09	Başarılı (<%10 ve aşırı efor)

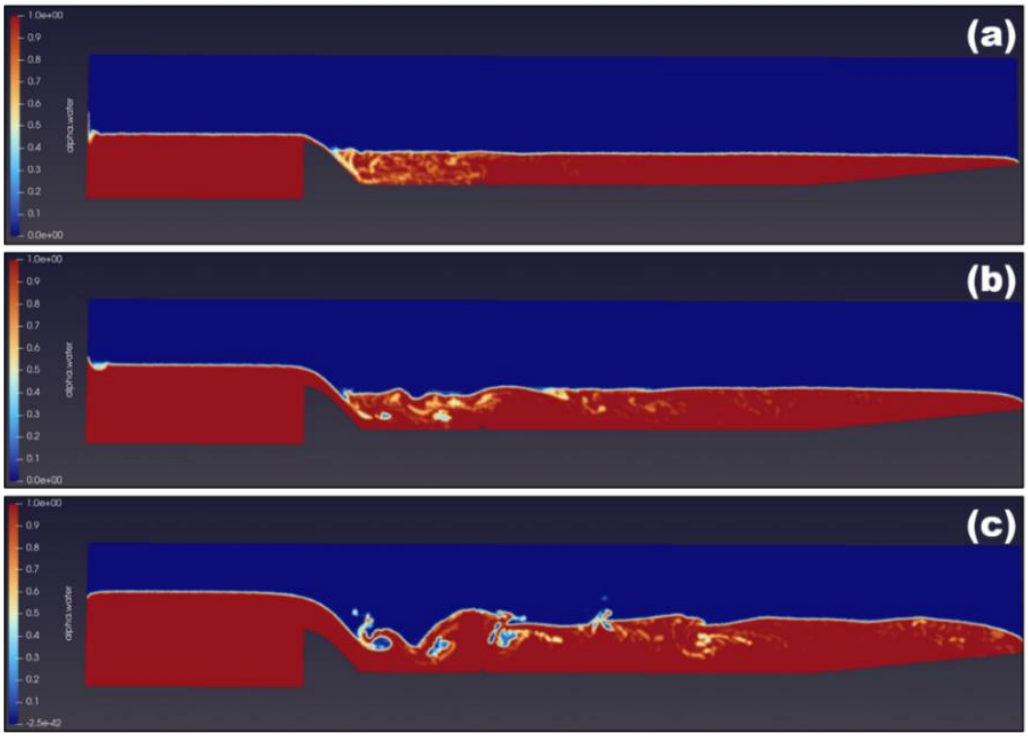
Tablo 2'de verilen hata metrikleri göstermektedir ki ogee profili sonrası türbülans modelinin seçimi sadece sıçrama sonrası y_2 su derinliği ve dolayısıyla enerji sönümlene oranını değil aynı zamanda kret üstü savaklanan debi ile doğrudan ilişkili olan C_d katsayısını da etkilemektedir. Diğer bir ifadeyle savaktaki deşarj kapasitesini etkilemektedir. Spalart-Allmaras türbülans modeli tek denklemli ve görece olarak basit bir türbülans kapama modelidir. Hidrolik sıçrama gibi akış ayrılmalarının ve şiddetli enerji sönümlemelerinin olduğu akış problemlerinde olayın fiziğini yansıtmada burada görüldüğü gibi yetersiz kalmaktadır. Düşüm havuzunda hidrolik sıçrama rulosu oluşmamakta türbülanslı karışım bölgesi son eşiği geçerek süpürülmektedir. Standart k-epsilon modelde boğulmuş bir hidrolik sıçrama görülmektedir. Türbülans kinetik enerjisi fazla hesaplanmıştır. Bu durum y_2 su derinliğindeki hata metriğini düşürebilmektedir. Fakat boğulmuş hidrolik sıçrama ve dolayısıyla yüksek enerji sönümlenmesi C_d parametresinin oldukça yanlış hesaplanmasına yol açmaktadır. Realizable k-epsilon türbülans modeli de bu duruma benzer bir davranış sergilemektedir. Hata metrikleri standart modele göre daha düşük olsa da hala kaotik bir hidrolik sıçrama davranışı görülmektedir. Burada süpürülmüş bir hidrolik sıçramada ziyade belirgin bir çevri oluşamama durumu söz konusudur. LRR – RSM türbülans modeli 6 denklemden oluşan Reynolds gerilmelerinin doğrudan hesaba katıldığı daha kapsamlı bir türbülans kapama modelidir. Fakat bu daha kapsamlı matematiksel yaklaşım türbülans iç yapısını çözmekte oldukça başarılı olsa da hava ile su gibi çok fazlı akımların serbest yüzeylerini doğru yakalamakta yetersiz kalabilmektedir. Hidrolik sıçrama gibi su ile havanın serbest yüzey oluşturarak bir çevri oluşturması gerektiği bir akışkan probleminde ne yazık ki doğru tercih olamamaktadır. Türbülansın iç yapısının tutarlı çözülmesiyle birlikte boyutsuz debi katsayısı oldukça doğru hesaplansa da mansap tarafında sayısal difüzyon meydana gelmektedir ve dolayısıyla tutarsız kabarık bir su seviyesi gözlemlenmektedir. Ayrıca LRR – RSM modelinde gözlemlenen sayısal difüzyonun ve türbülans yapılarındaki tutarsızlığın temel nedeninin, Z ekseninde tek hücre kullanılan 2B çözüm kısıtı olduğu düşünülmektedir. Hidrolik sıçramanın doğasında var olan 3 boyutlu vorteks gerilmeleri ve yanal duvar etkileri 2B modelde baskılandığı için sayısal dengesizlikler meydana gelmiştir. Bu sebeple bu türbülans modelinin 2B model çözüm yaklaşımında kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmaktadır.

k-omega SST modeli sınır tabakası ayrılmalarını ve ters basınç gradyanı altındaki cidara yakın bölgede akımın fiziğini çözmedeki başarısı daha temiz ve belirgin hidrolik sıçrama oluşumuna izin verdiği görülmektedir. Fakat ne yazık ki her iki parametre için de hata metrikleri beklenenin oldukça üzerinde çıkmıştır. İnce hesaplama ağında tabanda cidara yakın bölgede ortalama y^+ değeri 65 civarındadır. Bu değer, yüksek Re duvar fonksiyonları kullanan k-epsilon gibi modellerde ideal aralıkta ($30 < y^+ < 300$) yer alırken, düşük Re sayıları için viskoz alt tabakanın çözülmesini gerektiren k-omega SST modeli ($y^+ \approx 1$) için yetersiz kalmıştır. Dolayısıyla k-omega SST modelinde gözlemlenen yüksek hata oranının modelin yetersizliğinden ziyade ağ konfigürasyonundan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. RNG k-epsilon türbülans modelinde teoride beklenildiği gibi aşırı belirgin çevrilere sahip çok net bir serbest hidrolik sıçrama oluşumu görülmektedir. En önemli belirgin çıktısı bu modelde hidrolik sıçrama kısa sürede yarı

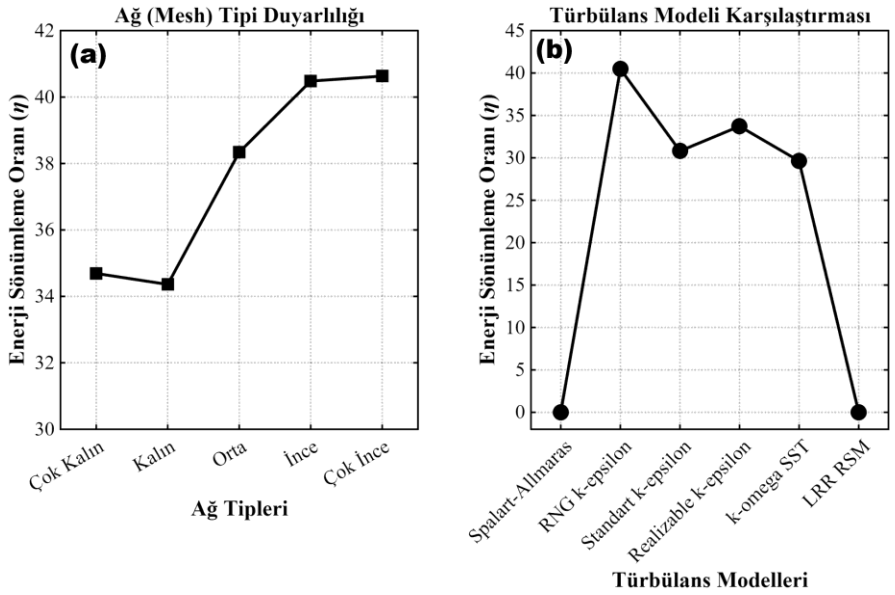
kararlı hale gelmekte su yüzeyi profilinde oldukça pürüzsüz ve kararlı bir rejim görülmektedir. Literatürde de akım çizgisinde ayrılma ve vorteks koşullarının incelenmesinde başarılı olduğu değinilmiştir [11]. Şekil 3'te farklı ağ tiplerinde ve türbülans modellerindeki enerji sönümleme oranlarını verilmektedir. Enerji sönümleme oranı düşüm havuzunda türbülansın başarıyla oluşumuyla ilgili bir yorum sağlamaktadır. Burada ağ seçiminde asimptotik yaklaşım ve RNG k-epsilon modelinin uygunluğu görülmektedir.

Tablo 2. Farklı türbülans modellerinin karşılaştırılması

Türbülans Modeli	Sayısal Model - C_d	C_d Hata Metriği (%)	Sayısal Model - y_2 (m)	y_2 Hata Metriği (%)	Doğrulama Durumu
Spalart-Allmaras	0,4606	6,39	4,4242	87,75	Başarısız (>%10 ve süpürülmüş hidrolik sıçrama oluşumu)
RNG k-epsilon	0,4649	5,50	2,2941	2,71	Mükemmel (<%10 ve ideal serbest yüzey oluşumu)
Standart k-epsilon	0,9210	87,20	2,2926	10,06	Başarısız (>%10 ve boğulmuş hidrolik sıçrama oluşumu)
Realizable k-epsilon	0,7764	57,80	2,2445	6,74	Başarısız (>%10 ve düzensiz serbest yüzey oluşumu)
k-omega SST	0,6657	35,30	2,5892	22,06	Başarısız (>%10 ve savaklanma problemi)
LRR RSM	0,4602	6,46	4,4249	87,82	Başarısız (>%10 ve sayısal difüzyon problemi)



Şekil 2. (a) Kapasite altı rejimde (V=0,1 m/s), (b) Tasarım koşullarında (V=0,6 m/s) ve (c) Aşırı yükleme koşullarında (V=1,8 m/s) hidrolik sıçramaya ait anlık enstantaneler



Şekil 3. (a) Ağ tiplerine ve (b) türbülans modellerine göre enerji sönümleme oranları

4. Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen çıktılar kısaca aşağıda sıralanmıştır:

- Açık kaynak kodlu ve literatürde oldukça kabul gören bir HAD çözücü olan OpenFOAM kullanılarak dolusavak sonrası son eşikli düz bir düşüm havuzunda oluşturulan bir sayısal model hidrolik sıçrama incelenerek başarıyla doğrulanmıştır.
- Modelin doğrulanmasından önce 5 farklı ağ tipi kullanılarak uygun hesaplama ağı çalışması gerçekleştirilmiştir.
- Bu çalışmada hidrolik sıçrama fiziğini anlamakta kritik rol oynayan uygun türbülans modelinin seçimi için farklı türbülans modelleri incelenmiştir. Literatüre uygun olarak en iyi sonucu RNG k-epsilon modelinin verdiği görülmüştür. Hidrolik sıçramanın gerekliliği olarak enerji sönümleme oranı da dikkate alındığında en iyi sonuç bu modelde görülmektedir.
- Kapasite altı rejimde, tasarım koşullarında ve aşırı yükleme koşullarında doğrulanmış sayısal modelde düşüm havuzunun hidrolik sıçrama performansı karşılaştırılmıştır. Kapasite altı rejimde boğulmuş bir hidrolik sıçrama gözlemlenirken aşırı yükleme koşullarında süpürülen kaotik bir sıçrama yapısı gözlemlenmiştir (Şekil 2). Böylece tasarım limitlerini de HAD metodu ile başarılı şekilde test edilebileceği görülmektedir.
- Bu çalışmada geliştirilen sayısal modelin performansı USBR tasarım standartları ve teorik ampirik denklemler baz alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın kısıtları olarak kabul edilen 2B çözüm yaklaşımı ve fiziksel veri eksikliği göz önüne alınarak, ilerleyen çalışmalarda sayısal model sonuçlarının laboratuvar koşullarında literatürdeki fiziksel deney verileriyle doğrulanması hedeflenmektedir.
- Bu sayısal model sadece gelecekte yapılacak hidrolik sıçrama modelleri için öncü bir çalışma olmaktadır. İlerleyen çalışmalarda olayın fiziğini daha doğru şekilde yansıtacak yanal etkileri de dikkate alacak 3B modeller oluşturulması hedeflenmektedir. Benzer şekilde literatürde USBR gibi standartlarca belirlenen düşüm havuzlarının performans analizi gerçekleştirilecektir.

5. Kaynaklar

[1] Imanian, H., Mohammadian, A. (2019). Numerical simulation of flow over ogee crested spillways under high hydraulic head ratio. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 13(1), 983-1000, doi:10.1080/19942060.2019.1661014.

[2] Kocaer, Ö., Yarar, A. (2020). Experimental and Numerical Investigation of Flow Over Ogee Spillway. Water Resources Management, 34(13), 3949-3965.

[3] Luo, C., Mohammadian, A., Nistor, I., Imanian, H. (2024). Experimental and numerical study of the gated and ungated ogee spillway. Flow measurement and instrumentation, 97, 102561, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2024.102561.

[4] Meng, X., Zhang, C., Zhang, B., Wu, X., Wang, W., Wang, H., Yawei, H., Benson, D. (2024). Application Research of a High Turbulence Numerical Simulation Technique in a USBR Type III Stilling Basin. Water, 16(24), doi:3568.10.3390/w16243568.

[5] Siva Parvathi, I., Neelofer, A. (2024). CFD analysis of flow over ogee spillway with varying upstream face slope. Journal of Physics: Conference Series, 2779, 012024, doi:10.1088/1742-6596/2779/1/012024.

[6] Viti, N., Valero, D., Gualtieri, C. (2018). Numerical simulation of hydraulic jumps. Part 2: Recent results and future outlook. Water, 11(1), 28, doi:10.3390/w11010028.

[7] Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., López-Jiménez, P. A. (2016). Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. Environmental modelling & software, 80, 322-335, doi:10.1016/j.envsoft.2016.02.018.

[8] The OpenFOAM Foundation (2025). OpenFOAM user guide v13. CFD Direct.

[9] USBR (1987). Design of small dams. Water Resources Technical Publication Series.

[10] Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME, 130(7), doi:10.1115/1.2960953.

[11] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., Speziale, C.G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Physics of fluids. A: Fluid dynamics, 4, 1510–1520.

Nehir Hidrokinetik Enerjisi Uygulamalarında Düşey Eksenli Türbin Seçimine Yönelik Deneysel Bir Karşılaştırma

Derya KARAKAYA*
Şırnak Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şırnak
d.karakaya@sirnak.edu.tr

Songül KARAKAYA
Dokuz Eylül Üniversitesi, İstatistik Bölümü, İzmir
songul.karakaya@ogr.deu.edu.tr

Bülent Çağlar ÖZCAN
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara
bcozcan@gmail.com

Yasemin ELDAYIH KANBER
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
yaseminеldayih@gmail.com

Şebnem ELÇİ
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
sebnemelci@iyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler: deneysel hidrodinamik, hidrokinetik enerji, güç katsayısı, düşey eksenli türbin

1. Amaç

Düşey eksenli hidrokinetik türbinler, akan su akımlarından enerji elde etmek için umut verici bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmaların büyük bölümü ya sayısal yaklaşımlara ya da tek bir türbin tipinin izole biçimde değerlendirildiği deneysel çalışmalara dayanmakta; farklı türbin geometrilerinin birebir aynı deney düzeneğinde, aynı akış koşulları altında karşılaştırıldığı kapsamlı çalışmalar ise sınırlı sayıda ve genellikle ikili (türbin çiftleri arasında) değerlendirmelerle sınırlı kalmaktadır. Bu durum, farklı türbin tiplerinin performansı arasında doğrudan ve nesnel bir kıyaslama yapılmasını güçleştirmektedir.

Bu çalışmanın literatüre temel katkısı ve mevcut çalışmalardan ayrıldığı nokta, Gorlov, Darrieus ve Savonius türbinlerinin birebir aynı boyut, aynı kanal ve aynı akış koşulları altında, tutarlı ve tek tip bir deneysel çerçevede karşılaştırılmış olması ile geleneksel güç/tork katsayısı ölçümlerine ek olarak ADV tabanlı iz bölgesi ölçümleriyle türbin-akış etkileşiminin de nicel olarak ortaya konmasıdır. Bu çalışmanın amacı, söz konusu üç türbin tipinin güç ve tork katsayılarını bu birleşik deneysel çerçevede karşılaştırmalı olarak incelemek; ayrıca türbin arkasında oluşan iz bölgesinin akış hızı dağılımı üzerindeki etkisini ortaya koyarak hidrokinetik uygulamalar için akış koşuluna bağlı türbin seçimine yönelik pratik bir değerlendirme sunmaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Deneyler, Ankarada bulunan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) Hidrolik Model Laboratuvarı'ndaki 39 m uzunluğunda, 0,6 m yüksekliğinde ve 0,5 m genişliğinde açık kanal sisteminde yürütülmüştür (Şekil 1). Şekil 2a'da görüldüğü üzere, kanal girişi test bölümüne giren akışın üniform bir profile sahip olmasını sağlar. Aynı zamanda, Şekil 2b'de gösterilen çıkış koşulları, mansap su derinliğinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır.

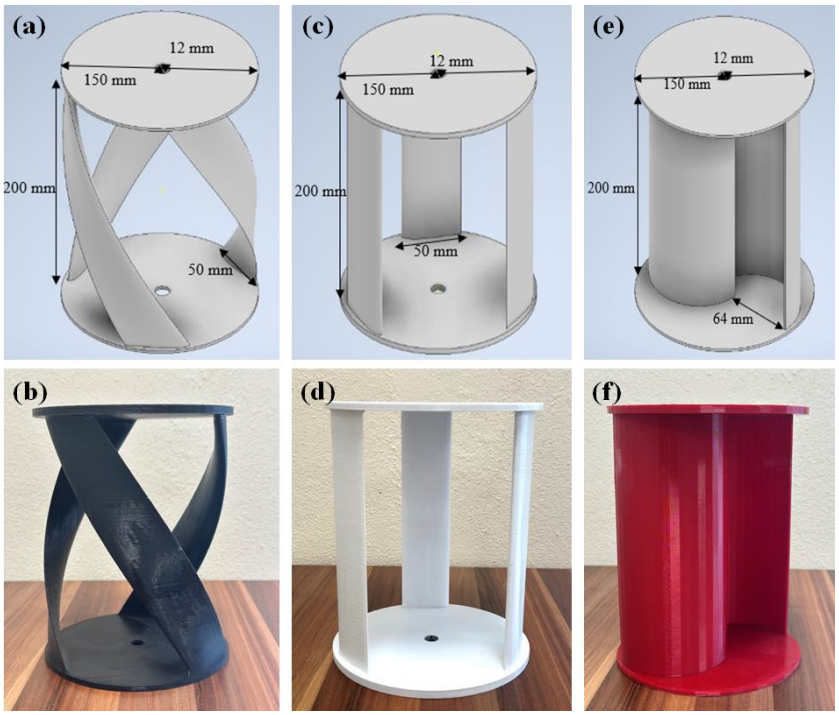
Türbin test düzeneği, kanal girişinin 19 metre mansabına ve kontrol sürgülü vanasının (mansap uç kesiti) 18,6 metre membasına yerleştirilerek; kabarma etkileri ile giriş-çıkış etkilerini en aza indirmeye yetecek kadar mesafe sağlanmıştır.



Şekil 1. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Hidrolik Model Laboratuvarı, (a) kanal girişi ve (b) kanal çıkışı [1].

2.1 Türbin Modelleri

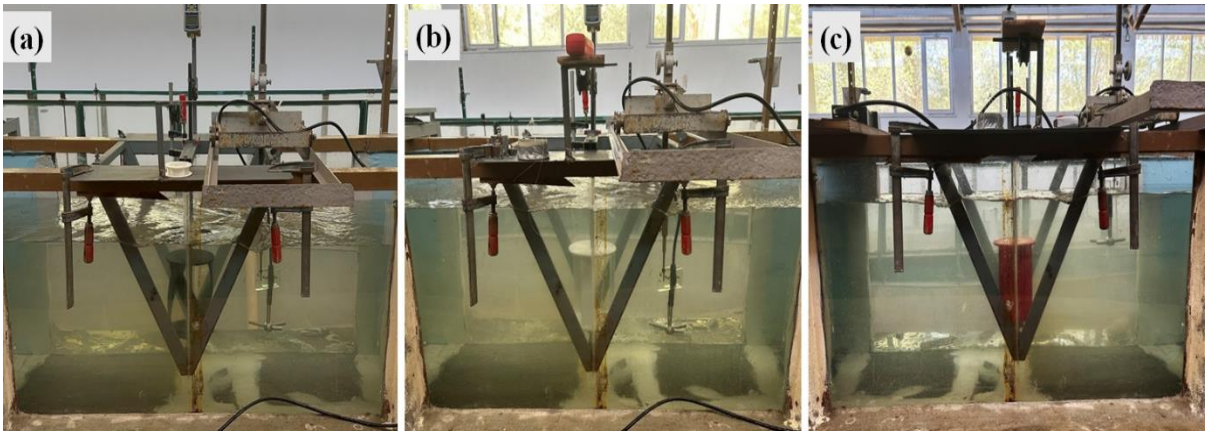
Çalışma kapsamında Gorlov, Darrieus ve Savonius tipi üç düşey eksenli türbin, aynı yükseklik (150 mm), çap (200 mm) ve şaft çapına (12 mm) sahip olacak şekilde tasarlanarak PETG filament ile 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir (Şekil 2). Kanat sayısı Gorlov ve Darrieus türbinlerinde 3, Savonius türbininde 2 olup; Gorlov ve Darrieus kanatlarında 50 mm veter uzunluğuna sahip S-1046 kanat profili kullanılmıştır. Doluluk oranı Gorlov için 0,35, Darrieus için 0,32 olarak hesaplanmıştır. Gorlov türbini 43,7°'lik helis açısına sahip helisel kanatlı, Darrieus türbini düz kanatlı, Savonius türbini ise 0,256 örtüşme oranına ve 86 mm kanat çapına sahip yarım daire kesitli rotor tipindedir. Türbinler kanal derinliğinin ortasına, serbest yüzey ve taban ile eşit boşluk kalacak şekilde yerleştirilmiş ve tüm konfigürasyonlarda %12'lik sabit bir tıkanıklık oranı korunmuştur.



Şekil 2. Gorlov ((a), (b)), Darrieus ((c), (d)) ve Savonius ((e), (f)) türbinlerinin üç boyutlu çizimleri ve 3D baskı çıktıları [1].

2.2 Deney Düzeneği ve Ölçüm Yöntemi

Türbin miline uygulanan yük, halat frenli dinamometre sistemiyle kontrol edilmiş; gerilim farkından hesaplanan tork ve dijital takometre ile ölçülen açısal hızdan mekanik güç elde edilmiştir [2,3]. Akış hızı, akustik Doppler prensibiyle çalışan bir el tipi ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) cihazı ile ölçülmüş; her türbin için akış eksenine dik kesitte, türbin öncesinde ve sonrasında dokuzar noktada hız verisi toplanmıştır. Deneyler; 125, 190 ve 250 L/s debilere karşılık gelen 0,5; 0,75 ve 1,0 m/s ortalama akış hızlarında, her koşul için üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler analizde kullanılmıştır. Ölçüm belirsizlikleri, Moffat'ın kök kareler toplamı (RSS) yöntemiyle değerlendirilmiştir [4].



Şekil 3. Kanal akışı sırasında Gorlov (a), Darrieus (b) ve Savonius (c) türbinlerinin kanal içerisinde yan görünümü

2.3 Performans Katsayılarının Hesaplanması

Türbin miline etkiyen tork T (Nm), gergin ve gevşek halat taraflarındaki kütle farkından;

$$T = (S_1 - S_2) \times g \times r \quad (1)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır; burada S_1 ve S_2 halat gerilim kütleleri, g yer çekimi ivmesi ve r şaft yarıçapıdır.

Açısal hız, ω;

$$\omega = 2\pi N/60 \quad (N\text{: dakikadaki devir sayısı}) \quad (2)$$

Mekanik güç, P;

$$P = T \times \omega \quad (3)$$

Güç katsayısı, C_P;

$$C_P = P/(0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3) \quad (4)$$

Tork katsayısı, C_T;

$$C_T = T/(0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot R) \quad (5)$$

Uç hız oranı, (TSR), λ;

$$\lambda = (R \cdot \omega)/v \quad (6)$$

bağıntılarıyla hesaplanmıştır.

Burada ρ suyun yoğunluğu, A rotorun süpürdüğü alan, v akış hızı ve R türbin yarıçapıdır.
Deneylerde elde edilen TSR değerleri türbin tipine göre yaklaşık 1,0 ile 2,3 arasında değişmiş; Darrieus türbini en yüksek C_P değerine $\lambda \approx$ 1,8–2,0 aralığında, Savonius türbini ise daha düşük bir çalışma aralığında ($\lambda \approx$ 1,0–1,3) maksimum torka ulaşmıştır.

2.4 Ölçek Etkileri ve Sınırlılıklar

Deneylerde kullanılan akış hızı (0,5–1,0 m/s) ve türbin çapı (150 mm) dikkate alındığında Reynolds sayısı yaklaşık $7{,}5\times10^4$ ile $1{,}5\times10^5$ arasında değişmekte olup bu aralık hidrokinetik türbin uygulamalarında görülen türbülanslı akış rejimini temsil etmektedir. Çalışma laboratuvar ölçeğinde yürütüldüğünden ölçek etkilerinin tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir; tam ölçekli nehir koşullarında iz gelişimi, türbülans yapısı ve akış etkileşimlerinde farklı davranışlar görülebilir. Ayrıca türbin prototiplerinin PETG ile 3 boyutlu baskı yöntemiyle üretilmiş olması, gerçek uygulamalarda kullanılan metal/kompozit malzemelere göre daha düşük bir model ağırlığına ve farklı bir atalet/sürtünme davranışına yol açabilmektedir; bu nedenle mutlak güç ve tork değerlerinin tam ölçekli, gerçek malzemeden üretilmiş türbinlere doğrudan aktarılmasında dikkatli olunmalı, sonuçlar öncelikle türbin tipleri arasındaki karşılaştırmalı performans sıralaması açısından değerlendirilmelidir.

3. Değerlendirme

Elde edilen sonuçlara göre Darrieus türbini, test edilen tüm akış hızlarında en yüksek güç katsayısına ulaşmış ve performansı akış hızıyla birlikte istikrarlı biçimde artmıştır (C_p = 0,227'den 0,279'a, 0,5–1,0 m/s aralığında). Gorlov türbini ise daha ölçülü fakat kararlı bir eğilim göstermiş, C_p değeri 0,192'den 0,232'ye yükselmiştir; bu durum helisel geometrinin akış değişimlerine karşı daha öngörülebilir bir davranış sağladığına işaret etmektedir. Savonius türbini ise düşük hızlarda (0,5 m/s'de C_p = 0,215) diğer iki türbine yakın bir verim sunarken, sürükleme kuvvetlerinin baskın hale gelmesiyle yüksek hızda belirgin bir verim kaybı yaşamış (1,0 m/s'de C_p = 0,174) ve düşük hızlı, küçük ölçekli uygulamalar için daha uygun bulunmuştur (Tablo 1). Elde edilen bulgular ilgili literatürle de tutarlılık göstermektedir. Gorlov türbini için bulunan maksimum Cp değeri (0,232), Chen vd. [5] tarafından ikiz helisel hidrokinetik türbinler için raporlanan değerle (C_p = 0,2233) yakın uyum içindedir ve Chettiar vd. [6] ile Zhang vd. [7]'nin Gorlov türbinlerine ilişkin deneysel bulgularını desteklemektedir. Darrieus türbininin akış hızıyla birlikte artan verimi, Patel vd. [8] ve Hoerner vd. [9]'un düz kanatlı Darrieus türbinlerinde gözlemlediği genel eğilimle örtüşmekte; Darrieus'in Gorlov'a üstünlüğü ise Espina-Valdés vd. [10]'nin doğrudan karşılaştırmalı sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Savonius türbininin düşük hızlarda yüksek, yüksek hızlarda ise düşen verimi, Salleh vd. [11] ve Nag ve Sarkar [12]'ın Savonius türbinlerinin düşük uç hız oranlarında (TSR) yüksek başlangıç torkuna sahip olduğuna dair bulgularıyla kısmen uyumludur. Bu çapraz doğrulamalar, çalışmada elde edilen karşılaştırmalı performans sıralamasının güvenilirliğini artırmaktadır.

Tablo 1. Türbinlerin farklı akış hızlarındaki maksimum güç katsayıları (C_p)

Türbin	C_P(0,5 m/s)	C_P(0,75 m/s)	C_P(1,0 m/s)
Gorlov	0,192	0,209	0,232
Darrieus	0,227	0,264	0,279
Savonius	0,215	0,197	0,174

ADV ölçümlerinden elde edilen hız haritaları, kaldırma kuvveti esasına dayalı Darrieus ve Gorlov türbinlerinin arkasında daha sınırlı ve kısmen toparlanabilen bir iz bölgesi oluştuğunu; buna karşın sürükleme esaslı Savonius türbininin çok daha geniş ve derin bir hız kaybı bölgesi yarattığını göstermektedir. Nicel olarak, 1,0 m/s'lik akış hızında en yüksek göreli hız kaybı Savonius türbininde (~%68) gözlenirken, bu oran Darrieus türbininde ~%55, helisel geometrisi sayesinde daha dağınık bir iz bırakan Gorlov türbininde ise ~%30 ile en düşük seviyede kalmıştır. Aynı hızda, türbin arkasındaki mutlak hız değerleri de bu eğilimi doğrulamaktadır: Savonius arkasında hız 0,34 m/s'ye kadar düşerken, Gorlov türbininin bir kısmı akışı hızlandırarak 1,43 m/s'ye kadar çıkmıştır. Düşük hızda (0,5 m/s) Savonius iz bölgesinde hız 0,18 m/s'ye kadar gerilemiş, buna karşın Gorlov ve Darrieus arkasında hız toparlanması sırasıyla ~0,63 m/s ve ~0,64 m/s'ye ulaşmıştır. Bu bulgular, Savonius türbininin akıştan enerjiyi daha güçlü biçimde çektiğini, buna karşılık Darrieus ve Gorlov türbinlerinin akış bozulmasını sınırlı tutmaları nedeniyle çoklu türbin yerleşimlerinde daha uygun olabileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan belirsizlik analizinde güç katsayısı için %2,05–2,22, tork katsayısı için %2,29–2,43 aralığında görece düşük belirsizlik oranları elde edilmiş, bu da sonuçların güvenilir olduğunu desteklemiştir.

4. Sonuçlar

Darrieus türbini, orta ve yüksek akış hızlarında en yüksek güç katsayısına ulaşarak kaldırma kuvveti esaslı çalışmanın avantajını ortaya koymuştur.

Gorlov türbini, test edilen hız aralığının tamamında kararlı ve öngörülebilir bir performans sergileyerek değişken akış koşullarına uyum sağlayabilme potansiyeli göstermiştir.

Savonius türbini düşük hızlarda rekabetçi bir verim sunmuş, ancak sürükleme etkisinin artmasıyla yüksek hızlarda verim kaybına uğramış; bu nedenle düşük akışlı, küçük ölçekli uygulamalar için daha uygun bulunmuştur.
ADV tabanlı iz bölgesi ölçümleri, kaldırma esaslı türbinlerin (Darrieus, Gorlov) akış bozulmasını sınırlı tutarak çoklu türbin dizilimlerine daha uygun olabileceğini; sürükleme esaslı Savonius türbininin ise daha geniş bir hız kaybı bölgesi oluşturduğunu göstermiştir.

Sonuçlar, türbin seçiminin yalnızca maksimum verim değerine göre değil, sahaya özgü akış hızı ve uygulama ölçeğine göre yapılması gerektiğini vurgulamaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Karakaya, D., Karakaya, S., Özcan, B. Ç., Kanber, Y. E., Elçi, S. (2026). Experimental Study on the Performance of Three Vertical Axis Hydrokinetic Turbines. International Journal of Energy Research, 2026:2341781.

[2] A. Zhang, S. Liu, Y. Ma, C. Hu, and Z. Li, “Field Tests on Model Efficiency of Twin Vertical Axis Helical Hydrokinetic Turbines,” Energy 247 (2022): 123376.

[3] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, P. H. Tion, and Z. Mohamed Kassim, “Comparison of the Power Performance of a Conventional Savonius Turbine With Various Deflector Configurations in Wind and Water,” Energy Conversion and Management 247 (2021): 114726.

[4] Moffat, R. J. (1988). Describing the Uncertainties in Experimental Results. Experimental Thermal and Fluid Science, 1(1), 3-17.

[5] D. Chen,Y.Ma,C.Hu,andT.Zhao,“EfficiencyOptimizationof Twin Vertical-Axis Helical Hydrokinetic Turbines (VAHHTs) Based on Taguchi Method,” Applied Ocean Research 138 (2023): 103618

[6] N. Chettiar, S. Narayan, J. N. Goundar, and A. Deo, “Design of a Gorlov Turbine for Marine Current Energy Extraction,” Applied Mechanics and Materials 772 (2015): 556–560.

[7] A. Zhang, S. Liu, Y. Ma, C. Hu, and Z. Li, “Field Tests on Model Efficiency of Twin Vertical Axis Helical Hydrokinetic Turbines,” Energy 247 (2022): 123376.

[8] V. Patel, T. I. Eldho, and S. V. Prabhu, “Experimental Investigations on Darrieus Straight Blade Turbine for Tidal Current Application and Parametric Optimization for Hydro Farm Arrangement,” International Journal of Marine Energy 17 (2017): 110–135.

[9] S. Hoerner, S. Abbaszadeh, T. Maître, O. Cleynen, and D. Thévenin, “Characteristics of the Fluid–structure Interaction Within Darrieus Water Turbines With Highly Flexible Blades,” Journal of Fluids and Structures 88 (2019): 13–30.

[10] R. Espina-Valdés, A. Gharib-Yosry, R. Ferraiuolo, A. Fernández Jiménez, and V. M. Fernández-Pacheco, “Experimental Comparison Between Hydrokinetic Turbines: Darrieus vs. Gorlov,” Environmental Sciences Proceedings 21, no. 1 (2022): 26.

[11] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, and Z. Mohamed-Kassim, “Experimental Investigation on the Effects of Deflector Angles on the Power Performance of a Savonius Turbine for Hydrokinetic Applications in Small Rivers,” Energy 247 (2022): 123432.

[12] A. K. Nag and S. Sarkar, “Experimental and Numerical Study on the Performance and Flow Pattern of Different Savonius Hydrokinetic Turbines With Varying Duct Angle,” Journal of Ocean Engineering and Marine Energy 6, no. 1 (2020): 31–53.

Göllerin Trofik Durum Olasılıklarının Hesaplanması Amaçlı Bir Yazılımın Geliştirilmesi

Alpaslan EKDAL*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak/İstanbul, 0000-0002-2130-2062
ekdala@itu.edu.tr

Cenk GÜREVİN
İstanbul Üniversitesi, Su Bilimleri Fakültesi, Kalenderhane Mahallesi Onaltı Mart Şehitleri Caddesi, No: 2, Vezneciler, 34134 Fatih/İstanbul, 0000-0002-5354-949X
cgurevin@istanbul.edu.tr

Melike GÜREL
İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak/İstanbul, 0000-0002-2130-2062
gurelme@itu.edu.tr

Ali ERTÜRK
İstanbul Üniversitesi, Su Bilimleri Fakültesi, Kalenderhane Mahallesi Onaltı Mart Şehitleri Caddesi, No: 2, Vezneciler, 34134 Fatih/İstanbul, 0000-0002-3532-2961
erturkali@istanbul.edu.tr

Anahtar Kelimeler: OECD trofik durum kategorileri, ötrofikasyon, besin elementi yükleri, su kalitesi

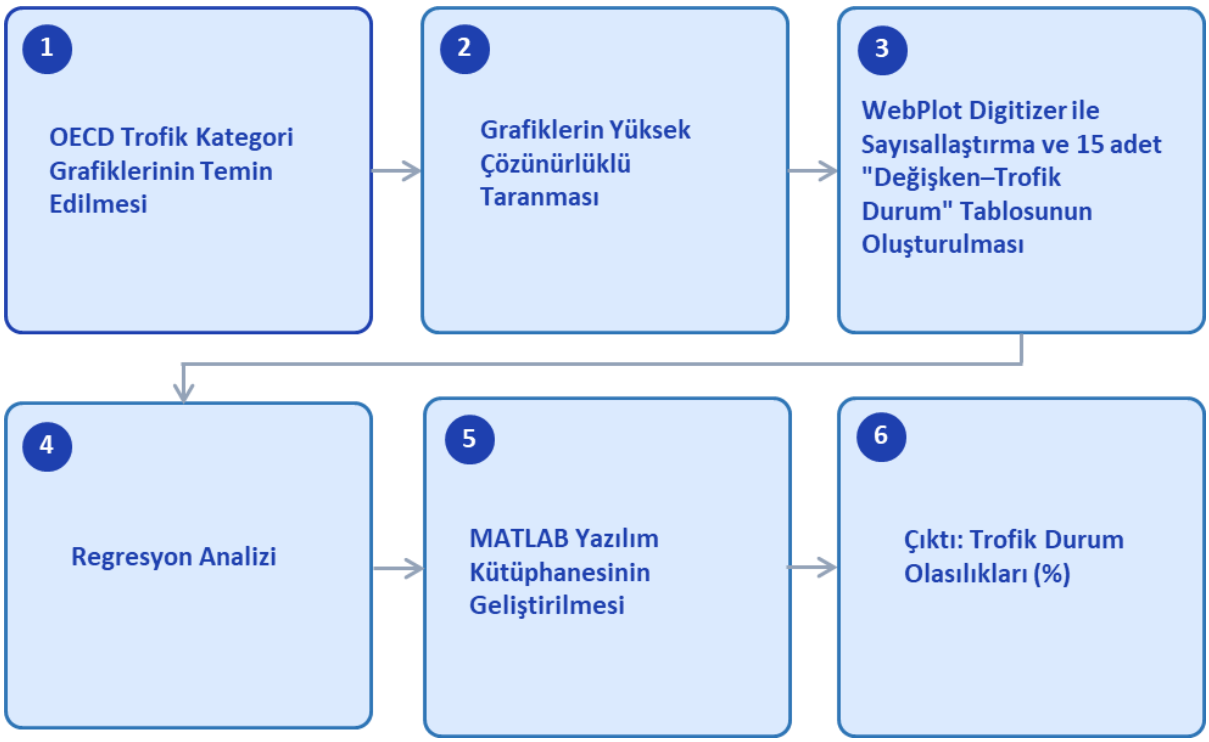
1. Amaç

Ötrofikasyon hem Türkiye'de hem de dünyada iç su ekosistemleri sağlığı açısından dikkate alınması gereken önemli bir süreçtir. İnsan faaliyetleri kaynaklı aşırı besin elementi yükleriyle meydana gelen ve bu nedenle doğal olmayan ötrofikasyonun özellikle durgun su ekosistemlerinin hem sağlıklarına hem de su kalitelerine olumsuz etkileri olduğu ortaya konulmuştur [1]. Farklı durgun su ekosistemlerinin aşırı besin elementi yüklerine verdikleri ekosistem tepkileri analizleri oldukça zorlaşabilen çok çeşitli semptomlara ya da ekosistemdeki canlı türlerinin miktar ve dağılımlarında değişimlere neden olduğundan, su ekosistemlerinin trofik durumlarının belirlenmesi için basit indekslerin geliştirilmesi gerekli olmuştur. Bu amaçla durgun suların trofik durumlarının belirlenebilmesi için 1960'lı yılların sonundan itibaren Carlson Trofik Seviye İndeksi [2], trofik kategoriler için önerilen sabit sınır değerler [3] ve OECD trofik kategori olasılık dağılımları [3] gibi birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden ilk ikisinin uygulanması nispeten basit olmakla birlikte ekosistem özelliklerinden bağımsız olarak su ortamındaki Toplam Fosfor (TP), Klorofil-a (CHLA), ve Seki diski derinliği (SD) için aynı trofik durum değerleri elde edilmekte, başka bir deyişle ekosistemler arasındaki farklılıklar en azından tekil değişkenler düzeyinde dikkate alınmamaktadır. Üçüncü yöntem ise bu değişkenlerin herhangi bir değerine karşı gelen birden çok trofik durumun olasılık dağılımını verdiğinden değişik su ekosistemlerinin farklılıklarını bir ölçüde dikkate almaktadır. Ancak bu yöntemde ilgili olasılık dağılımları grafik olarak verildiğinden uygulanması diğer iki yöntemden daha zordur ve ilgili trofik durum olasılığı dağılımı hesaplarını kullanıcının grafik okumasına gerektirmeden yapan genel kullanıma açık bir yazılım bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, OECD trofik kategori olasılık dağılımları yöntemine göre, üç trofik durum değişkenini (TP, CHLA ve SD) girdi olarak alan ve beş trofik durumun (ultra-oligotrofik, oligotrofik, mezotrofik, ötrofik ve hipertrofik) gerçekleşme olasılıklarını hesaplayarak çıktı olarak veren bir yazılım kütüphanesinin geliştirilmesidir.

2. Materyal ve Yöntem

[3] tarafından grafik olarak yayınlanan OECD trofik kategori olasılık dağılımları yüksek çözünürlüklü tarandıktan sonra Webplot Digitizer yazılımı [4] ile sayısallaştırılıp, ilgili üç trofik durum değişkeni ve beş trofik durum için toplam 15 adet "değişken değeri-trofik durum" tablosu elde edilmiştir. Hesap tablosu işleme platformu Micrososoft Excel'in sunduğu regresyon analizi işlev ve eklentileri kullanılarak elde edilen hesap tablolarının tümünün ordinat değerlerinin yükselmesi ve azalması için bağımsız TP, CHLA ve SD değişkenlerinin ayrı ayrı yüksek dereceden (5. veya 6.) polinom katsayıları elde edilmiştir. Toplam

30 tane olan polinomların tümü MATLAB programlama dili kullanılarak her bir trofik durum değişkeni için üç ayrı kütüphane fonksiyonu (TP_TrophicStatus, CHLA_TrophicStatus ve SD_TrophicStatus) içine kodlanmıştır. Elde edilen 30 polinomun tümünün hangi bağımsız değişken aralıklarında geçerli olduğu ve trofik durumlar açısından da tutarlılığı kontrol edilerek matematiksel işlem anlamında güvenilir sonuç vermeleri sağlanmıştır. Çalışmada uygulanan adımlara ait akış şeması Şekil 1 ile verilmektedir.



Şekil 1. Çalışmaya ait akış şeması

3. Değerlendirme

Geliştirilen yazılım bileşeni hem MATLAB konsolundan interaktif olarak hem de daha karmaşık ve büyük bilgisayar uygulamalarına bağlı bir kütüphane fonksiyonu gibi çağırılabilmektedir. Yazılım; skaler, vektör ve matris biçimlerinde TP, CHLA ve SD girdilerini alabilmekte ve girdiler ile aynı biçimde trofik durum olasılıklarını üretebilmektedir. Bu durumda, tekil TP, CHLA ve SD değerleri için bireysel işlemler yapılması yerine tek işlem ile tüm sonuçları elde edebildiğinden, ilgili kütüphane fonksiyonları hem gelişmiş su kalitesi yönetimi uygulama yazılımları geliştiren programcılara hem de MATLAB konsolundan interaktif ya da script tabanlı işlem yapan bilim insanları ve mühendislere önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örnek bir bilgisayar uygulaması Şekil 2 ile verilmektedir.

Geliştirilen örnek uygulama; Sapanca, Uluabat ve Balık Gölleri için sırasıyla [5], [6] ve [7] tarafından yapılan çalışmalardan yayınlanan konuma ve zamana göre ortalaması alınmış toplam fosfor, klorofil A ve seki diski derinliği verileri kullanılarak çalıştırılmıştır. Uygulama MATLAB kütüphane fonksiyonlarını doğrudan çağırmakta olup sonuçları internet veya başka bir kaynaktan bağımsız olarak verebilmektedir. Ayrıca, başka göllerin verisi girilerek farklı sonuçlar da elde edilebileceği gibi kütüphane fonksiyonlarının vektör özellikleri kullanılarak ekran çıktısı yerine doğrudan tablo oluşturacak şekilde yeniden programlanması mümkündür. Ancak, bu imkanlar bu çalışma kapsamındaki yer kısıtı nedeniyle gösterilmemiştir. Geliştirilen araçla elde edilen ve Şekil 2 ile verilen sonuçlar [3] tarafından verilen OECD trofik kategori olasılık dağılımları grafikleri üzerine eklenerek karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3 ile gösterilen bu karşılaştırmadan sonuçların grafikte verilen değerlerle uyumunun oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Geliştirilen uygulamanın grafik üzerinden değerlendirmeye göre bir üstünlüğü ise geliştirilen uygulamada grafikte normalizasyon yapılarak belirli bir konsantrasyonda farklı trofik kategoriler için hesaplanan olasılık değerlerinin toplamının 1'e eşit olmasının sağlanmasıdır.

```
clc;

DurgunSular = {'SAPANCA GÖLÜ', 'ULUABAT GÖLÜ', 'BALIK GÖLÜ'};
TP          = [54.70, 179.00, 70.00];
CHLA        = [ 5.17,  17.97, 45.13];
SD          = [ 5.00,   0.57,  0.43];

NumWaterbodides = numel(DurgunSular);

for WB = 1:NumWaterbodides

    [  TP_Hyper,   TP_Eutro,   TP_Meso, TP_Oligo  ,   TP_Ultraoligo] = ...
        TP_TrophicStatus  (TP  (WB));

    [CHLA_Hyper, CHLA_Eutro, CHLA_Meso, CHLA_Oligo, CHLA_Ultraoligo] = ...
        CHLA_TrophicStatus(CHLA(WB));

    [  SD_Hyper,   SD_Eutro,   SD_Meso, SD_Oligo  ,   SD_Ultraoligo] = ...
        SD_TrophicStatus  (SD  (WB));

    fprintf('-------------------------------------------\n');
    fprintf(['DURGUN SU            : ', DurgunSular{WB}, '\n']);
    fprintf('-------------------------------------------\n');
    fprintf('Toplam fosfor        : %6.2f mg/m^3\n', TP  (WB));
    fprintf('Klorofil-A           : %6.2f mg/m^3\n', CHLA(WB));
    fprintf('Seki diski derinliği : %6.2f m\n'     , SD  (WB));
    fprintf('için trofik durum yüzdeleri\n\n');

    fprintf('                ');
    fprintf('       TP      CHLA        SD');
    fprintf('\nUltraoligotrofik');
    fprintf('%10.2f', 100*[TP_Ultraoligo, CHLA_Ultraoligo, SD_Ultraoligo]);
    fprintf('\n     Oligotrofik');
    fprintf('%10.2f', 100*[     TP_Oligo,      CHLA_Oligo,      SD_Oligo]);
    fprintf('\n      Mezotrofik');
    fprintf('%10.2f', 100*[      TP_Meso,       CHLA_Meso,       SD_Meso]);
    fprintf('\n         Ötrofik');
    fprintf('%10.2f', 100*[     TP_Eutro,      CHLA_Eutro,      SD_Eutro]);
    fprintf('\n     Hipertrofik');
    fprintf('%10.2f', 100*[     TP_Hyper,      CHLA_Hyper,      SD_Hyper]);
    fprintf('\n\n');
end
```

Örnek uygulama

```
-------------------------------------------
DURGUN SU            : SAPANCA GÖLÜ
-------------------------------------------
Toplam fosfor        :  54.70 mg/m^3
Klorofil-A           :   5.17 mg/m^3
Seki diski derinliği :   5.00 m
için trofik durum yüzdeleri

                        TP      CHLA        SD
Ultraoligotrofik      0.00      0.00      1.90
     Oligotrofik      2.53      8.34     24.33
      Mezotrofik     39.37     53.28     53.50
         Ötrofik     53.06     35.70     19.17
     Hipertrofik      5.04      2.68      1.10

-------------------------------------------
DURGUN SU            : ULUABAT GÖLÜ
-------------------------------------------
Toplam fosfor        : 179.00 mg/m^3
Klorofil-A           :  17.97 mg/m^3
Seki diski derinliği :   0.57 m
için trofik durum yüzdeleri

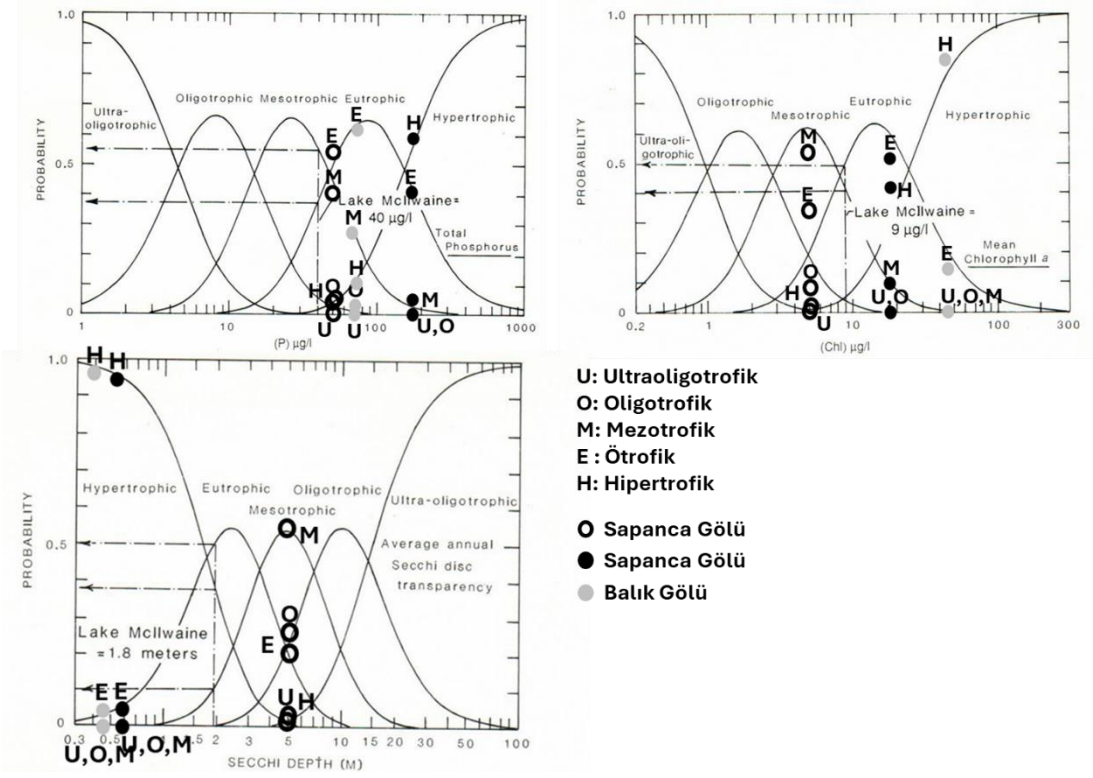
                        TP      CHLA        SD
Ultraoligotrofik      0.00      0.00      0.00
     Oligotrofik      0.00      0.00      0.00
      Mezotrofik      2.59      5.39      0.00
         Ötrofik     40.46     52.28      5.20
     Hipertrofik     56.95     42.33     94.80

-------------------------------------------
DURGUN SU            : BALIK GÖLÜ
-------------------------------------------
Toplam fosfor        :  70.00 mg/m^3
Klorofil-A           :  45.13 mg/m^3
Seki diski derinliği :   0.43 m
için trofik durum yüzdeleri

                        TP      CHLA        SD
Ultraoligotrofik      0.00      0.00      0.00
     Oligotrofik      1.70      0.00      0.00
      Mezotrofik     26.92      0.00      0.00
         Ötrofik     61.32     15.37      3.15
     Hipertrofik     10.06     84.63     96.85
```

Örnek uygulamanın ekran çıktısı

Şekil 2. İlgili değişkenleri girdi olarak alarak trofik durum yüzdelerini veren bilgisayar uygulaması



Şekil 3. Uygulamada elde edilen sonuçların [3] tarafından verilen OECD trofik kategori olasılık dağılımları grafikleri ile karşılaştırılması

4. Sonuçlar

Bir önceki bölümde verilen örnek uygulamada da görülmekte olduğu gibi, [3]'te verilen grafikleri okuyup trofik durumları elle belirlemek yerine, geliştirilen yazılım kütüphanesi kullanılarak trofik durum olasılıklarını doğrudan hesaplayan bilgisayar uygulamalarının geliştirilmesi mümkündür. Örnek olarak verilen uygulama basit olmakla birlikte, bu bildirinin sunumunda da değinileceği gibi, trofik durum kütüphane fonksiyonlarının çok daha ayrıntılı bilgisayar uygulamalarının geliştirilmesi amacıyla kullanılmaları da mümkündür. Sonuç olarak bu çalışma, su kaynakları yönetiminde dijitalleşmeye katkıda bulunacaktır.

Bu çalışma ile ilgili olarak değinilecek son husus günümüzde yapay zekâ hatta klasik yapay zekâya göre üstünlükleri kanıtlanmış olan üretken yapay zekâ imkanlarının bu çalışmada neden kullanılmamış olduğudur. Üretken yapay zekâ kullanılarak bir gölün TP, CHLA ve SD ölçümlerinin sorgulanması elbette mümkündür. Bu seçenek konu uzmanı yazarlar tarafından dikkatle verilen sorgular ile Google Gemini sisteminde denenmiştir. Elde edilen sonuçların, yeterince üzerinde çalışılması durumunda iyileştirilebilmesi mümkün olmakla birlikte, Şekil 3 ile verilen doğruluk performansının çok gerisinde oldukları belirlenmiştir. Bunun dışında, yapay zekâ sistemleri uygulama programlama arayüzleri (Application Programming Interface ya da API) üzerinden de kullanılabilmektedir ancak bu çalışmadaki amaç, geliştirilen fonksiyonların bağımsız olarak kullanılabilmesidir. Yapay zekâ sistemleri ise dağıtık bir uygulama modelini temsil etmektedir ve ilgili verileri uzaktan elde etmek, örneğin trofik durum olasılıklarının binlerce kez çağırılması gereken optimizasyon tabanlı su yönetimi uygulamalarında, pratik olmayacaktır. Bu çalışmada geliştirilen fonksiyonların mevcut ve daha da hassas sonuçlar üretecek gelecek sürümlerinin, yapay zekâ tabanlı sistemlerin eğitim süreçlerinde yer alan uzmanların yapay zekâ sistemine geri bildirim verme (RLHF – Reinforcement Learning from Human Feedback – İnsan Geri Bildiriminden Pekişmeli Öğrenme) sürecini kolaylaştırması da mümkündür.

5. Kaynaklar

[1] Li, S., Xu, S., Song, K., Kutser, T., Wen, Z., Liu, G., Shang, Y., Lyu, L., Tao, H., Wang, X., Zhang, L., Chen, F. (2023). Remote Quantification of the Trophic Status of Chinese Lakes. Hydrology and Earth System Sciences, 27(19), 3581-3599.

[2] Carlson, R.E. (1977) A Trophic State Index for Lakes, Limnol Oceanogr, 22(2), 361–369. https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361

[3] Vollenweider, R.A., Kerekes, J. (1982). OECD 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. OECD Cooperative Programme on Monitioring Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, OECD, Paris, France, 158p.

[4] Automeris (2026), https://automeris.io/, erişim tarihi: 13/08/2026.

[5] Arıman, S. ve Koyuncu, S. (2019). Su Kirliliği Açısından Hassas Alanların İzlenmesi: Kızılırmak Deltası-Balık Gölü, Journal of Engineering and Design, doi: 10.21923/jesd.531195.

[6] İleri, S., Karaer, F., Katip, A., Onur, S. (2014). Sığ Göllerde Su Kalitesi Değerlendirmesi, Uluabat Gölü Örneği, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 19, Sayı 1.

[7] Tünay, S. (2015). Sapanca Havzası Yan Dereleri ve Sapanca Gölü'ndeki Fosfor Yüklerinin Belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

İznik Gölünde Klorofil-a'nın Uzaktan Algılama ile izlenmesi

Şerife Pınar GÜVEL*
DSİ Genel Müdürlüğü, 6.Bölge Müdürlüğü, Adana, TÜRKİYE, Orcid no: 0000-0002-3175-5938
spinar.guvel@dsi.gov.tr

Mehmet Ali AKGÜL
DSİ Genel Müdürlüğü, 6.Bölge Müdürlüğü, Adana, TÜRKİYE, Orcid no: 0000-0002-5517-9576
mali.akgul@dsi.gov.tr

Hakan AKSU
Samsun Üniversitesi, Özdemir Bayraktar Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Samsun, TÜRKİYE,
Orcid no: 0000-0003-4686-7446
hakan.aksu@samsun.edu.tr

Semra AKGÜL
DSİ Genel Müdürlüğü, 6.Bölge Müdürlüğü, Adana, TÜRKİYE, Orcid no: 0009-0003-8689-7049
semra.a@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: uzaktan algılama, Sentinel-2, Klorofil a, İznik Gölü.

1. Amaç

Habitat ve ekosistemde önemli bir yere sahip doğal göller, iklim değişikliği, düzensiz kentleşme, sanayileşme ve tarım uygulamaları gibi sebeplerin baskısı altında bulunmaktadır. Birçok endemik bitki ve canlıya ev sahipliği yapan bu göller günden güne kirlenmekte veya yok olmaktadırlar. Ülkemizde Uluslararası Ramsar Sözleşmesi kapsamında bulunmasa da "Ulusal Öneme Haiz Sulak Alan" olarak tanımlanan İznik Gölü çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada uydu verileri kullanılarak klorofil-a (Chl-a) haritaları üretilmiştir. Analizler öncesinde uydu görüntülerinde radyometrik ve atmosferik düzeltmeler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, İznik Gölü için 19.03.2024-30.10.2025 tarihleri arasındaki 14 adet Sentinel-2 uydu görüntüsü kullanılarak Chl-a'nın alansal dağılımı ve zamansal değişimi analiz edilmiştir. En yüksek ortalama değer 18.05.2024 tarihinde 21.51 mg/m^3, en düşük ortalama değer 22.07.2024 tarihinde 8.23 mg/m^3 ve en yüksek değer ise 27.06.2024 tarihinde 1252.47 mg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca İznik Gölünün uzaktan algılama tabanlı su kalitesi izlenmesine yönelik kurulacak bir sisteme altlık olması açısından önceden bilinen uydu geçiş zamanlarında çok noktadan örnek alınarak su kalitesi parametre setleri oluşturulması tavsiye edilmektedir. Bu sayede maliyet, zaman ve iş gücünden tasarruf etmek mümkün olacak, belirli periyotta ve sınırlı adette örnek alınması yerine uydu geçiş aralığı olan 2-3 günde bir tüm göl yüzeyine ait su kalitesi değerleri tespit edilebilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

İznik Gölü, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde, Bursa il sınırları içinde yer alan tektonik kökenli bir tatlı su gölüdür. Yüzölçümü 300 km² civarındadır ve Türkiye'nin en büyük beşinci gölü olarak kabul edilir (Şekil 1).

2.2 Materyal

Bu çalışmada uzaktan algılama veri kaynağı olarak kullanılan Sentinel-2 uydusu, Avrupa Komisyonu'nun Copernicus programı kapsamında fırlatılmıştır. Sentinel-2 verileri, arazi yönetimi, tarımsal üretim, ormancılık, doğal afet izleme ve insani yardım dahil olmak üzere çeşitli bağlamlarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalar, Avrupa Komisyonu ve Avrupa Uzay Ajansı tarafından ortaklaşa yürütülen Küresel Çevre ve Güvenlik İzleme programı kapsamında gerçekleştirilmektedir (EOS, 2026). Uydu, 13 spektral bantta 10 ila 60 m çözünürlükle görünür yakın kızılötesi (VNIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) spektral bölgelerinde ölçüm yapan bir opto-elektronik multispektral sensör ile donatılmıştır (Tablo 1).



Şekil 1. Çalışma alanı

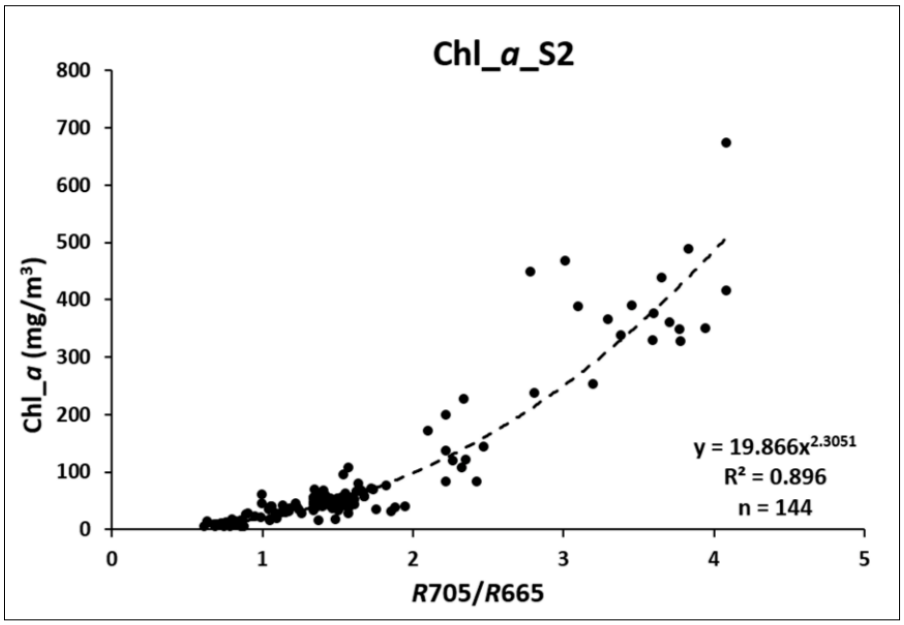
Tablo 1. Sentinel-2 uydu görüntüleri bant özellikleri (ESA, 2015).

Bantlar	Bant Adı	Dalga Boyu (nm)	Bant genişliği (nm)	Çözünürlük (m)
1	Kıyılar Aerosolü	443	20	60
2	Mavi	490	65	10
3	Yeşil	560	35	10
4	Kırmızı	665	30	10
5	Vejetasyon Kırmızı Kenar	705	15	20
6	Vejetasyon Kırmızı Kenar	740	15	20
7	Vejetasyon Kırmızı Kenar	783	20	20
8	NIR (Yakın Kızıl Ötesi)	842	115	10
8b	Narrow NIR (Daraltılmış Yakın Kızıl Ötesi)	865	20	20
9	Su Buharı	945	20	60
10	SWIR–Cirrus	1375	30	60
11	SWIR 1	1610	90	20
12	SWIR 2	2190	180	20

Sentinel-2 uydusunun ortalama yörünge yüksekliği 786 km'dir. Görevde iki uydu kullanılmaktadır; bu sayede ekvatorda her beş günde bir, orta enlemlerde ise her iki ila üç günde bir görüntü elde edilebilmektedir (EOS, 2026). Sentinel-2 uydusundan elde edilen veriler Level-0, Level-1A, Level-2B, Level-1C ve Level-2 olmak üzere beş farklı düzeyde işlenerek sunulmaktadır. Bu çalışmada, Sentinel-2 uydusundan elde edilen Level-1C verileri kullanılmış olup bu düzeydeki uydu görüntüleri TOA (Top Of Atmosphere) yöntemi kullanılarak radyometrik olarak kalibre edilmiştir (ESA, 2015).

2.3 Yöntem

Sentinel-2 uydusu görüntüleri https://eos.com/sentinel-2/ adresinden alınmıştır. Uydu görüntülerinin kullanılması için gereken radyometrik kalibrasyon ENVI görüntü işleme yazılımı ile yapılmıştır (Canty, 2014). Radyometrik olarak düzeltilmiş uydu görüntülerinin atmosferik düzeltmeleri ise aynı yazılım içinde bulunan Quick Atmospheric Correction (QUAC) modülü kullanılarak yapılmıştır (Bernstein vd., 2005).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan Chl-a formülünün kalibrasyon grafiği (Sòria-Perpinyà vd., 2021).

Uydu görüntülerinin radyometrik ve atmosferik düzeltmeleri yapıldıktan sonra Sòria-Perpinyà vd. (2021) tarafından bulunmuş olan ve grafiği Şekil 2'de verilen formül 1 yardımıyla Chl-a değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Chl-a}=19.866*(B5/B4)^{2.3051} \quad (1)$$

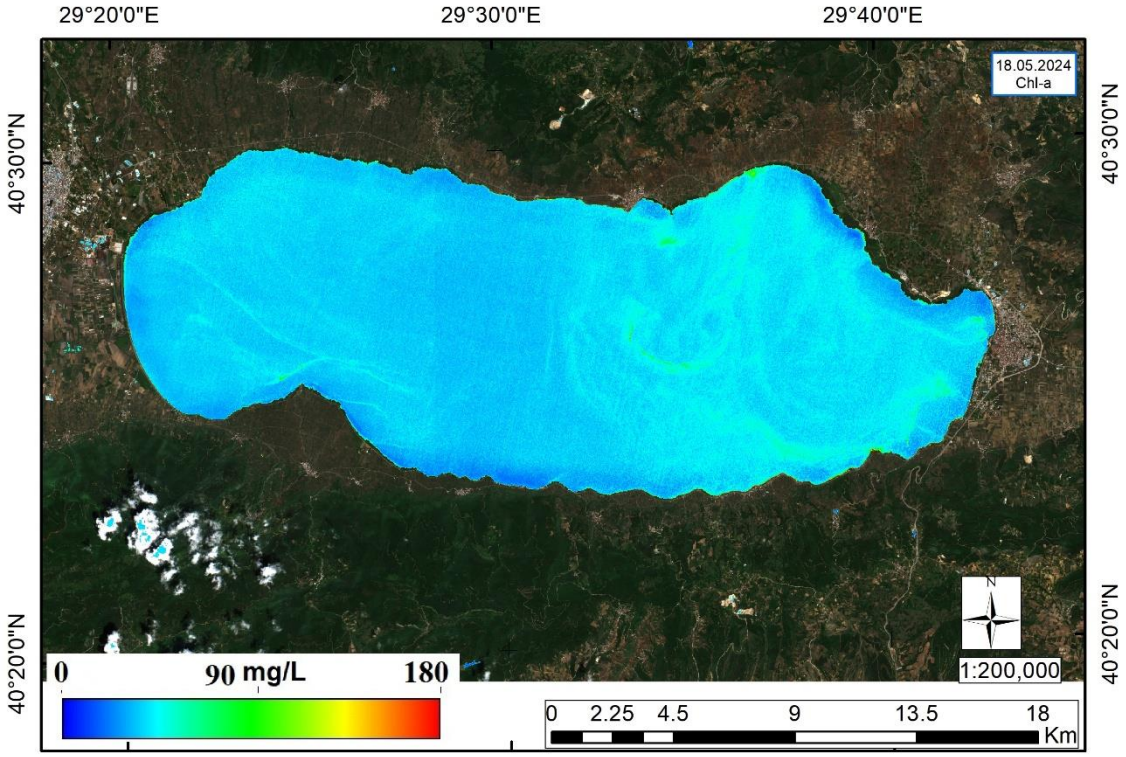
Formülde verilen B4 ve B5 değerleri Tablo 1'de verilen Sentinel-2 uydusunun aynı numaralı bantlarını göstermektedir. Yersel çözünürlüğü 20 m olan B5 bandının 10 m çözünürlüğe sahip B4 bandına bölünmesinden dolayı Chl-a değerlerinin yersel çözünürlüğü 10 m olarak hesaplanmaktadır.

3. Değerlendirme

İznik Gölü Chl-a dağılım haritaları, ArcMap (ESRI, 2011) yazılımının yardımıyla, Sentinel-2 uydu verileri ve Soria-Perpinya ve ark. (2021) tarafından formül 1'de özetlenen Chl-a formülü kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplanan en yüksek ortalamaya sahip Chl-a değerini gösteren 18.05.2024 tarihli Chl-a dağılım haritası Şekil 3'te verilmiştir. Chl-a değerinin en yüksek olduğu bölgelerin gölün batı tarafında olduğu görülmektedir.

14 uydu görüntüsünün tümü için Chl-a dağılım haritaları oluşturulmuş olup, piksellerin ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma değerleri Tablo 2'de verilmiştir. En yüksek ortalama değer 18.05.2024 tarihinde 21,51 mg/m^3 iken, en düşük değer 22.07.2024 tarihinde 8,23 mg/m^3 tür. En yüksek değer 27.06.2024 tarihinde 1252,47 mg/m^3 olarak kaydedilmiştir. Tablo 2'de sunulan standart sapma değerlerinden de görülebileceği gibi, en yüksek değeri gösteren 27.06.2024 tarihli harita, en heterojen haritadır.

Tablo 2'de verilen minimum ve maksimum değerlerin grafiği Şekil 4'te sunulmuştur. 27.06.2024 tarihinde kaydedilen yüksek değerin, mevsimsel meteorolojik değişimler ve bölgedeki tarımsal faaliyetlerin birleşik etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

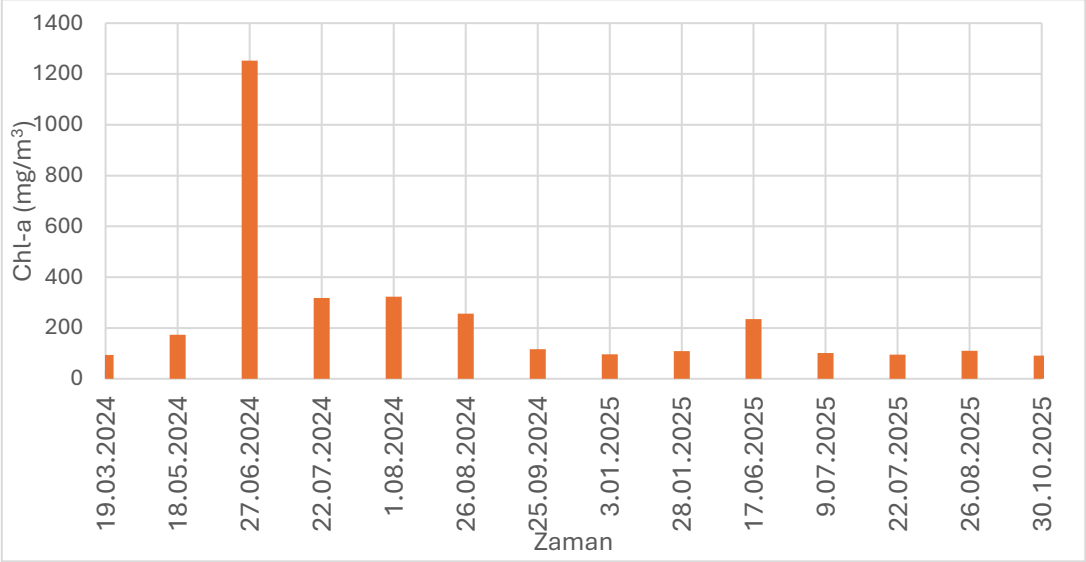


Şekil 3. Chl-a dağılım haritası (18.05.2024)

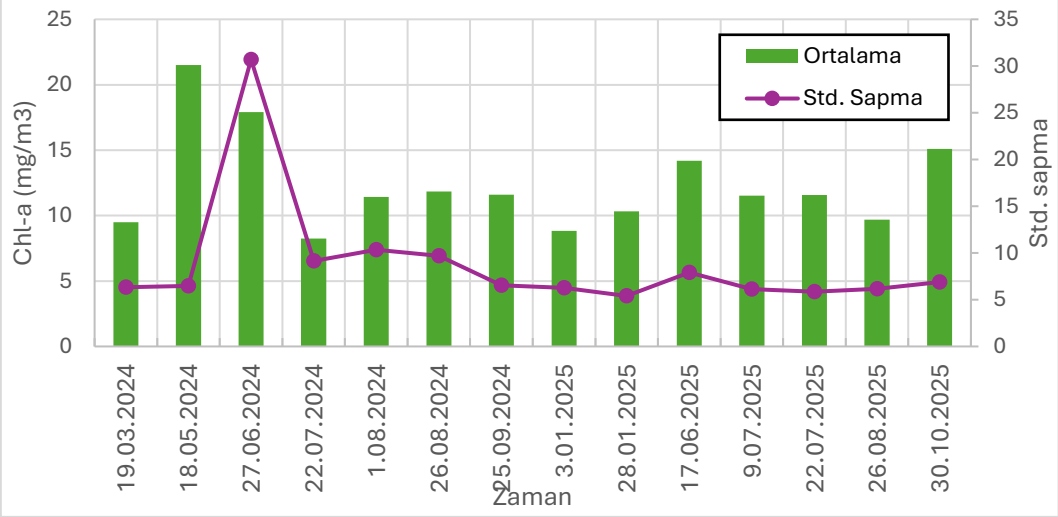
Tablo 2. İznik Gölü Chl-a değerleri (mg/m^3).

Tarih	En az	En fazla	Ortalama	Std. Sapma
19.03.2024	0,00	93,36	9,48	6,34
18.05.2024	0,00	173,18	21,51	6,48
27.06.2024	0,00	1252,47	17,91	30,71
22.07.2024	0,00	318,31	8,23	9,14
1.08.2024	0,00	323,32	11,43	10,35
26.08.2024	0,00	255,87	11,84	9,68
25.09.2024	0,00	115,86	11,60	6,54
3.01.2025	0,00	96,06	8,83	6,28
28.01.2025	0,00	109,36	10,32	5,40
17.06.2025	0,00	235,42	14,18	7,92
9.07.2025	0,00	101,89	11,52	6,15
22.07.2025	0,00	94,51	11,58	5,87
26.08.2025	0,00	110,17	9,68	6,16
30.10.2025	0,00	90,98	15,11	6,89

Tablo 2'de sunulan Chl-a değerlerinin ortalama ve standart sapma grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Grafik, Chl-a dağılımının rezervuar içinde homojen olup olmadığını belirlemede önemli bir öneme sahiptir. Düşük standart sapmaya sahip değerler, Chl-a dağılımının rezervuar içinde homojen olduğunu gösterirken, drenaj kanallarından göle olan girişlerde ve göl kenarındaki sazlıklardan dolayı standart sapma artacaktır. En yüksek değerin kaydedildiği 27.06.2024 tarihinde, standart sapmanın da yüksek olduğu bu durumun gölde noktasal olarak yüksek Chl-a bulunduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 4. Chl-a değerlerinin en az-en fazla grafiği



Şekil 5. Chl-a değerlerinin ortalama-std sapma grafiği

4. Sonuçlar

Özellikle geniş göl sistemlerinde Chl-a örneklemesi, zaman alıcı, maliyetli ve yoğun emek isteyen bir süreçtir. Chl-a'yı izlemek için gözlem noktalarının kullanılması, Chl-a'nın başlangıç noktasını, dağılım alanını ve miktarını belirlemek için yetersiz kalabilir. Bulut örtüsü dikkate alınmak kaydıyla, zamansal çözünürlüğü 2-3 gün olan Sentinel-2 uydusundan her uydu görüntüsü için Chl-a dağılım haritaları üretilebilmektedir. Gözlem noktalarıyla bu sıklıkta harita üretmenin mali sonuçları ve pratik zorluklar, yersel gözlemler ile bu ölçekteki çalışmaların uygulanmasını imkansız hale getirmektedir.

Üretilen Chl-a haritaları, karar vericilerin yüksek Chl-a seviyelerinin nedenlerini ortadan kaldırmalarına yardımcı olmak için kullanılabilir. Çalışma sonucunda üretilen Chl-a dağılım haritalarının yersel çözünürlüğü 10 m'dir, analizler sonucunda 100 m^2ye bir veri üretilebilir.

Chl-a parametrelerinin daha kesin bir şekilde belirlenmesi, önceden belirlenmiş uydu geçiş zamanlarında göl yüzeyinden çok sayıda noktadan numune alınarak sağlanabilir. Bu da İznik Gölü'nde uzaktan algılama tabanlı Chl-a izleme sisteminin kurulması için bir temel oluşturur. Bu yaklaşım, maliyet, zaman ve işgücü tasarrufu sağlayacak ve mevcut uygulamada belirli noktalarda ve zamanlarda numune alınmasından farklı olarak, tüm göl yüzeyi genelinde Chl-a değerlerinin belirlenmesini sağlayacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruíz-Verdú, A., Delegido, J., Soria, J.M., Peña, R., Moreno, J. (2021). Validation of water quality monitoring algorithms for sentinel-2 and sentinel-3 in mediterranean inland waters with in situ reflectance data. Water (Switzerland) 13. https://doi.org/10.3390/w13050686.

[2] EOS. (2026). https://eos.com/sentinel-2/, Date of access: 13.05.2026.

[3] ESA. (2015). Sentinel-2 User Handbook, ESA Standard Doc., 24/07/2015 Issue 1 Rev 2.

[4] Canty, J.M. (2014). Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, with Algorithms for ENVI/IDL and Python, Third Edition. CRC Press.

[5] Bernstein, L.S., Adler-Golden, S.M., Sundberg, R.L., Levine, R.Y., Perkins, T.C., Berk, A. (2005). Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. SPIE, Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI. Vol. 5806, pp. 668-678. https://doi.org/10.1117/12.603359.

[6] ESRI. (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Dijital İkiz Yaklaşımı ile Bulut Tabanlı ve Çok Kaynaklı Uzaktan Algılama Verileri Destekli Mevsimsel Havza Yönetim Çerçevesi

Rayan NAS*
Yüksel Proje A.Ş, Altyapı Departmanı, Ankara, 06610, Türkiye, 0000-0003-1913-890X
rnas@yukselproje.com.tr

Anıl OLGAÇ
Yüksel Proje A.Ş, Altyapı Departmanı, Ankara, 06610, Türkiye,
aolgac@yukselproje.com.tr

Anahtar Kelimeler*:* dijital ikiz, uzaktan algılama, google earth engine, iklim değişikliği, havza yönetimi.

1. Amaç

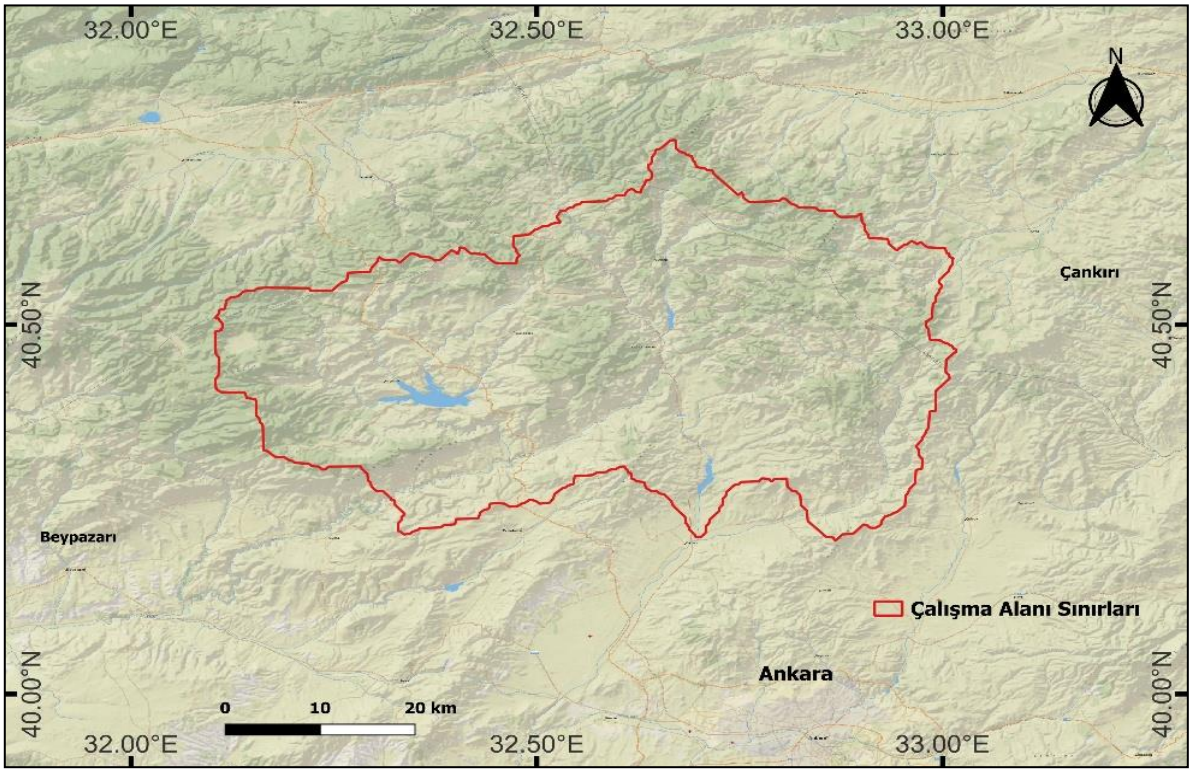
Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, iklim değişikliği, hızlı kentleşme ve antropojenik baskılar nedeniyle giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Havzalar, taşkın ve kuraklık risklerinin azaltılması, su kalitesinin korunması ve ekosistem hizmetlerinin devamlılığının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Ancak geleneksel izleme yöntemleri, geniş alanlarda sürekli ve yüksek çözünürlüklü veri sağlamada yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, dijital ikiz yaklaşımı ile bulut tabanlı Google Earth Engine (GEE) altyapısı kullanılarak çok kaynaklı uzaktan algılama verilerinin entegrasyonu yoluyla mevsimsel hidrolojik süreçlerin izlenmesi ve havza yönetimi için kapsamlı bir çerçeve geliştirmektir. Literatürde dijital ikiz yaklaşımının havza yönetiminde bulut tabanlı çok kaynaklı uzaktan algılama verileriyle entegrasyonu sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı ve karar destek sistemleri için ölçeklenebilir bir metodolojik çerçeve sunmayı hedeflemektedir. Bu çalışmada dijital ikiz yaklaşımı, havzanın yüzey suyu, yağış, toprak nemi, yeraltı suyu ve arazi örtüsü bileşenlerinin uzaktan algılama ve reanaliz verileri kullanılarak sanal ortamda temsil edilmesi ve eş zamanlı olarak izlenmesi şeklinde ele alınmıştır. Böylece havzanın hidrolojik davranışını yansıtan dinamik bir karar destek yapısı oluşturulmuştur. Bu dinamik izleme altyapısı; havzanın anlık iklimsel şoklara, kuraklık eğilimlerine ve su bütçesi değişimlerine verdiği yanıtı dikey katmanlar halinde (yağış, yüzey suyu, yüzey toprak nemi, kök bölgesi, derin yeraltı nemi) simüle eden bir 'Dijital İkiz Prototipi' sunmaktadır. Havza yönetimi perspektifinden bu çerçeve; geleneksel statik raporlamaların aksine, karar vericilere gerçek zamanlıya yakın erken kuraklık uyarısı, tarımsal sulama dönemlerinin optimizasyonu ve yeraltı su tahsis planlaması süreçlerinde dinamik ve veri güdümlü bir altlık sağlamaktadır.

2. Materyal ve yöntem

Çalışma, Ankara ili sınırları içerisinde ve Kızılcahamam ilçesi çevresinde yer alan çalışma alanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı yaklaşık 2900 km² büyüklüğünde olup analizlerde aynı havza sınırı tüm veri setlerine uygulanmıştır. Çalışma alanı kuzeyde Çankırı, batıda Beypazarı ve güneyde Ankara merkez ilçeleri ile çevrelenmektedir. Bölge yarı kurak karasal iklim koşullarının etkisi altında olup yükselti, topoğrafya ve arazi örtüsü bakımından önemli mekânsal farklılıklar göstermektedir. Havza genelinde ortalama yükselti 1100–1500 m arasında değişmekte olup engebeli ve dağlık bir topoğrafik yapı hakimdir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) uzun yıllar klimatolojik gözlem verilerine göre, bölgenin yıllık ortalama sıcaklığı 10–11 °C, yıllık toplam yağış miktarı ise yaklaşık 550–600 mm civarındadır. Karadeniz geçiş etkisi nedeniyle Ankara il merkezine kıyasla daha yüksek yağış alan havzada, yağışların büyük bir kısmı kış ve ilkbahar mevsimlerinde düşmekte, yaz ayları ise kurak ve sıcak geçmektedir [1]. Bu kapsamda yüzey suyu, yağış, toprak nemi, yeraltı suyu ve arazi örtüsü değişkenlerinin mevsimsel dinamikleri uzaktan algılama ve veri setleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanının konumu Şekil 1'de gösterilmektedir.

Bu çalışmada dijital ikiz yaklaşımı, farklı uzaktan algılama veri setlerinin bulut tabanlı Google Earth Engine (GEE) platformunda entegrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri setleri Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı sınırları

Tablo 1. Çalışmada kullanılan uzaktan algılama veri setleri

Veri Seti	Parametre	Çözünürlük / Zaman Aralığı	Kaynak
Sentinel-2	NDWI (yüzey suyu)	10–20 m, 5 gün	ESA Copernicus
CHIRPS	Yağış	0,05°, 5 günlük seriler	UCSB Climate Hazards Group
SMAP	Yüzey toprak nemi (0–5 cm)	9 km, günlük	NASA NSIDC
ERA5-Land	Derin toprak nemi (5–100 cm)	0,1°, aylık	ECMWF C3S
GLDAS	Yeraltı suyu nemi (100–200 cm)	0,25°, aylık	NASA GSFC / GCMD
MODIS	Arazi örtüsü sınıfları	500 m, yıllık	NASA LP DAAC

Sentinel-2 SR Harmonized verileri, yüzey suyu ve bitki örtüsü nem durumunu izlemek amacıyla Normalized Difference Water Index (NDWI) hesaplamalarında kullanılmıştır [2], [3], [4]. 10–20 m mekânsal çözünürlüğü sayesinde küçük su yüzeylerinin izlenmesine olanak sağlamaktadır. NDWI, yeşil (B3) ve yakın kızılötesi (B8) bantları kullanılarak Eşitlik 1'deki formül ile elde edilmiştir:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (1)$$

Burada *B3* Sentinel-2'nin yeşil bandını, *B8* ise yakın kızılötesi bandını temsil etmektedir.

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) Pentad [5] veri seti, uydu gözlemleri ile yer istasyonlarını birleştirerek güvenilir yağış tahminleri sunmaktadır. Analizlerde mevsimsel günlük ortalama yağış miktarları (mm/gün) hesaplanarak NDWI ile karşılaştırılmış ve yüzey

suyu dinamikleriyle ilişkisi ortaya konulmuştur. Mevsimsel günlük ortalama yağış miktarı, ilgili dönem için günlük değerlerin aritmetik ortalamasının alınmasıyla (Eşitlik 2) hesaplanmıştır:

$$P_{mevsimsel} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i \quad (2)$$

Burada P_i günlük yağış değerini, n ise mevsimdeki gün sayısını temsil etmektedir.

Soil Moisture Active Passive (SMAP) SPL4SMGP [6] verileri, yüzey toprak nemini (0–5 cm) günlük bazda sağlamaktadır. Tarımsal üretim ve bitki gelişimi açısından kritik bir parametre olduğundan mevsimsel ortalamalar hesaplanmış ve yağış ile NDWI ile karşılaştırılmıştır. Mevsimsel ortalama yüzey nemi Eşitlik 3'ten hesaplanmıştır:

$$M_{mevsimsel} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} SM_i \quad (3)$$

Burada SM_i günlük yüzey nemi değerini, n ise mevsimdeki gün sayısını ifade etmektedir.

Fifth-generation ECMWF Reanalysis v5 (ERA5 Land Monthly) [7] veri seti, derin toprak nemi (5–100 cm) için kullanılmaktadır. Bu veri seti, yüzey nemine göre daha yavaş tepki veren derin toprak katmanlarının su depolama kapasitesini değerlendirmektedir. Mevsimsel ortalama, aylık değerlerin aritmetik ortalaması alınarak (Eşitlik 4) hesaplanmıştır:

$$DSM_{mevsimsel} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} DSM_j \quad (4)$$

Burada DSM_j aylık derin toprak nemi değerini, m ise mevsimdeki ay sayısını göstermektedir.

Global Land Data Assimilation System (GLDAS) NOAH V021 [8] verileri, derin toprak nemi (100–200 cm) için kullanılmaktadır ve yeraltı suyu proxy'si olarak uzun vadeli su depolama kapasitesinin değerlendirilmesinde önemli bir parametre sunmaktadır. Model yapısından çekilen ham veriler, ilgili katmandaki toplam su kütlesini ifade eden (kg/m^2) (veya mm su eşdeğeri) cinsindendir. Mevsimsel ortalama, günlük değerlerin aritmetik ortalaması alınarak (Eşitlik 5) hesaplanmıştır:

$$GW_{mevsimsel} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} GW_i \quad (5)$$

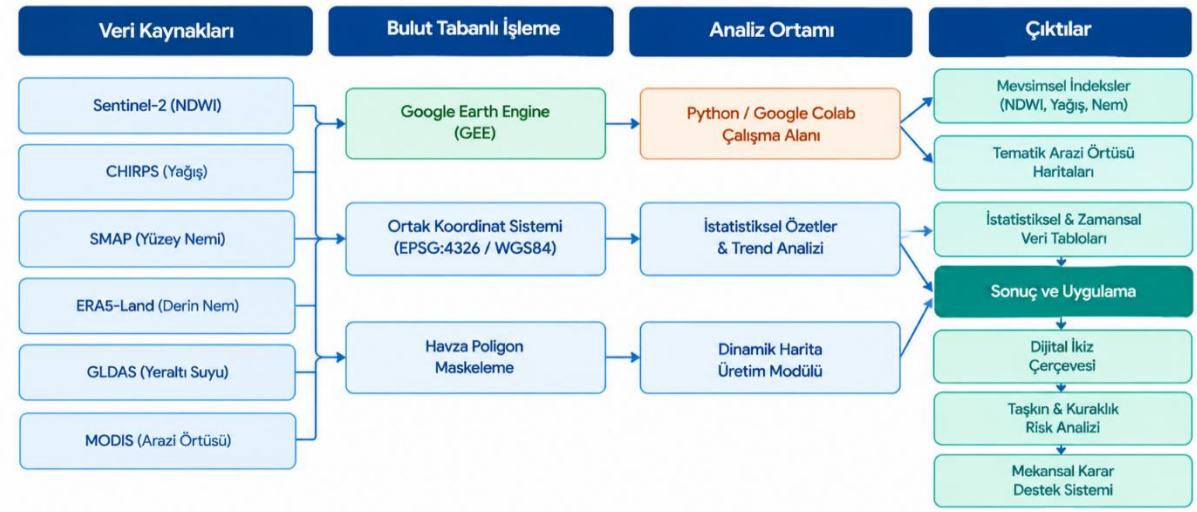
Burada GW_i günlük yeraltı suyu nemi değerini (kg/m^2), n ise mevsimdeki gün sayısını ifade etmektedir.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MCD12Q1 [9] verileri, yıllık bazda statik arazi örtüsü sınıflarının belirlenmesinde ve havza genelindeki baskın alanların maskelenmesinde kullanılmıştır. Çıplak toprak, tarım, kar ve su yüzeylerinin oranlarını belirleyerek hidrolojik süreçlerin mekânsal farklılıklarının değerlendirilmesine önemli katkı sunmaktadır. Çalışmanın bulgular kısmında yer alan; ilkbahar aylarındaki yeşil alan dinamikleri, yaz aylarındaki çıplak toprak etkileri veya kış dönemindeki kar örtüsü değişimleri gibi kısa süreli mevsimsel yorumlar yıllık MODIS ürününden değil, 5 gün temporal çözünürlüğe sahip dinamik Sentinel-2 (NDWI/NDVI) zaman serilerinden elde edilmiştir.

Tüm veri setleri GEE üzerinde aynı havza poligonu kullanılarak işlenmiş, EPSG:4326 (WGS84) koordinat sistemi altında mekânsal uyumluluk sağlanmıştır. Bu aşamada havza poligon maskeleme, bulut filtreleme ve yeniden örnekleme işlemleri uygulanmıştır. Çok kaynaklı veri entegrasyonu sürecinde, farklı mekânsal çözünürlüklere sahip katmanların ortak analiz edilebilmesi adına havza tabanlı alansal istatistik (zonal statistics) yaklaşımı benimsenmiştir. Yüksek çözünürlüklü spektral indeksler (Sentinel-2 NDWI) yerel ölçekteki su ve vejetasyon dinamiklerini izlemek amacıyla orijinal mekânsal çözünürlüğünde korunurken; daha kaba çözünürlüklü hidrometeorolojik ve reanaliz katmanları (SMAP, ERA5-Land, GLDAS) ortak havza sınırları içerisinde alansal ortalamaları üzerinden zamansal olarak eşleştirilmiştir. Böylece farklı mekânsal ölçekteki veriler, hidrolojik döngünün dikey katmanları olarak ortak havza bütçesinde bütüncül ve doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Veri

entegrasyonu sürecinde tüm katmanlar aynı koordinat sisteminde değerlendirilmiş ve mevsimsel istatistikler havza bazında üretilmiştir. Veri analizi ve harita üretimi süreçleri Python / Google Colab ortamında yürütülmüş; istatistiksel özetler, trend analizleri ve korelasyon testleri gerçekleştirilmiş, dinamik harita üretim modülü aracılığıyla mekânsal dağılımlar görselleştirilmiştir.

Şekil 2'de çalışmanın genel metodolojik akışı özetlenmektedir. Şema, veri kaynaklarının bulut tabanlı işleme süreciyle analiz ortamına aktarılmasını ve elde edilen çıktılarla sonuç uygulamalarının ilişkisini göstermektedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan veri kaynakları, bulut tabanlı işleme, analiz ortamı ve elde edilen çıktılar arasındaki metodolojik akış.

Veri setlerinin güvenilirliği açısından Sentinel-2 küçük su yüzeylerinin izlenmesinde güçlü olmakla birlikte bulutluluk koşullarına duyarlıdır. CHIRPS yağış verileri uydu ve yer istasyonu entegrasyonu sayesinde güvenilirlik sağlamış, ancak düşük istasyon yoğunluğu olan bölgelerde yerel topoğrafik ve mikroklimatik varyasyonları yakalamakta sınırlılıklar gösterebilmektedir. Bu durum, çok kaynaklı uydu veri setleri ile reanaliz modellerinin bir arada kullanılmasının ve dinamik bir dijital ikiz çerçevesinde çapraz doğrulamaya tabi tutulmasının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. SMAP yüzey nemi günlük çözünürlük avantajı sunarken 9 km mekânsal çözünürlüğü küçük havzalarda sınırlı ayrıntı sağlamıştır. ERA5-Land derin nem verileri katmanların su depolama kapasitesini ortaya koymuş, fakat model tabanlı olması nedeniyle yerel doğrulama gerektirmiştir. GLDAS yeraltı suyu verileri uzun vadeli eğilimleri göstermiş, ancak düşük mekânsal çözünürlük küçük ölçekli süreçleri yakalamada yetersiz kalmıştır. MODIS arazi örtüsü verileri küresel ölçekte tutarlı sınıflandırmalar sağlamış, fakat yıllık güncellenmesi hızlı arazi değişimlerini yakalamada sınırlı kalmıştır.

Yöntemsel katkılar açısından bulut tabanlı işleme (GEE), farklı veri setlerinin ortak koordinat sisteminde entegrasyonunu kolaylaştırmıştır. Bu yaklaşım, tekrar üretilebilir bir iş akışı sunmaktadır. Python / Colab ortamı, istatistiksel özetlerin ve haritaların otomatik üretimini mümkün kılmış; analiz sürecine şeffaflık ve hız kazandırmıştır. Dijital ikiz yaklaşımı ise taşkın ve kuraklık risklerinin mekânsal olarak modellenmesine olanak sağlayarak, karar destek sistemleri için güçlü bir temel sunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan tüm veri setleri, 2024–2025 dönemine ait mevsimsel aralıklar için değerlendirilmiştir. Analizler, ilkbahar (01 Mart–31 Mayıs 2024), yaz (01 Haziran–31 Ağustos 2024), sonbahar (01 Eylül–30 Kasım 2024) ve kış (01 Aralık 2024–28 Şubat 2025) dönemlerini kapsamaktadır.

3. Değerlendirme

3.1 Mevsimsel İstatistiksel Özet

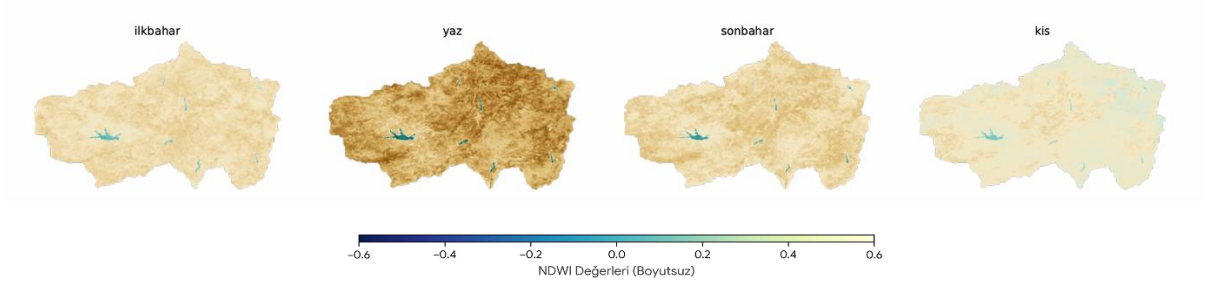
NDWI, yağış, yüzey nemi, derin nem ve yeraltı suyu ortalamalarının mevsimsel değişimleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de sunulmuştur. Bu özet tablo, tüm parametrelerin birlikte değerlendirilmesine olanak tanımakta ve alt bölümlerde yapılan ayrıntılı analizlerin temel referansını oluşturmaktadır.

3.2 NDWI'nin Mevsimsel Davranışı

NDWI, yüzey suyu varlığını ve bitki örtüsü nem durumunu gösteren kritik bir spektral indeks olduğundan hidrolojik döngünün izlenmesinde temel parametrelerden biridir. İlkbaharda NDWI ortalaması –0,25 olarak hesaplanmış, yaz aylarında ise –0,38'e düşmüştür (Tablo 2). Bu değişim, yağışların artışıyla birlikte yüzey suyu ve toprak neminin yükseldiğini, yazın ise buharlaşma ve düşük yağış koşullarının etkisiyle su stresinin arttığını göstermektedir. Bu mevsimsel davranış havzanın su tutma kapasitesini ve su stresini değerlendirmede doğrudan kullanılabilir (Şekil 3).

Tablo 2. Mevsimsel istatistiksel özet

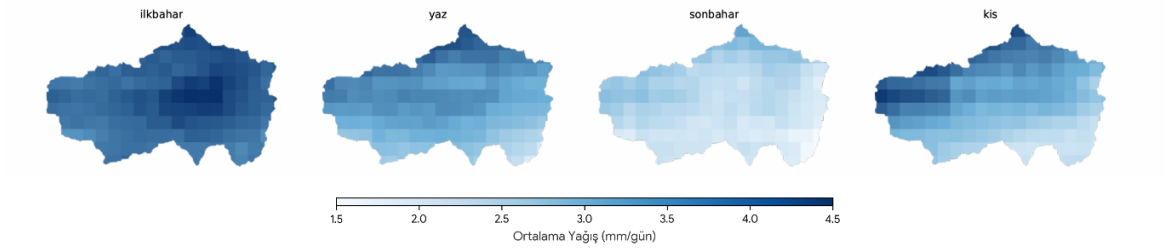
Mevsim	NDWI Ortalama (boyutsuz)	Yağış (mm/gün)	Yüzey Toprak Nemi (m^3/m^3, 0–5 cm)	Derin Toprak Nemi (m^3/m^3, 5–100 cm)	Yeraltı Suyu (kg/m^2, 100–200 cm)
İlkbahar	–0,25	3,21	0,24	0,36	259,7
Yaz	–0,38	2,65	0,17	0,22	230,34
Sonbahar	–0,25	2,97	0,17	0,27	217,97
Kış	–0,12	3,22	0,23	0,38	228,55



Şekil 3. Mevsimsel NDWI değerleri ve havza genelindeki su stresinin zamansal değişimi

3.3 Yağış Dinamiklerinin Analizi

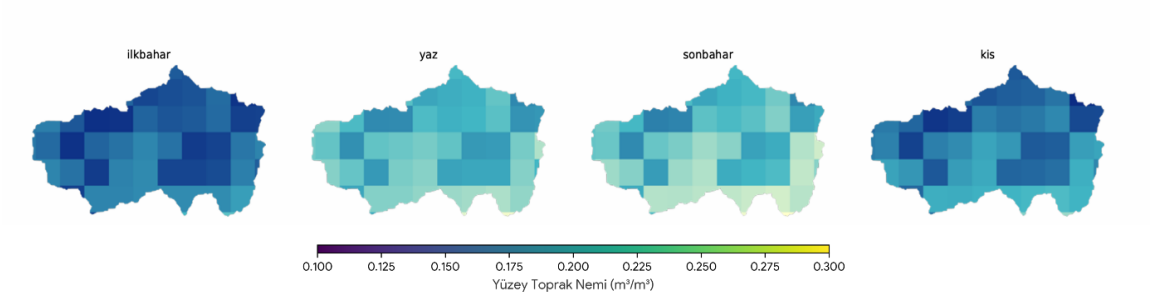
CHIRPS verileri ilkbaharda ortalama günlük 3,21 mm/gün, yazın ise 2,65 mm/gün değerleri göstermiştir (Tablo 2). Bu bulgu NDWI ile karşılaştırıldığında, yağış rejiminin yüzey suyu dinamiklerini doğrudan belirlediği görülmektedir. İlkbahar yağışları yüzey suyu ve toprak nemini artırırken, yazın düşük yağış koşulları kuraklık riskini yükseltmektedir. Bu durum, yağışın hidrolojik süreçlerin temel sürücüsü olduğunu ve diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. CHIRPS verilerine göre havza genelinde hesaplanan mevsimsel günlük ortalama yağış miktarları (mm/gün)

3.4 Yüzey Neminin Mevsimsel Değişimi

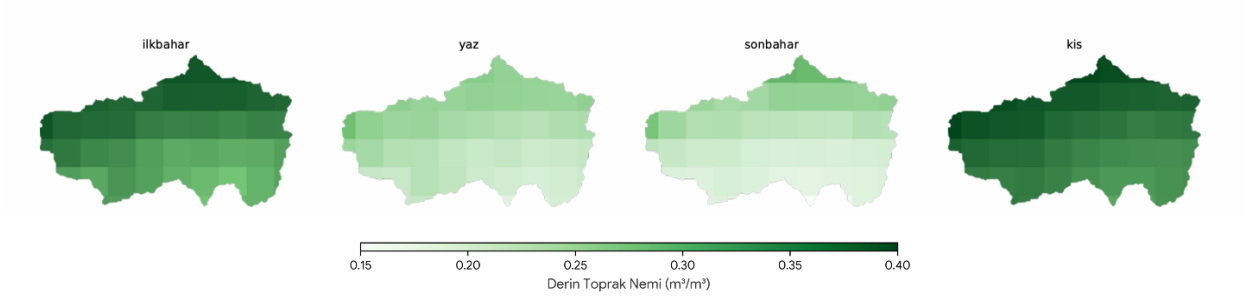
SMAP verilerine göre yüzey toprak nemi ilkbaharda ortalama 0,24, yazın ise 0,17 seviyesindedir (Tablo 2). Bu parametre, bitki gelişimi ve tarımsal üretim açısından kritik öneme sahiptir. Yüzey neminin yağışla uyumlu davranışı, infiltrasyon ve buharlaşma süreçlerinin doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca yüzey nemi ile NDWI arasındaki paralellik, su kaynaklarının yüzeyden bitki örtüsüne aktarımını göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5. SMAP uydusundan elde edilen mevsimsel ortalama yüzey toprak nemi dağılımı (m³/m³)

3.5 Derin Nem Depolama Kapasitesi

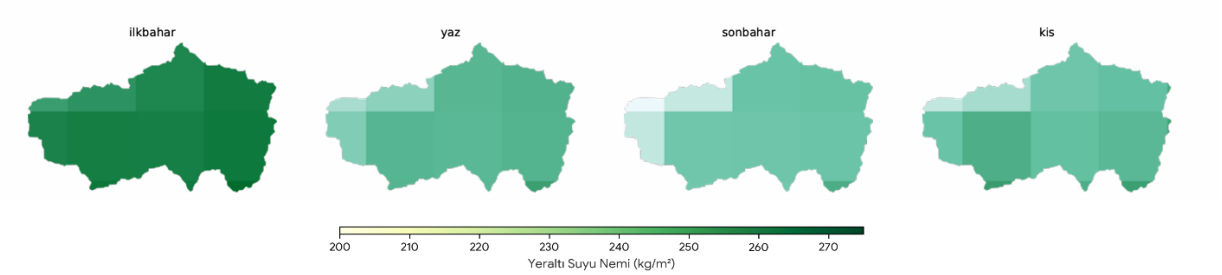
ERA5-Land verileri derin toprak neminin yaz sonunda ortalama 0,27'ye yükseldiğini, kış mevsiminde ise 0,38 seviyesine ulaştığını göstermiştir (Tablo 2). Bu bulgu, yüzeyden infiltrasyonun gecikmeli etkisini ve derin katmanlarda su depolanmasını ortaya koymaktadır. Derin nemin yüzey nemine göre daha yavaş tepki vermesi, hidrolojik döngünün zaman gecikmeli bileşenlerini anlamak açısından önemlidir. Bu parametre, kuraklık dayanıklılığı ve uzun vadeli su depolama kapasitesinin değerlendirilmesinde kullanılabilir (Şekil 6).



Şekil 6. ERA5-Land reanaliz verilerine göre derin toprak nemi depolama kapasitesinin mevsimsel değişimi (m³/m³)

3.6 Yeraltı Suyu Dinamikleri

GLDAS verileri kış mevsiminde ortalama 228 kg/m², ilkbaharda ise 259 kg/m² seviyelerine ulaşmıştır (Tablo 2). Yaz aylarında değerler 230 kg/m²'e düşerek yeraltı suyu seviyelerinin azaldığını göstermektedir. Bu bulgu, kar erimesi ve kış yağışlarının yeraltı suyu beslenmesine katkısını ortaya koymaktadır. Yeraltı suyu dinamikleri, yüzey nemi ve derin nem ile karşılaştırıldığında daha uzun süreli depolama kapasitesini temsil etmekte ve su güvenliği açısından kritik bir göstergedir (Şekil 7).



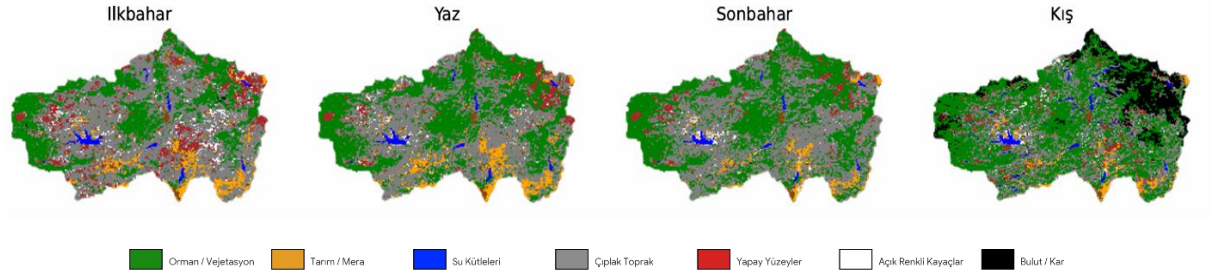
Şekil 7. GLDAS model verilerinden üretilen mevsimsel yeraltı suyu nemi dinamikleri (kg/m²)

3.7 Mevsimsel Arazi Örtüsü Karşılaştırması

Şekil 8'de sunulan mevsimsel arazi örtüsü haritaları, hidrometeorolojik parametrelerin havza yüzeyindeki doğrudan yansımalarını mekânsal olarak ortaya koymaktadır. Havza genelinde ilkbahar, yaz ve sonbahar dönemlerinde tarım alanlarının (turuncu/sarı pikseller) vejetasyon döngüsüne bağlı

olarak mekânsal dağılım gösterdiği, su kütlelerindeki (mavi pikseller) mevsimsel daralma ve genişlemelerin ise NDWI indeks serileriyle uyumlu bir seyir izlediği gözlenmektedir.
Yapay yüzeyleri temsil eden kırmızı piksellerin mevsimsel haritalar arasındaki mekânsal yer değişimleri, özellikle yaz ve sonbahar dönemlerinde vejetasyon örtüsünün ortadan kalkmasıyla (hasat ve nadas döngüsü) çıplak tarım topraklarının gösterdiği spektral yansıma benzerliğinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, çok zamanlı sınıflandırma modellerinde kurak dönem andezitik ve killi toprak piksellerinin yapay yüzey pikselleriyle gösterdiği spektral karışma (misclassification) eğilimini ve modelin bu parametredeki hassasiyet sınırlarını ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular ışığında, farklı uydu veri setlerinin bulut tabanlı ortamda entegrasyonu, mevsimsel havza yönetimi için tekrar üretilebilir, hızlı ve güvenilir bir iş akışı sunmuştur. Dijital ikiz yaklaşımı, taşkın ve kuraklık risklerinin mekânsal olarak modellenmesine olanak sağlayarak karar destek sistemleri için güçlü bir metodolojik temel sunmaktadır.



Şekil 8. Havza genelinde çok zamanlı sınıflandırma modeliyle üretilen mevsimsel arazi örtüsü ve arazi kullanımı dağılımları

4. Sonuçlar

Bu çalışma, farklı uzaktan algılama veri setlerinin bulut tabanlı entegrasyonu ile havzanın hidrolojik döngüsünün mevsimsel ölçekte güvenilir biçimde izlenebileceğini ortaya koymuştur. Kullanılan parametreler, birbirleriyle tutarlı eğilimler sergileyerek hidrolojik süreçlerin bütüncül bir şekilde modellenmesine olanak tanımıştır. Uzaktan algılama tabanlı entegrasyon, hidrolojik parametrelerin eş zamanlı değerlendirilmesini mümkün kılmış ve mevsimsel döngülerin tutarlı şekilde izlenebileceğini göstermiştir. Dijital ikiz yaklaşımı, taşkın ve kuraklık risklerinin mekânsal olarak öngörülmesine katkı sağlamış; elde edilen bulgular, karar destek sistemleri açısından su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminde kullanılabilecek güvenilir göstergeler sunmuştur.

Çalışmanın bilimsel katkısı, hidrolojik parametrelerin mevsimsel döngü içerisindeki etkileşimini ortaya koyarak, uzaktan algılama tabanlı yöntemlerin su kaynakları yönetiminde etkinliğini göstermesidir. Gelecek çalışmalar açısından, parametreler arasındaki ilişkilerin nedensel analizine yönelik çok değişkenli modellerin geliştirilmesi, havza içi alt bölgeler için mekânsal farklılıkların daha ayrıntılı incelenmesi ve iklim değişikliği senaryoları altında taşkın ile kuraklık risklerinin modellenmesi önerilmektedir.

5. Kaynaklar

[1] MGM. (2026). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara İli 1970-2025 Uzun Yıllar İklim Verileri. Erişim Tarihi: 01 Eylül 2026, https://mgm.gov.tr/

[2] Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266.

[3] McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425–1432.

[4] Rayan N, Anil O, Aliihsan S. (2026) Time-Series Analysis of Lake Desiccation and Groundwater Storage Changes Using Google Earth Engine: The Case of Demirköprü Dam Reservoir, Türkiye.

[5] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Rowland, J., … & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, 150066.

[6] Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Crow, W. T., De Lannoy, G. J. M., Kimball, J. S., … & Ardizzone, J. V. (2017). Global assessment of the SMAP Level-4 surface and root-zone soil moisture product using assimilation diagnostics. Journal of Hydrometeorology, 18(12), 3217–3237.

[7] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., … & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049.

[8] Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., … & Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(3), 381–394.

[9] Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. Remote Sensing of Environment, 114(1), 168–182.

İznik Gölü Su Mevcudiyetinin Budyko Eğrisi ile Değerlendirilmesi ve Geleceğe Yönelik Tahmini

Muhsin VANOLYA*
Vanolya Su Ekosistemleri, Ankara/Çankaya, 0000-0002-3519-1877
mvanolya@sueko.com.tr

Nezahat GÜLÜCÜK BARLAS
Akar-Su Mühendislik, Ankara/Çankaya, 0009-0000-7396-874X
ngbarlas@akarsu.com.tr

Turgut Muhammet TURGUT
Akar-Su Mühendislik, Ankara/Çankaya, 0009-007-6175-6839
tmturgut@akarsu.com.tr

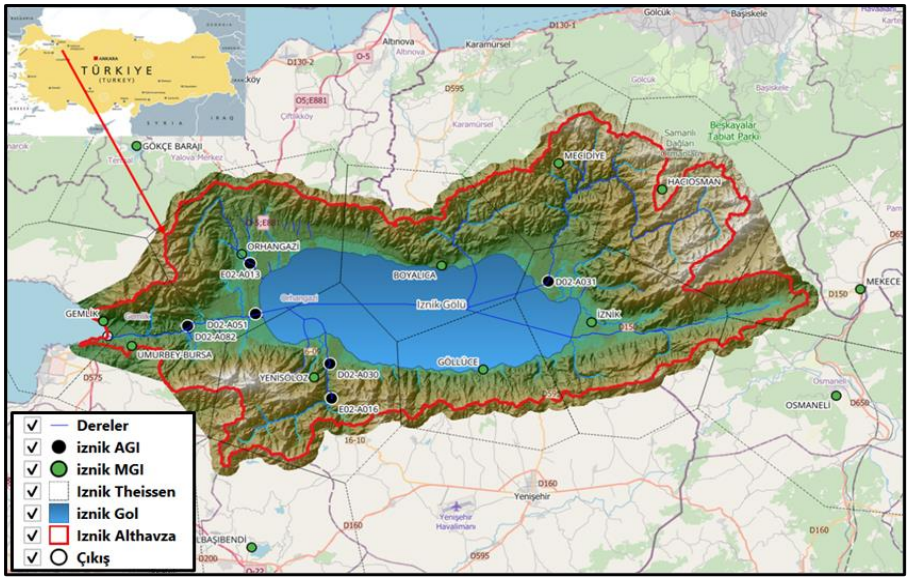
Anahtar Kelimeler: İznik Gölü, su bütçesi, Budyko Hipotezi, iklim değişikliği

1. Amaç

İznik Gölü, 303 km² yüzey alanıyla Marmara Bölgesi'nin en büyük doğal gölüdür. Havzanın yıllık yağışı, mevcut istasyon verilerine göre 450–900 mm arasında değişmektedir. Tarımsal sulama, endüstriyel su kullanımı, göl yüzeyinden buharlaşma ve gölü besleyen yüzeysel ve yeraltı suyu akımlarındaki azalma, gölün su bütçesi üzerinde birlikte baskı oluşturmaktadır [1–3]. Bu çalışmanın amacı, İznik Gölü Havzası'nın uzun dönemli su potansiyelindeki değişimi tahmin etmek için Budyko Eğrisi yaklaşımına dayalı bir değerlendirme çerçevesi geliştirmektir. Budyko analiziyle yağış, potansiyel evapotranspirasyon (PET), gerçek evapotranspirasyon ve akım arasındaki uzun dönemli enerji–su dengesi incelenmiştir. Yaklaşım, 1991–2020 referans dönemi verileriyle kalibre edilmiş; 2021–2100 dönemi için CMIP6 SSP senaryoları altında 20 yıllık dönemler itibarıyla su mevcudiyeti ve uzun dönemli akım değişimleri tahmin edilmiştir.

2. Materyal ve yöntem

İznik Gölü, tektonik kökenli, tatlı su niteliğinde ve yaklaşık 70 m derinliğindedir. Gölü çevreleyen dağlık alanlar, yağış, sıcaklık ve akış üzerinde belirgin topografik gardiyanlar oluşturmaktadır. Havzanın özellikleri ve gözlem istasyonları Şekil 1'de sunulmuştur. Göl çevresindeki havza 938 km², göl çıkışına kadar toplam drenaj alanı ise 1.241 km²'dir. Havzanın yükseltisi göl kıyısındaki 83 m'den 1.285 m'ye ulaşmaktadır.



Şekil 1. İznik Gölü, Havzası ve çalışma alanın dereler ve hidroklimatolojik İstasyonları

Uzun ve Garipağaoğlu [1], 1985–2019 döneminde havzanın arazi kullanımında önemli değişimler meydana geldiğini ve doğal tehlikeler ile insan kaynaklı baskıların birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Master Plan'a göre havzadaki karla kaplı alan oranı %10'un altındadır. Yapımı devam eden İznik Barajı, 3.885 ha tarım alanının sulanması için 13,5 hm³ ve içme suyu temini için yaklaşık 11 hm³ su sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca havzada üç gölet ve yaklaşık 4.000 ha halk sulaması bulunmakta olup toplam su kullanımı 58 hm³'tür. Göl alanı da dikkate alınarak havzanın yıllık su potansiyeli 362 hm³ olarak hesaplanmıştır. Özen ve diğerleri [2], 1955–2001 dönemine ait aylık minimum göl seviyelerini ARMA modeliyle tahmin etmiş; ancak bu yaklaşım gölün fiziksel su bütçesini doğrudan temsil etmemiştir.

Bu çalışmada İznik Gölü'nün mevcut ve gelecekteki su potansiyeli, hidroklimatolojik gözlemler ile Budyko denklemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Geleceğe ait günlük yağış ve sıcaklık serileri, NEX-GDDP-CMIP6 veri setindeki EC-Earth3 iklim modeli kullanılarak SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları için elde edilmiştir. Model verilerine 1991–2020 referans dönemi esas alınarak yanlılık düzeltmesi uygulanmış, potansiyel evapotranspirasyon (PET) ise tarihsel ve gelecek dönemler için aynı yöntemle hesaplanmıştır. Analizler, 1991–2020 referans dönemi ile 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 ve 2081–2100 olmak üzere dört gelecek dönem için gerçekleştirilmiştir.2.2. Budyko Hipotez Analizi
Budyko Hipotezi, uzun dönemli su ve enerji dengesi arasındaki ilişkiye dayanarak bir havzaya düşen yağışın evapotranspirasyon ve akış bileşenleri arasında nasıl paylaşıldığını açıklamaktadır. Yaklaşımın ilk temelleri Schreiber (1904) ve Ol'dekop (1911) tarafından ortaya konulmuş; Budyko (1948, 1974) ise iklimsel su ve enerji kısıtlarını birlikte ele alarak yöntemi sistematik bir hidroklimatolojik çerçeveye dönüştürmüştür. Budyko yaklaşımında bir havzanın uzun dönemli su dengesi; yağış (P), gerçek evapotranspirasyon (ET), toplam akış (Q) ve su depolamasındaki değişim (ΔS) kullanılarak aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir:

$$P = ET + Q + \Delta S \tag{1}$$

Uzun zamanda ΔS sıfıra yakın ve P = ET + Q dur. Yöntemde havzanın hidroklimatolojik durumu iki boyutsuz göstergeyle tanımlanmaktadır:

Kuraklık İndeksi = PET / P ve Evaporatif İndeks = ET / P

Burada PET/P oranı havzanın nemli veya kurak iklim koşullarını, ET/P oranı ise yağışın evapotranspirasyon ayrılan bölümünü göstermektedir. PET/P değerinin artması, su talebine kıyasla yağışın azaldığını ve havzanın daha kurak koşullara yöneldiğini ifade etmektedir. Metodu daha sonra, Pike (1964), Fu [10], Choudhury (1999) ve Zhang vd. (2004) ele alarak, yeni denklemler dâhil edip, bu metot bugüne gibi hem iklim değişimi ve hem insan müdahalelerin etkilerin ele almıştır. Örnek olarak Fu eşitliği kullanıldığında Budyko ilişkisi aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\frac{AET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left[1 + \left(\frac{PET}{P}\right)^{\omega}\right]^{\frac{1}{\omega}} \tag{2}$$

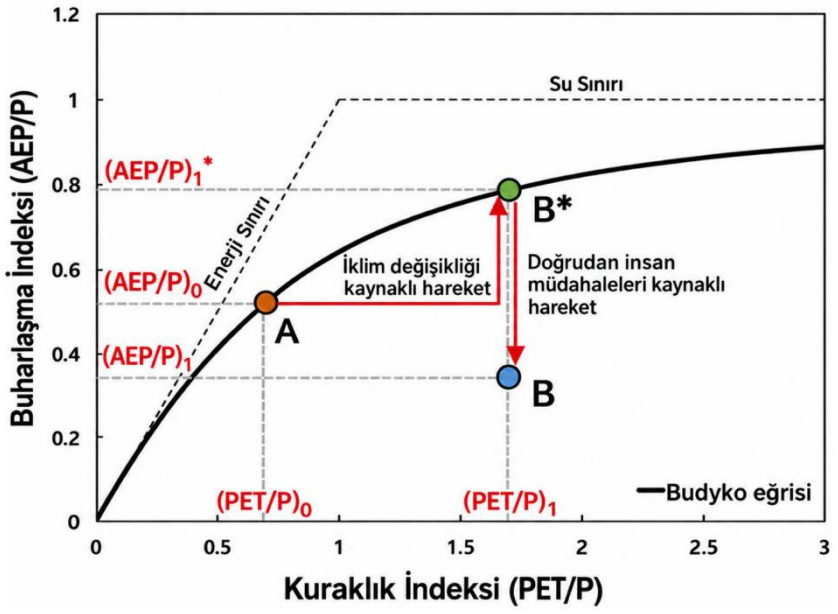
Denklemdeki ω parametresi; bitki örtüsü, toprak yapısı, topoğrafya, drenaj özellikleri ve havzanın su tutma kapasitesi gibi fiziksel özelliklerin bütünleşik etkisini temsil etmektedir. Şekil 2'de Budyko eğrisi ve havza için insan ve iklim değişimi doğrultusunda kullanılması gösterilmektedir. Fu parametre, geçmiş döneme ait yağış, potansiyel evapotranspirasyon, gerçek evapotranspirasyon ve akım verileri kullanılarak kalibre edilmektedir.

İznik Gölü gibi depolama etkisinin önemli olduğu kapalı veya yarı kapalı havzalarda Budyko yöntemi, uzun dönemli doğal su mevcudiyetinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Bu nedenle Budyko analizi, göl su dengesi modelini destekleyen ve gelecekteki iklimsel su potansiyelini ortaya koyan tamamlayıcı bir yöntem olarak uygulanmıştır. Yalnızca sıcaklık verisi bulunan aylarda PET, FAO-56 Hargreaves–Samani yöntemiyle hesaplanır [7]:

$$PET = 0{,}0023 \cdot Ra \cdot (Tort + 17{,}8) \cdot \sqrt{T_{max} - T_{min}} \tag{3}$$

Bölgede mevcut günlük gözlem verileri incelenmiş ve veri serilerinde önemli boşluklar bulunduğu belirlenmiştir. Veriler tamamlanıp, 1981-2014 arası 6 adet meteoroloji istasyonu ve 5 adet akım gözlem istasyonu verileri DSİ sitesinden alınarak hesaplar dahil edilmiştir. 1991–2020 arası akım verileri incelenip, Havza kara kısmının akımı yaklaşık 303 hm³ olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, 1991–2020 referans dönemi için mevcut buharlaşma, sıcaklık ve yağış hesapları yapılmış olup, İklim modeli için

günlük re-analiz sıcaklık ve yağış verileri düzenlenmiştir. Budyko yaklaşımındaki w parametresi referans dönem için kalibre edilmiştir.



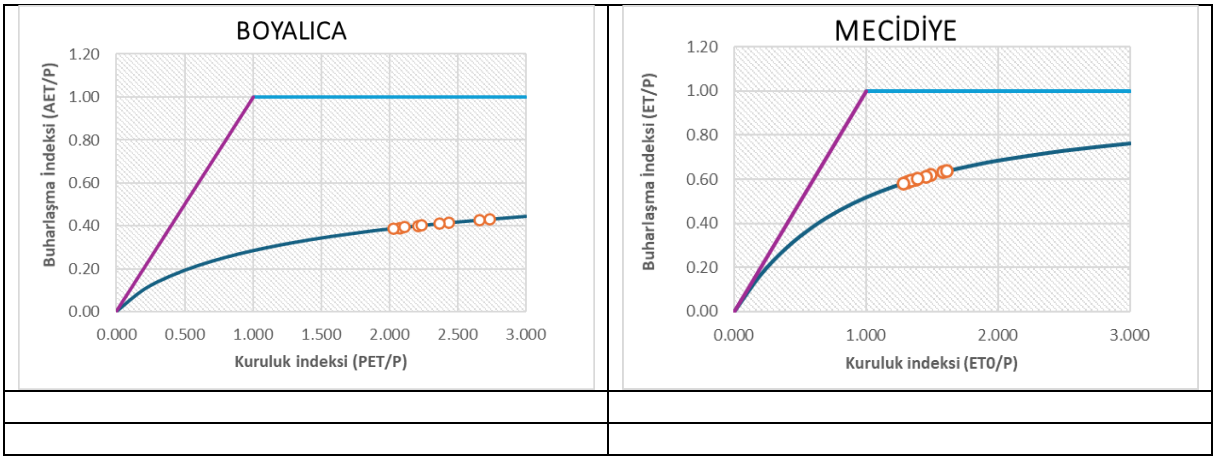
Şekil 2. İklim değişikliği ve insan faaliyetlerine bağlı olarak Budyko eğrisi üzerindeki değişim (değişim öncesi dönemde havzanın durumu: A; iklim değişikliğinin etkisiyle oluşan durum: B*; iklim değişikliği ve doğrudan insan müdahalelerinin birleşik etkisiyle oluşan durum: B; A durumundaki gerçek buharlaşma indeksi: $(AEP/P)_0$; B* durumundaki gerçek buharlaşma indeksi: $(AEP/P)_1$*; B durumundaki gerçek buharlaşma indeksi: $(AEP/P)_1$; A durumundaki kuraklık indeksi: $(PET/P)_0$; B* ve B durumlarındaki kuraklık indeksi: $(PET/P)_1$)

Kalibre edilen Budyko parametresi, EC-Earth3 iklim modelinin 2021–2100 dönemine ait senaryo verilerine uygulanarak gelecekteki gerçek evapotranspirasyon (AET) değerleri hesaplanmıştır. Gelecek dönem akımları ise basitleştirilmiş Budyko su dengesi eşitliği kullanılarak \(Q=P-AET\) bağıntısıyla elde edilmiştir. Şekil 2'de, bölgedeki ve İznik Gölü çevresindeki meteoroloji istasyonlarının Budyko eğrisi üzerindeki konumları ile mevcut ve gelecek dönemlerde kuraklık ve buharlaşma indekslerinde öngörülen değişimler sunulmuştur.

3. Değerlendirme

Kullanılan Budyko yaklaşımı, uzun dönemli hidrolojik sonuçların enerji ve su sınırları içinde kalıp kalmadığını değerlendirmekte ve bu çalışmada İznik Gölü Havzası'nın mevcut verilerine uygulanmaktadır. Sonuçlar genel olarak kuraklık indeksinin arttığını ve iklim değişikliğine bağlı olarak havza akımının azaldığını göstermektedir. Havzanın kara alanı için oluşturulan Budyko eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Ancak 2021–2040 döneminde SSP2-4.5 senaryosu altında belirgin bir azalma, SSP5-8.5 senaryosunda ise artış hesaplanmıştır. Senaryolar arasındaki bu farklılık, gözlem verilerinin uzunluğu ve güvenilirliği ile günlük iklim modeli verilerine uygulanan yanlılık düzeltmesinin sonuçlar üzerindeki önemini göstermektedir.

Bu çalışma yalnızca iklim değişikliğinin etkisini değerlendirmektedir. Gelecek çalışmalarda sabit iklim–değişen su çekimi, değişen iklim–değişen su çekimi ve arazi örtüsüne bağlı Budyko \ w parametresi değişimleri de incelenmelidir. Böylece iklim kaynaklı kuraklaşma sinyali ile yönetilebilir insan kaynaklı su kullanım baskısı birbirinden ayrılabilir.
İznik Gölü açısından temel konu, havzanın akış potansiyeli ile göl seviyesinin aynı fiziksel büyüklüğü ifade etmemesidir. Budyko yaklaşımıyla hesaplanan Akım, havzanın uzun dönemli toplam akış potansiyelini verir. Göl seviyesi ise göl yüzeyine düşen yağış, göl yüzeyinden buharlaşma, Garsak çıkışı, gölden yapılan doğrudan çekimler, kot–alan–hacim ilişkisi ve yeraltı suyu alışverişi dikkate alınarak ayrı bir su bütçesiyle hesaplanmalıdır. Bu ayrım yapılmadan akımdaki yüzde değişimin göl seviyesindeki yüzde değişim olarak yorumlanması fiziksel açıdan doğru değildir.



Şekil 3. İznik Gölü havzasında mevcut istasyonların geleceğe doğru ve iklim değişikliğinde Budyko eğrisinde buharlaşma ve kuraklık indeksi

4. Sonuçlar

İznik Gölü, iklim değişikliğine duyarlı bir su kütlesi olduğundan, gelecekteki durumunun uzun süreli ve güvenilir verilerle değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışma, iklim değişikliğinin etkilerini ortaya koymayı amaçlamakla birlikte, havzadaki gözlem istasyonlarının ve özellikle buharlaşma ölçümlerinin sınırlı olması sonuçların belirsizliğini artırmaktadır. Bu nedenle kara alanı için evapotranspirasyonu, göl yüzeyi için ise buharlaşmanın hesaplanmasında uygun ve birbirinden farklı yöntemler seçilmelidir.

Budyko yaklaşımı, havzanın uzun dönemli enerji–su dengesini ve iklim değişikliğine duyarlılığını değerlendirmektedir. Bununla birlikte, gelecek tahminleri tek bir iklim modelinin sonucu olarak değil, CMIP6 model topluluğunun medyanı ve belirsizlik aralığıyla sunulmalıdır. Ayrıca SSP senaryoları, su kullanımı ve arazi örtüsü değişimlerinin etkileri ayrı deneyler hâlinde değerlendirilmelidir. Böylece iklim değişikliğinin doğal hidrolojik etkileri ile insan kaynaklı baskılar birbirinden ayrılarak daha güvenilir gelecek öngörüleri üretilebilir.

Araştırmanın devamında bu konu, kara alanı ve göl olmak üzere iki bileşenden oluşan kavramsal bir modelle incelenecektir. Ayrıca kavramsal hidrolojik model, SWAT+ gibi fiziksel tabanlı bir model ve Budyko yaklaşımı birlikte kullanılarak iklim değişikliği ile insan faaliyetlerinin kısa ve uzun dönemli etkileri karşılaştırılacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Uzun, M., Garipağaoğlu, N. (2019). İznik Gölü Havzası'nda doğal ortam koşullarının havza yönetimi ve planlamasına etkisi. Doğu Coğrafya Dergisi, 24(42), 1–24. https://doi.org/10.17295/ataunidcd.621776.

[2] Özen, A., Ediş, S., Göl, C. (2014). Modelling of minimum water levels of Lake İznik by using time series models. Journal of Biological and Environmental Sciences, 8(24).

[3] Akbulak, C. (2006). İznik Depresyonu'nun Beşeri ve İktisadi Coğrafya Açısından İncelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

[4] Feldman, A. D. (Ed.) (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

[5] Bergström, S. (1992). The HBV Model—Its Structure and Applications. SMHI Reports Hydrology No. 4.

[6] Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. Journal of Hydrology, 318, 200–214.

[7] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

[8] Beven, K., Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 6(3), 279–298.

[9] Budyko, M. I. (1974). Climate and Life. Academic Press, New York.

[10] Fu, B. P. (1981). On the calculation of evaporation from land surface. Scientia Atmospherica Sinica, 5(1), 23–31.

[11] Xu, R., Qiu, D., Wu, C., Mu, X., Zhao, G., Sun, W., Gao, P. (2023). Quantifying climate and anthropogenic impacts on runoff using the SWAT model, a Budyko-based approach and empirical methods. Hydrological Sciences Journal, 68(10), 1358–1371.

[12] Nourani, V., Gholinia, A., Abbaszadeh, P., Ahmadi, R., Ke, C. Q. (2024). Unravelling the impact of climate change and anthropogenic activities on streamflow: the benefit of newly developed evapotranspiration data. Hydrological Sciences Journal, 69(14), 2026–2043.

[13] Jia, Z., Zou, J., Guan, Z., Shi, J., Qiang, M., Lei, R., Liu, L., Zhang, T. (2026). Characteristics and attribution analysis of runoff changes based on Budyko hypothesis and SWAT model in the Heihe River Basin, China. Hydrology Research, 57, 100043.

Uzaktan Algılanmış SWOT-Dinamik Dünya Verileriyle İzmir İçme Suyu Rezervuarlarının Yükseklik–Alan Dinamiklerinin Analizi

Onur Güngör ŞAHİN*
Uluslararası Su Kaynakları Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye
ORCID No: 0000-0002-0502-1033
onursahin@iyte.edu.tr

Yiğithan KAZANCI
Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye
ORCID No: 0000-0003-2961-923X
yigithankazanci@iyte.edu.tr

Orhan GÜNDÜZ
Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye
ORCID No: 0000-0001-6302-0277
orhangunduz@iyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler: uzaktan algılama, SWOT, sentinel 2, dinamik dünya, rezervuar yükseklik alan eğrileri

1. Amaç

İnsan kaynaklı su çekimleri, arazi kullanımındaki değişimler ve rezervuar işletme faaliyetleri, havzalardaki doğal akış rejimini ve hidrolojik döngüyü değiştirerek su depolamasında önemli zamansal değişimlere yol açmaktadır. Bu nedenle, özellikle kentsel su temininde kullanılan rezervuarlardaki su yüzeyi kotu, alanı ve bunlara bağlı hacim değişimlerinin düzenli olarak izlenmesi, antropojenik baskıların su kaynakları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. SWOT misyonu, sağladığı yüksek hassasiyetli su yüzeyi kotu gözlemleriyle rezervuarlardaki bu değişimlerin geniş alanlarda izlenmesine olanak sunarken, Sentinel-2 görüntülerinden üretilen 10 m mekânsal çözünürlüklü Dinamik Dünya verileri de su yüzeyi alanındaki değişimlerin daha ayrıntılı ve daha sık zamansal çözünürlükle belirlenmesini sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, İzmir kentsel içme suyu sistemi açısından önem taşıyan Tahtalı, Gördes ve Kutlu Aktaş barajlarında SWOT PIXC verilerinden üretilen su yüzeyi kotlarının doğruluğunu İZSU günlük ölçümleriyle değerlendirmek ve bu kotları Dinamik Dünya verilerinden hesaplanan su yüzeyi alanlarıyla eşleştirerek rezervuarlara özgü kot-alan ilişkilerinin uzaktan algılama yoluyla belirlemektir. Oluşturulan kot-alan eğrilerinin bütünleştirilmesiyle hacim değişimlerinin tahmin edilmesi mümkün olduğundan, önerilen yaklaşımın arazi ölçümü bulunmayan rezervuarlarda antropojenik etkilerden kaynaklanan su depolama değişimlerinin izlenmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 SWOT Verileri ve Çalışma Alanı

Yüzey Suyu ve Okyanus Topografyası (SWOT), su yüzey kotları ve mekânsal yayılımlarını radar teknikleri kullanılarak gözlemlemek üzere geliştirilen yeni nesil bir uydu misyonudur. İki boyutlu ve yüksek çözünürlüklü ölçümlerle SWOT, kıyı çizgisi değişken göl ve rezervuarların izlenmesinde güncel uzaktan algılama yöntemleri arasında en gelişmiş teknolojilerin başında gelmektedir [1,4]. Bu çalışmada, SWOT veri setinden her ölçüm pikselinin coğrafi konumunu, su yüzeyi yüksekliğini, sınıflandırma bilgisini ve kalite bayraklarını ayrı ayrı içeren PIXC ürünü kullanılmıştır [4]. PIXC verileri, su piksellerinin rezervuarların değişen kıyı sınırlarına göre yeniden seçilebilmesine ve güvenilir olmayan ölçümlerin piksel düzeyinde elenebilmesine olanak sağlamaktadır [3,4].

Çalışma, İzmir kentsel içme suyu sistemi açısından önem taşıyan Tahtalı, Gördes ve Alaçatı Kutlu Aktaş rezervuarlarını kapsamaktadır. Uydu veri seti, rezervuarların azami su yayılım sınırlarına göre kırpılmış ve SWOT seviye iki PIXC veri setleri sözü edilen barajlar için temin edilmiştir. Tahtalı için 220, Gördes için 147 ve Kutlu Aktaş için 110 PIXC dosyası bulunmaktadır. Tahtalı ve Kutlu Aktaş kayıtları 2 Ağustos 2023 ile 2 Temmuz 2026, Gördes kayıtları ise 2 Eylül 2023 ile 12 Temmuz 2026 dönemlerini kapsamaktadır. PIXC ürünlerinden piksel konumu, sınıflandırma, yükseklik, geoit ve ürüne özgü kalite

bayrakları kullanılmıştır. Yer ölçümü referansı olarak İzmir Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (İZSU) 21 Temmuz 2023- 31 Mayıs 2026 dönemine ait günlük rezervuar durum kayıtları alınmıştır. İZSU'dan temin edilen bu su seviye kotu verileri bu çalışmadan elden edilen sonuçların doğrulanması amacıyla kullanılmıştır.

Rezervuar su yüzeyi alanlarının belirlenmesinde, Sentinel-2 Çok Bantlı Görüntüleme Aracı gözlemlerinden üretilen 10 m mekânsal çözünürlüklü Dinamik Dünya veri seti kullanılmıştır [5, 6]. Dinamik Dünya, her piksel için arazi örtüsü sınıfını ve su sınıfına ait olasılık değerini Sentinel-2 görüntüleriyle eş zamanlı olarak sunmaktadır [6]. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında su yüzeyi kotları SWOT PIXC verilerinden, su yüzeyi alanları ise Dinamik Dünya verilerinden elde edilmiştir. Dinamik Dünya veri setinin çözünürlüğünün 10 m olması sebebiyle, SWOT'un değişken gözlem geometrisine kıyasla rezervuar kıyılarındaki değişimin daha ayrıntılı temsil edilmesine olanak sağladığından alan hesabında tercih edilmiştir.

2.2 Veri İşleme ve Doğrulama

Aynı tarihe ait Dinamik Dünya görüntüleri günlük bir mozaikte birleştirilmiş; Sentinel-2 sınıflandırmasında bulut gölgesi ve bulut olarak işaretlenen pikseller alan hesabından çıkarılmıştır. Su olarak sınıflandırılan pikseller için de, rezervuarın ana su gövdesine bağlı bölüm korunmuştur. Günlük alanlar, hedef tarihin önceki ve sonraki 15 günündeki temiz gözlemlerle karşılaştırılarak zamansal açıdan kontrol edilmiştir. SWOT kotu ile alan eşleştirmesinde öncelikle aynı tarih, uygun görüntü bulunmadığında ise en yakın ±2 günlük Dinamik Dünya gözlemi kullanılmıştır.

PIXC verilerinde açık su sınıfındaki pikseller seçilmiş ve her dosyanın metadata tanımlarında kötü olarak belirtilen kalite bayraklarını taşıyan gözlemler çıkarılmıştır. Piksel su yüzeyi kotları yükseklik ve geoit değişkenlerinden hesaplanmış; aynı UTC gününe ait geçerli gözlemler birleştirilerek günlük rezervuar değerleri elde edilmiştir. Günlük seride yalnız nihai kalite kontrolünü geçen ve piksel kotlarının histogram aralığı 0,50 m veya daha küçük olan yüksek güvenli SWOT gözlemleri kullanılmıştır. İZSU veri serilerinde aykırı değerler ±15 günlük serilerek kullanılarak belirlenmiş ve veri setinden atılmıştır.

Kalite kontrolü yapılmış SWOT ve İZSU değerleri aynı takvim gününe göre eşleştirilmiştir. Uyum, Pearson korelasyon katsayısının karesi (R^2), İZSU eşleşmelerinin gözlenen kot aralığına göre normalize edilmiş kök ortalama kare hatası (nRMSE) ve SWOT eksi İZSU ortalama farkının aynı aralığa oranı (nBias) ile değerlendirilmiştir. Doğrulama ölçütleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(S_i - \overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(S_i - \overline{S})^2}}\right]^2 \quad (1)$$

$$\text{nRMSE } (\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}}{O_{max} - O_{min}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{nBias } (\%) = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)}{O_{max} - O_{min}} \times 100 \quad (3)$$

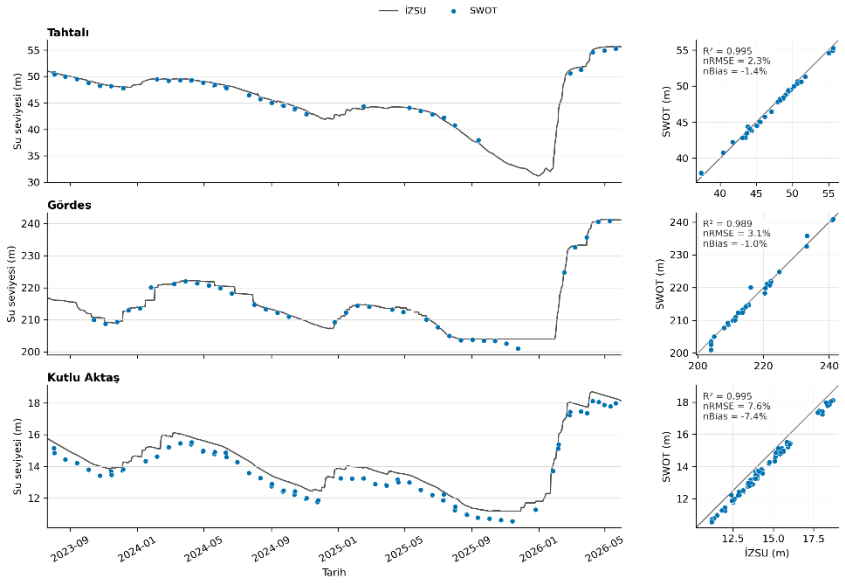
Eşitliklerde S_i aynı gündeki SWOT kotunu, O_i karşılık gelen İZSU kotunu, n eşleşme sayısını, O_{max} ve O_{min} ise eşleşmiş İZSU kotlarının en büyük ve en küçük değerlerini göstermektedir. R^2 değeri 0 ile 1 arasında değişmekte ve 1'e yakın değerler iki serinin doğrusal değişiminin daha güçlü biçimde örtüştüğünü göstermektedir. nRMSE'nin 0'a yaklaşması gözlenen kot aralığına göre hatanın küçüldüğünü, nBias'ın 0'a yaklaşması ise sistematik farkın azaldığını ifade etmektedir. Negatif nBias SWOT'un daha düşük, pozitif nBias ise SWOT'un daha yüksek kot verme eğilimine işaret etmektedir.

3. Değerlendirme

Çalışma alanını oluşturan İzmir kentsel içme suyu sistemine katkı sağlayan Tahtalı, Gördes ve Alaçatı Kutlu Aktaş barajlarında İZSU'dan temin edilen çalışma dönemine ait günlük su kotları, referans kot–

alan eğrileri kullanılarak su yüzeyi alanına dönüştürülmüştür. İncelenen dönemde su yüzeyi alanı Tahtalı Barajı'nda 1,77–17,11 km², Gördes Barajı'nda 1,85–8,64 km² ve Kutlu Aktaş Barajı'nda 0,78–2,46 km² arasında değişmektedir. SWOT su seviyesi değişimlerinin üç rezervuarda da İZSU serileriyle yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymuştur (Şekil 1). Tahtalı Barajı'nda 42 eşleşme için R^2 = 0,995, nRMSE = %2,3 ve nBias = −%1,4; Gördes Barajı'nda 36 eşleşme için R^2 = 0,989, nRMSE = %3,1 ve nBias = −%1,0; Kutlu Aktaş Barajı'nda 69 eşleşme için R^2 = 0,995, nRMSE = %7,6 ve nBias = −%7,4 olarak hesaplanmıştır. Negatif nBias değerleri SWOT kotlarının İZSU ölçümlerinden trend olarak daha düşük olduğunu ve en belirgin göreli farkın Kutlu Aktaş Barajı'nda bulunduğunu göstermektedir. Kutlu Aktaş Barajı'nın diğer rezervuarlara göre oldukça küçük bir su yüzeyi alanına sahip olması sebebiyle yüksek olasılıkla SWOT'un mekânsal çözünürlüğü ve kıyı piksellerinin ölçümlerindeki zorluklar sebebiyle bu gölde istatistikler diğer barajlara kıyasla daha düşüktür.

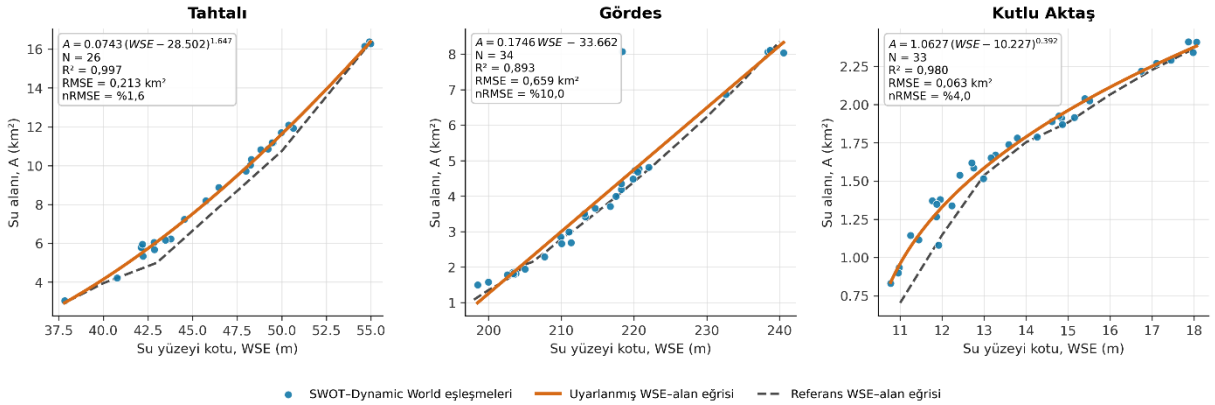
SWOT PIXC verilerinden elde edilen kalite kontrollü su yüzeyi kotları, Dinamik Dünya verilerinden hesaplanan su yüzeyi alanlarıyla gözlem tarihlerine göre eşleştirilmiştir. Yalnızca aynı takvim gününe ait gözlemler kullanıldığında Tahtalı'da 7, Gördes'te 9 ve Kutlu Aktaş'ta 5 olmak üzere toplam 21 eşleşme elde edilmiştir. Eşleştirme aralığının ±1 güne genişletilmesiyle bu sayılar sırasıyla 15, 24 ve 16'ya, toplam eşleşme sayısı ise 55'e yükselmiştir. En yakın ±2 günlük Dinamik Dünya gözlemlerinin de değerlendirmeye alınması sonucunda Tahtalı'da 26, Gördes'te 34 ve Kutlu Aktaş'ta 33 olmak üzere toplam 93 eşleşmeye ulaşılmıştır. Bu eşleşmeler kullanılarak oluşturulan kot–alan ilişkileri, rezervuarla ait gerçek kot-alan ilişkileri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Eşleşme noktalarına uyarlanan eğri Tahtalı ve Kutlu Aktaş için üstsel, Gördes için doğrusal fonksiyonlardan elde edilmiştir. İstatistikler sırayısyla rezervuarlar için Tahtalı'da R^2 = 0,997, RMSE = 0,213 km² ve nRMSE = %1,6; Gördes'te için R^2 = 0,893, RMSE = 0,659 km² ve nRMSE = %10,0 ve Kutlu Aktaş için R^2 = 0,980, RMSE = 0,063 km² ve nRMSE = %4,0 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2'de kesikli çizgiler arazi çalışmalarından alınan referans eğrileri, noktalar SWOT' su yükseklikleri ve Dinamik Dünya alanları, turuncu çizgiyse bu noktaları uydurulan eğrileri belirtmektedir.



Şekil 1. Tahtalı, Gördes ve Kutlu Aktaş rezervuarlarında İZSU ve SWOT su seviyelerinin zaman serisi ve aynı gün karşılaştırmaları

4. Sonuçlar

Kalite kontrollü SWOT PIXC su yüzeyi kotları, üç rezervuarda da İZSU ölçümlerindeki zamansal değişimi yüksek uyumla temsil etmiştir. Doğrulama sonuçlarında R^2 değerleri 0,989-0,995, nRMSE değerleri %2,3-%7,6 ve nBias değerleri-%1,0 ile-%7,4 arasında değişmiştir. Negatif nBias, SWOT kotlarının İZSU ölçümlerine göre sınırlı bir düşük tahmin eğilimi taşıdığını göstermektedir. En yüksek göreli hata Kutlu Aktaş'ta elde edilmiştir. Bu rezervuarın yüzey alanının diğer rezervuarlara göre oldukça küçük olması en muhtemel sebeplerden biridir.



Şekil 2. Tahtalı, Gördes ve Kutlu Aktaş rezervuarlarında SWOT su yüzeyi kotu ile Dinamik Dünya su alanı arasındaki ilişkiler

SWOT kotları ile Dinamik Dünya alanlarının en yakın ±2 günlük aralıkta eşleştirilmesiyle Tahtalı'da 26, Gördes'te 34 ve Kutlu Aktaş'ta 33 olmak üzere toplam 93 kot-alan çifti elde edilmiştir. Su yüzeyi kotu ile alan arasında bütün rezervuarlarda istatistikler R^2 0,893-0,997 ve nRMSE %1,6-%10,0 aralığında hesaplanmıştır. Sonuçlar, SWOT PIXC kotlarının 10 m çözünürlüklü Dinamik Dünya alanlarıyla birlikte kullanılmasının, özellikle düzenli arazi ölçümlerinin sınırlı olduğu dönemlerde rezervuar değişimlerinin izlenmesini destekleyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte küçük rezervuarlarda mekânsal çözünürlük, kıyı geometrisi ve uydu geçişleri arasındaki zamansal farklar, sonuçlar yorumlanırken dikkate alınmalıdır.

Dinamik Dünya'nın SWOT'a göre daha sık gözlem sağlaması, kot-alan ilişkilerinin zamansal sıklaştırma amacıyla kullanılmasına olanak vermektedir. Bu kapsamda Dinamik Dünya ile belirlenen su yüzeyi alanları, oluşturulan eğrilerin ters çözümü kullanılarak ara tarihler için su yüzeyi kotuna dönüştürülebilir ve doğrudan SWOT su kotu ölçümleriyle birleştirilebilir. Bu çalışmada oluşturulan kot–alan eğrileri ve su kotları kullanılarak ardışık tarihler arasında hacim farkları (ΔV) potansiyel olarak hesaplanabilir. Böylece SWOT gözlemleri arasındaki dönemlerde meydana gelen hacimsel su değişimleri daha ayrıntılı biçimde izlenebilir. Bu bilgiler sayesinde rezervuar su bütçelerinin daha hassas olarak ortaya konulması, işletme faaliyetlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi ve insan kaynaklı su kullanımlarının detaylı bir şekilde takip edilebilmesi mümkün görünmektedir. Özellikle kot-alan-hacim eğrilerinin olmadığı veya zaman içinde siltasyon sebebiyle değiştiği rezervuarlarda bu çalışmada sunulan metodoloji ile gereken verilere kolaylıkla ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Karahan, S. M., Gündüz, O. (2025). Hydrological insights from SWOT: Comparative analysis of water surface elevation and area time series from Hydrocron API. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 40, 101790. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101790

[2] Wang, J. et al. (2025). The Surface Water and Ocean Topography Mission (SWOT) Prior Lake Database (PLD): Lake Mask and Operational Auxiliaries. Water Resources Research, 61, e2023WR036896. https://doi.org/10.1029/2023WR036896

[3] Karami, A. et al. (2026). Monitoring small water bodies using SWOT PIXC water level data; insight from on-farm reservoirs. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 43, 102209. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2026.102209

[4] NASA/JPL (2025). SWOT Product Description: Level 2 KaRIn High Rate Water Mask Pixel Cloud Product. JPL D-56411, Revision C.

[5] Drusch, M. et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment, 120, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

[6] Brown, C. F. et al. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data, 9, 251. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4

Atıksu Arıtma Tesislerinde Havalandırma Havuzlarının Hidrodinamik Analizi ve Arıtma Performansının İyileştirilmesi: Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi Örneği

Damla YILMAZ ÇELİK*
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 0000-0003-4207-7105
Damla.yilmaz@btu.edu.tr

Egemen ARAS
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 0000-0002-7553-9313
Egemen.aras@btu.edu.tr

Babak VAHEDDOOST
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 0000-0002-4767-6660
Babak.vaheddoost@btu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: hesaplamalı akışkanlar dinamiği, havalandırma tankı, atıksu arıtma tesisi, ADCP

1. Amaç

Atıksu arıtma tesislerinde biyolojik arıtma proseslerinin etkin ve sürdürülebilir şekilde işletilebilmesi, reaktör içerisindeki hidrodinamik koşulların ve karışımın yeterliliğine bağlıdır. Aktif çamur sistemlerinde kullanılan havalandırma ve karıştırma ekipmanları, askıda katı maddelerin çökelmesini önlemek, biyokütle ile substrat arasındaki teması sürdürmek ve reaktör hacminin etkin kullanımını sağlamak açısından önemli rol oynar [3-4]. Bununla birlikte, tam ölçekli aerobik tankların büyük hacimleri ve karmaşık geometrileri nedeniyle akış alanı homojen olmayabilir; düşük hızlı bölgeler, kısa devre akımları ve yetersiz karışım oluşabilir. Bu hidrodinamik düzensizlikler reaktörün etkin hacmini ve işletme verimliliğini azaltabilir [2, 5].

Aerobik tanklardaki akış ve karışım koşullarının değerlendirilmesinde sayısal modelleme yöntemleri önemli olanaklar sunmasına rağmen, gerçek tesis ölçeğinde gerçekleştirilen ayrıntılı saha ölçümleri hem mevcut işletme koşullarının doğrudan ortaya konulması hem de geliştirilen sayısal modellerin güvenilirliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Büyük ölçekli tanklarda hız bileşenlerinin farklı konum ve derinliklerde belirlenmesi, akış yapısındaki mekânsal değişkenliğin ve düşük hızlı bölgelerin tanımlanmasını sağlar. Saha verileriyle doğrulanan HAD modelleri ise ölçüm noktalarıyla sınırlı kalmadan tankın tüm hacmindeki üç boyutlu akış yapısının ve karışım performansının incelenmesine olanak verir [5, 6].

Bu çalışmanın amacı, tam ölçekli bir kentsel atıksu arıtma tesisinin havalandırma tankındaki hidrodinamik koşulları saha ölçümleri ve HAD modellemesi aracılığıyla incelemektir. Bu kapsamda, farklı konum ve derinliklerde gerçekleştirilen hız ölçümleriyle akış alanının karakteristikleri belirlenmiş; elde edilen üç bileşenli hız verileri üç boyutlu, iki fazlı HAD modelinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Doğrulanan model üzerinden tank genelindeki hız dağılımı, düşük hızlı bölgeler ve mekanik karıştırıcıların performansı değerlendirilmiştir. Böylece gerçek tesis ölçeğindeki saha ölçümleri ile sayısal modelleme bir araya getirilerek havalandırma tanklarının hidrodinamik performansının değerlendirilmesine yönelik uygulamaya dönük bir yaklaşım sunulmuştur [7].

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Saha çalışmaları, Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisinde bulunan tam ölçekli havalandırma tankında gerçekleştirilmiştir. İncelenen tank 140 m uzunluğa, 32 m genişliğe ve 6,7 m toplam derinliğe sahip olup işletme koşullarındaki aktif su derinliği yaklaşık 5,55 m'dir. Tank tabanında 3.840 disk tipi difüzör ve tank içerisinde 40 dev/dk ile çalışan, 2,5 m çapında dört mekanik karıştırıcı bulunmaktadır. Saha ölçümleri, difüzörler ve mekanik karıştırıcılar çalışırken gerçekleştirilmiş ve böylece mevcut işletme koşullarındaki iki fazlı hidrodinamik yapı incelenmiştir.

2.2 Saha Ölçümleri

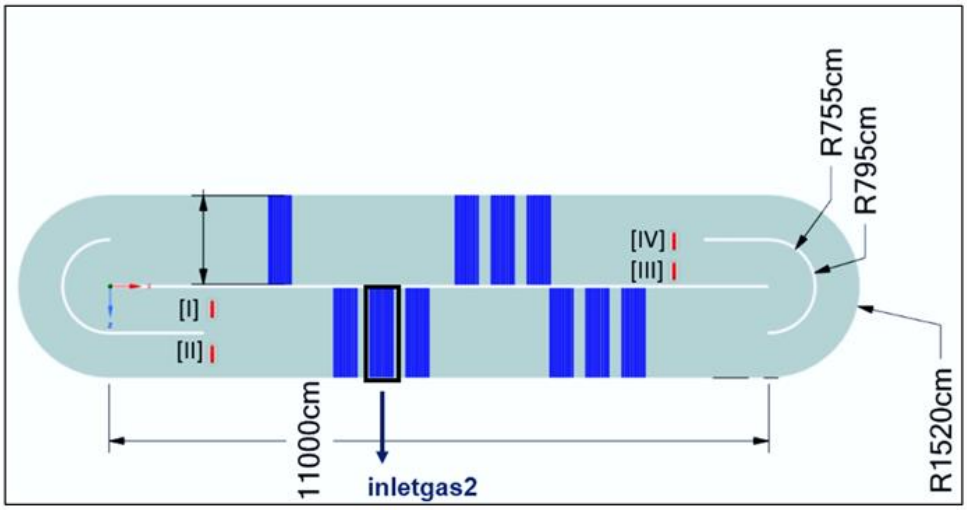
Havalandırma tankındaki üç boyutlu akış yapısının belirlenmesi amacıyla Akustik Doppler Akım Profilleyici (ADCP) kullanılarak kapsamlı saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm noktaları, tankın giriş ve çıkış bölgeleri, doğrusal akış kesimleri ve dönüş bölgelerindeki hidrodinamik değişimleri temsil edecek şekilde tank boyunca dağıtılmıştır. Bu kapsamda toplam 120 farklı konumda hız ölçümü gerçekleştirilmiş ve her bir konumda su kolonunun farklı derinliklerindeki hız bileşenleri kaydedilmiştir. Ölçümler yaklaşık 0,8–4,8 m derinlik aralığında gerçekleştirilerek yalnızca yüzeysel akışın değil, su kolonu boyunca meydana gelen hız değişimlerinin de belirlenmesi sağlanmıştır.

ADCP ile elde edilen üç boyutlu hız verileri kullanılarak tank içerisindeki akım yönleri ve hız büyüklükleri değerlendirilmiş; özellikle düşük hızlı bölgelerin, akışın yön değiştirdiği kesimlerin ve mekanik karıştırıcıların etkili olduğu alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece tam ölçekli tankın mevcut işletme koşullarındaki hidrodinamik davranışını temsil eden kapsamlı bir deneysel veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen hız verileri ayrıca sonraki aşamada geliştirilen HAD modelinin doğrulanmasında kullanılmıştır.

2.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Havalandırma tankındaki üç boyutlu akış yapısının belirlenmesi amacıyla ADCP kullanılarak kapsamlı saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm noktaları; tankın giriş ve çıkış bölgeleri, doğrusal akış kesimleri ve dönüş bölgelerindeki hidrodinamik değişimleri temsil edecek şekilde tank boyunca dağıtılmıştır. Tankın A ve B olarak tanımlanan iki bölümünün her birinde 10 konum seçilmiş ve her konumda altı farklı derinlikte ölçüm yapılarak toplam 120 hız verisi elde edilmiştir. Ölçümler su yüzeyinin 0,8 m altından başlayarak 0,8 m aralıklarla 4,8 m derinliğe kadar sürdürülmüş; böylece su kolonu boyunca üç bileşenli hız değişimleri kaydedilmiştir.

ADCP ile elde edilen üç boyutlu hız verileri kullanılarak tank içerisindeki akım yönleri ve hız büyüklükleri değerlendirilmiş; özellikle düşük hızlı bölgelerin, dönüş kesimlerindeki akış değişimlerinin ve mekanik karıştırıcıların etkili olduğu alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Tam ölçekli tanklarda ADCP verilerinin akustik girişim, sınır yakınlığı ve yüksek türbülans gibi etkenlerden etkilenebilmesi nedeniyle ölçüm düzeni ve verilerin fiziksel tutarlılığı ayrıca dikkate alınmıştır [9]. Elde edilen hız verileri iki fazlı HAD modelinin doğrulanmasında kullanılmıştır.



Şekil 1. Havalandırma tankının yerleşimi ve hesaplama alanı

Tank içerisindeki hava-su etkileşimi, gaz ve sıvı fazlarını içeren Euler-Euler iki fazlı yaklaşımla modellenmiştir. Difüzörlerden verilen havanın ve mekanik karıştırıcıların oluşturduğu momentumun sıvı faz hız alanı üzerindeki birleşik etkileri dikkate alınmıştır. Karıştırıcıların dönme hareketini zamana bağlı olarak temsil etmek amacıyla kayan ağ (sliding mesh) yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal çözümde yaklaşık 8,08 milyon elemanlı ağ tercih edilmiş; giriş-çıkış bölgeleri, difüzör hatları ve karıştırıcı çevrelerinde yerel ağ sıkılaştırması uygulanmıştır. Ağ bağımsızlığı değerlendirmesi, HAD çalışmalarında sayısal

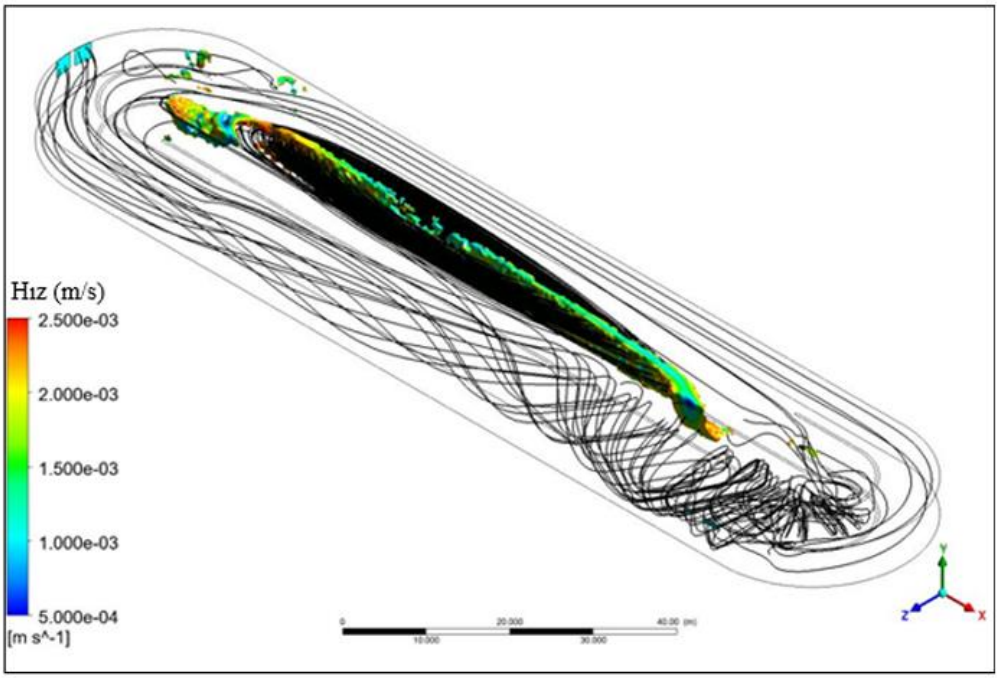
ayrıklaştırma belirsizliğinin raporlanmasına ilişkin kabul görmüş esaslar doğrultusunda yürütülmüştür [1, 8].

HAD modeliyle elde edilen sıvı faz hızları, ADCP ile farklı konum ve derinliklerde ölçülen hız verileriyle karşılaştırılmıştır. Toplam 120 ölçüm noktasına dayalı doğrulamada genel ortalama bağıl hata %9,2 olarak hesaplanmış; sayısal modelin tanktaki temel üç boyutlu akış karakteristiklerini kabul edilebilir doğrulukla temsil ettiği belirlenmiştir. Doğrulanan model aracılığıyla, ölçüm noktaları dışında kalan bölgeler de dahil olmak üzere tankın tüm hacmindeki hız dağılımı ve karışım performansı incelenmiştir [7].

3. Değerlendirme

Havalandırma tankında gerçekleştirilen saha ölçümleri, hız alanının konuma ve derinliğe bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. ADCP ile elde edilen üç bileşenli hız verileri, difüzörler ve mekanik karıştırıcıların etkisi altında karmaşık ve üç boyutlu bir akış yapısının oluştuğunu göstermiştir. Hızların tank boyunca homojen dağılmaması, belirli bölgelerde karışım etkinliğinin sınırlı kaldığına işaret etmektedir. Bu bulgu, tam ölçekli havalandırma tanklarında yalnızca ortalama hızların değil, hız alanının mekânsal dağılımının da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir [3, 7].

Saha ölçümleriyle doğrulanan iki fazlı HAD modeli, ölçüm noktaları dışında kalan bölgeler de dahil olmak üzere tank genelindeki üç boyutlu hız alanının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Sayısal hız alanında düşük hızlı bölgeler belirlenmiş ve karışım performansının tank hacmi boyunca homojen olmadığı görülmüştür. Nicel değerlendirmede 0,30 m/s hız değeri eşik olarak alınmış; mevcut işletme koşullarında bu değerin üzerindeki tank hacminin toplam hacme oranı yalnızca %13,2 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, mevcut karıştırma düzeninde tankın önemli bir bölümünde düşük hız koşullarının hâkim olduğunu ve hidrodinamik iyileştirme potansiyeli bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Havalandırma tankı içerisinde sirkülasyon bölgesi

Saha hız ölçümleri ile HAD sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, mevcut karıştırıcı düzeninin tank genelinde yeterli ve homojen bir eksenel dolaşım oluşturamadığı görülmüştür. Özellikle reaktörün merkez kesimlerinde geniş düşük hızlı bölgeler oluşması, karıştırıcı kaynaklı momentumun tank boyunca etkin biçimde taşınamadığını göstermektedir. Bu bulgular, tam ölçekli havalandırma tanklarında saha ölçümleriyle doğrulanmış HAD analizlerinin işletme sorunlarının belirlenmesi ve alternatif karıştırma düzenlerinin ön değerlendirilmesi için etkili bir araç olduğunu ortaya koymaktadır [7, 8].

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisindeki tam ölçekli bir havalandırma tankının hidrodinamik koşulları saha ölçümleri ve üç boyutlu HAD modellemesi birlikte kullanılarak değerlendirilmiştir. ADCP ile 20 konumda ve altı farklı derinlikte gerçekleştirilen toplam 120 hız ölçümü, tank içerisindeki akış alanının konuma ve derinliğe bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Elde edilen hız verileri iki fazlı HAD modelinin doğrulanmasında kullanılmış ve genel ortalama bağıl hata %9,2 olarak hesaplanmıştır. Doğrulanmış HAD modeliyle tankın tamamındaki üç boyutlu hız alanı incelendiğinde, karışım koşullarının tank hacmi boyunca homojen olmadığı ve geniş düşük hızlı bölgelerin oluştuğu belirlenmiştir. Mevcut işletme koşullarında 0,30 m/s eşik değeri esas alındığında, bu değerin üzerindeki hızlara sahip hacmin toplam tank hacminin yalnızca %13,2'sini oluşturduğu hesaplanmıştır. Bu bulgu, mevcut karıştırıcıların oluşturduğu eksenel momentumun tank boyunca yeterli biçimde taşınamadığını ve karıştırma düzeninin hidrodinamik açıdan geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, tam ölçekli havalandırma tanklarının performansı yalnızca ortalama işletme parametreleriyle değil, hız alanının mekânsal dağılımı, düşük hızlı bölgelerin hacimsel oranı ve karıştırıcıların momentum aktarım kapasitesi birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır. Saha ölçümleriyle doğrulanmış HAD modelleri, mevcut işletme koşullarının değerlendirilmesinin yanı sıra karıştırıcı hızı ve dönme yönü gibi uygulanabilir işletme seçeneklerinin karşılaştırılması için de güvenilir bir mühendislik aracı sunmaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., & Raad, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, 130(7), 078001. https://doi.org/10.1115/1.2960953

[2] Climent, J., Martínez-Cuenca, R., Carratalà, P., González-Ortega, M. J., Abellán, M., Monrós, G., & Chiva, S. (2019). A comprehensive hydrodynamic analysis of a full-scale oxidation ditch using Population Balance Modelling in CFD simulation. Chemical Engineering Journal, 374, 760-775. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.195

[3] Karpinska, A. M., & Bridgeman, J. (2016). CFD-aided modelling of activated sludge systems: A critical review. Water Research, 88, 861-879. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.008

[4] Metcalf & Eddy, Inc., & AECOM. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

[5] Samstag, R. W., Ducoste, J. J., Griborio, A., Nopens, I., Batstone, D. J., Wicks, J. D., Saunders, S., Wicklein, E. A., Kenny, G., & Laurent, J. (2016). CFD for wastewater treatment: An overview. Water Science and Technology, 74(3), 549-563. https://doi.org/10.2166/wst.2016.249

[6] Yılmaz Çelik, D., Yılmaz, N., Şibil, R., Aras, E., & Vaheddoost, B. (2025). Hydrodynamic optimization of full-scale aeration tanks using field measurements and computational fluid dynamics modeling. Physics of Fluids, 37(8), 087175. https://doi.org/10.1063/5.0284593

[7] Yılmaz Çelik, D., Aras, E., Yılmaz, N., & Fraga, B. (2026a). Mixer performance in two-phase aeration tanks. I. Full-scale flow and validation. Physics of Fluids, 38(6), 063345. https://doi.org/10.1063/5.0323725

[8] Yılmaz Çelik, D., Aras, E., Yılmaz, N., & Fraga, B. (2026b). Performance assessment of mixers in two-phase aeration tanks using computational fluid dynamics and field measurements. II. Assessment of alternative mixing scenarios for performance enhancement. Physics of Fluids, 38(6), 063346. https://doi.org/10.1063/5.0323826

[9] Yılmaz Çelik, D., Vaheddoost, B., Aras, E., & Şibil, R. (2026c). Refinement of field-measured velocity profiles via CFD comparison: A case study on single-phase flow in aeration tanks. Flow Measurement and Instrumentation, 108, 103154. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2025.103154

Evsel Atıksu Arıtımında Yenilikçi Teknolojiler: Sürdürülebilir ve Enerji Verimli Arıtma Yaklaşımları

Emine ÇOKGÖR*
İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-4904-6056
ubay@itu.edu.tr

Beste KAYA
İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 0000-0001-6158-4132
kaya15@itu.edu.tr

Aslışah KONUKLAR
İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 0009-0004-9195-3073
konuklar21@itu.edu.tr

Gülsüm Emel ZENGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-6475-9062
zengingul@itu.edu.tr

Güçlü İNSEL
İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 0000-0001-6597-2693
inselhay@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* arıtma, sürdürülebilirlik, aktif çamur, granüler çamur, arıtma

1. Amaç

Su kaynaklarının giderek azalması, nüfus artışı, kentleşme ve iklim değişikliğinin etkileri, evsel atıksu arıtma tesislerinin yalnızca kirleticileri gideren sistemler olmaktan çıkarılarak enerji ve kaynak geri kazanımı sağlayan sürdürülebilir tesislere dönüştürülmesini zorunlu kılmaktadır. Geleneksel aktif çamur prosesleri yüksek enerji tüketimi, fazla çamur üretimi ve geniş alan gereksinimi nedeniyle günümüz sürdürülebilirlik hedeflerini karşılamada yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda daha düşük karbon ayak izine sahip, enerji verimli ve kompakt arıtma teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmanın amacı, evsel atıksu arıtımında öne çıkan yenilikçi teknolojileri; arıtma performansı, enerji tüketimi, sera gazı emisyonu, fazla çamur üretimi, tesis alanı gereksinimi ve kaynak geri kazanım potansiyeli açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve gelecekte yaygınlaşması beklenen teknolojilere ilişkin güncel eğilimleri ortaya koymaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada 2014–2025 yılları arasında yayımlanan yüksek etki faktörlü bilimsel makaleler, uluslararası teknik raporlar ve tam ölçek uygulama sonuçları incelenmiştir. Değerlendirme kapsamında konvansiyonel aktif çamur (KAÇ), aerobik granüler çamur (GAÇ), membran biyoreaktör (MBR), anaerobik membran biyoreaktör (AnMBR), ana akım kısmi Nitritation/Anammox (PN/A) ve dijital ikiz destekli proses kontrol uygulamaları ele alınmıştır. Teknolojiler; kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) giderim verimleri, özgül enerji tüketimi (kWh/m³), sera gazı emisyonu (kg CO_2-eşdeğeri/m³), fazla çamur üretimi, tesis alanı gereksinimi, enerji ve kaynak geri kazanım potansiyeli, tam ölçek uygulanabilirlik düzeyi ve performans kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Literatürde bildirilen sayısal performans değerleri karşılaştırılarak teknolojilerin avantaj ve sınırlamaları değerlendirilmiştir.

3. Değerlendirme

Literatürde verilen evsel atıksu arıtımında tam ölçek uygulamalar, yenilikçi biyolojik arıtma teknolojilerinin konvansiyonel aktif çamur sistemlerine göre önemli çevresel ve işletme avantajları sunduğunu bildirmektedir. Konvansiyonel aktif çamur proseslerinde KOİ giderimi genellikle %85–95,

toplam azot giderimi %60–80 arasında ve enerji tüketimi 0,24–0,53 kWh/m³ düzeyindedir [1,2]. Ayrıca atık çamur miktarının yüksek olması işletme maliyetlerini artıran önemli bir faktördür. Aerobik granüler çamur (AGS) teknolojisinde ise KOİ giderimi %90–98, toplam azot giderimi %75–90 ve toplam fosfor giderimi %80–95 seviyelerinde olduğu sunulmuştur [3,4].Tam ölçek Nereda® tesislerinden elde edilen sonuçlar, havalandırma enerjisinde %30–50, atık çamur üretiminde %20–40 ve tesis alanı gereksiniminde %25–50 oranında azalma sağlandığını göstermektedir [5].Ortalama enerji tüketimi 0,18–0,30 kWh/m³ olup, karbon ayak izinin konvansiyonel aktif çamur proseslerine göre yaklaşık %20–30 daha düşük olduğu bildirilmektedir. Anaerobik membran biyoreaktör (AnMBR) teknolojisi, organik karbonun biyogaza dönüştürülmesi sayesinde enerji geri kazanımı sağlayan en umut verici teknolojilerden biridir. Bu sistemlerde KOİ giderimi %90'ın üzerinde gerçekleşirken enerji tüketimi 0,19–0,37 kWh/m³ düzeyine kadar düşebilmektedir [6,7].Fazla çamur üretimi önemli ölçüde azalmakta ve uygun işletme koşullarında enerji nötr hatta enerji pozitif işletme mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte membran kirlenmesi ve azot giderimi için ek biyolojik proses gereksinimi teknolojinin temel kısıtlarıdır. Ana akım kısmi Nitrititasyon/Anammox (PN/A) prosesi ise klasik nitrifikasyon-denitrifikasyona göre havalandırma enerjisini %40–60, dış karbon ihtiyacını ise büyük ölçüde azaltabilmektedir. Toplam azot giderim verimi %80–90 düzeyinde olmakla birlikte düşük sıcaklıklarda ve düşük amonyum konsantrasyonlarında proses kararlılığı halen araştırılmaya ihtiyaç duymaktadır [8]. Membran biyoreaktör (MBR) sistemleri %95–99 KOİ giderimi sağlayarak yeniden kullanım kalitesinde çıkış suyu üretmekte, ancak enerji tüketimlerinin (0,60–2,30 kWh/m³) diğer biyolojik teknolojilere göre daha yüksek olduğu görülmektedir [9]. Son yıllarda geliştirilen dijital ikiz ve yapay zekâ tabanlı proses kontrol uygulamaları sayesinde çevrimiçi sensörlerden elde edilen veriler kullanılarak havalandırma sistemleri optimize edilmekte ve toplam enerji tüketiminde %10–20 ilave tasarruf sağlanabilmektedir [10].

4. Sonuçlar

Literatürde bildirilen performans göstergeleri birlikte değerlendirildiğinde, AGS teknolojisinin konvansiyonel aktif çamur prosesine göre enerji tüketimini yaklaşık %45, tesis alanı gereksinimini %40 ve fazla çamur üretimini %30 azaltabildiği; AnMBR teknolojisinin ise biyogaz geri kazanımı sayesinde enerji nötr işletme potansiyeli sunduğu belirlenmiştir. Bunun yanında dijital proses kontrol uygulamaları, mevcut tesislerde ilave altyapı yatırımı gerektirmeden enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Geleceğin evsel atıksu arıtma tesislerinin yalnızca kirleticileri gideren yapılar değil; enerji üreten, su ve besin elementlerini geri kazanan, düşük karbon ayak izine sahip kaynak geri kazanım tesisleri olarak tasarlanacağı öngörülmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Muzaffar, W. W., Aznah, A., Halim H. (2021). Energy efficieny and nutrient removal performance: comparison between several types of activated sludge process. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (s. 1-11). Malaysia: IOP Publishing.

[2] Tsalas, N., Golfinopoulos, S. K., Samios, S., Katsouras, G., & Peroulis, K. (2024). Optimization of Energy Consumption in a Wastewater Treatment Plant: An Overview. Energies, 17(12), 2808.

[3] Purba, L. A., Ibiyeye, H. T., Yuzir, A., Mohamad, S. E., Iwamoto, K., Zamyadi, A., & Abdullah, N. (2020). Various applications of aerobic granular sludge: A review. Environmental Technology & Innovation, 20, 1-20.

[4] Hussain, S., Ferrentino, R., Khan, K., Ali, Z., Yousuf, M., & Andreottola, G. (2024). Rapid startup of aerobic granular sludge: Recent advances and future challenges. Results in Engineering, 22, 1-16.

[5] Hamza, R., Rabii, A., Ezzahraoui, F., Morgan, G., & Iorhemen, O. T. (2022). A review of the state of development of aerobic granular sludge technology over the last 20 years: Full-scale applications and resource recovery. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 5, 1-12.

[6] Smith, A. L., Stadler, L. B., Love, N. G., Skerlos, S. J., & Raskin, L. (2012). Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review. Bioresource Technology, 122, 149–159.

[7] Shin, C., & Bae, J. (2018). Current status of the membrane bioreactor for domestic wastewater treatment: A review. Desalination and Water Treatment, 103, 85–91.

[8] Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., Joss, A., Horn, H., & van Loosdrecht, M. C. M. (2014). Full-scale partial nitritation/anammox experiences – An application survey. Water Research, 55, 292–303.

[9] Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S., & Katsou, E. (2017). Membrane bioreactors – A review on recent developments in energy reduction, fouling control, network and automated supervision. Journal of Membrane Science, 527, 207–227.

[10] Heo, S., Oh, T., Woo, T. Y., Kim, S. Y., Choi, Y., Park, M., Kim, J., & Yoo, C. (2025). Real-scale demonstration of digital twins-based aeration control policy optimization in partial nitritation/Anammox process: Policy iterative dynamic programming approach. Desalination, 593, 118235.

Acı Su Kaynağının Ters Osmoz Teknolojisi ile İçme Suyu Kalitesine Dönüştürülmesi: Milas Ekinanbarı Kaynağı Örneği

Emir TOSUN*
Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla, Türkiye, ORCID: 0009-0008-5712-00819
emir.tosun@muski.gov.tr

Süreyya Sertaç ANBARLI
Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla, Türkiye, ORCID: 0009-0008-6956-074X
sertac.anbarli@muski.gov.tr

Harika ÖZKAN
Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla, Türkiye, ORCID: 0009-0004-4682-1637
harika.ozkan@muski.gov.tr

Bahadır TURGUT
Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla, Türkiye, ORCID: 0009-0007-4931-3074
Bahadir.TURGUT@muski.gov.tr

Nuri KALİ
Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla, Türkiye, ORCID: 0009-0003-4925-0676
nuri.kali@muski.gov.tr

Yılmaz ŞENGÜL
Muğla Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla, Türkiye, ORCID: 0009-0003-4925-0676
yilmaz.sengul@muski.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* Ters osmoz, desalinasyon, acı su, su kalitesi, Ekinanbarı

1. Amaç

Bodrum Yarımadası ve çevresinde turizme bağlı mevsimsel nüfus artışı, uzun süren yaz kuraklıkları ve iklim değişikliği içme ve kullanma suyu talebini mevcut kaynakların kapasitesinin üzerine çıkarmaktadır. 2023 verilerine göre yıllık 44,41 milyon m³ olarak hesaplanan su ihtiyacının yalnızca %66'sı karşılanabilmekte; yaz aylarında ise bölgeye tankerlerle ilave su sağlanmaktadır [1]. Milas ilçesinin Ekinanbarı Mahallesi'nde bulunan karstik kaynak, 2.000 L/s debisiyle önemli bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, karst akiferine karışan deniz suyu etkisiyle 10.000 µS/cm'nin üzerinde iletkenliğe ve yüksek klorür, sülfat, sodyum konsantrasyonlarına sahiptir; bu özellikler, su kalitesinin 17.02.2005 tarihli ve 25730 sayılı İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te (İTASYY) [2] tanımlanan A1 sınıfı sınırlarını aşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kaynak suyu doğrudan içme suyu olarak kullanılamamaktadır.

Bu çalışmada, yüksek debili karstik bir acı su kaynağının kalite özellikleri çok yıllık analiz verileri üzerinden incelenmiş; ters ozmoz (RO) membran teknolojisine dayalı desalinasyonun kaynak suyunu içme suyu standartlarına ulaştırmadaki teknik uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Gerçek saha verilerine dayanan bu örnek çalışmayla, iklim değişikliği ve turizm baskısı altındaki kıyı yerleşimlerinde geleneksel olmayan su kaynaklarının su arzı güvenliğine sağlayabileceği katkının ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Su Kaynağı

Çalışma alanı, Muğla'nın Milas ilçesine bağlı Ekinanbarı Mahallesi sınırlarında, Milas Havzası'nın güneybatısında ve Ege Denizi'ne (Güllük Körfezi) yaklaşık 10 km uzaklıkta bulunmaktadır. Bölgenin ana akifer birimi, kuzeybatı-güneydoğu yönünde uzanan ve yaklaşık 290 km² yayılıma sahip allokton Milas Kireçtaşı (Mermer) birimidir. Kaynak, 46 m kotundaki bir tepe eteğinde, allokton kireçtaşlarının kırık ve eklem sistemlerinin kontrolünde, birden fazla noktadan farklı debi ve sıcaklıklarda yüzeye çıkmaktadır. Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından, dört ayrı noktadan boşalan kaynak üzerinde yürütülen hidrolik analizlerde yıllık ortalama beslenim 145 hm³, boşalım ise 141 hm³ olarak hesaplanmıştır. Bu

değerlendirmede, kaynağın yıllık 20 milyon m³'lük bölümünün sürekli ve güvenli bir biçimde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Kaynağın 2.000 L/s'lik bölümü MUSKİ Genel Müdürlüğü adına içme ve kullanma suyu amacıyla tahsis edilmiştir. Projenin ilk etabında 500 L/s (ileride +500 L/s) debide arıtılmış su üretimi hedeflenmektedir.

Fizibilite çalışmasının ardından tesisin avan projesi onaylanmış; proje, 2026 Yılı Yatırım Programı kapsamında 2026K05-27988 numarasıyla kamu yatırım programına alınmıştır. Tesis, ilk etapta 500 L/s (gelecekte +500 L/s ikinci etapla birlikte toplam 1.000 L/s) debide, günlük 43.200 m³ ve yıllık yaklaşık 15,77 hm³ içme ve kullanma suyu üretecek biçimde planlanmıştır. Öngörülen üretim, MUSKİ'nin tespit ettiği yaklaşık 15 milyon m³/yıllık bölgesel su açığını karşılamayı amaçlamaktadır [3]. Arıtılmış su, Milas ilçesine bağlı Boğaziçi, Dörttepe, Meşelik, Kemikler, Ağaçlıhöyük, Koru, Akyol, Yaka, Gökçeler ve Ekinanbarı mahalleleri ile Bodrum ilçesine iletilecektir; TÜİK'in 2024 verilerine göre bu hizmet alanındaki kalıcı nüfus 216.359 kişi olup, yoğun turizm baskısı nedeniyle yaz aylarında hizmet verilen nüfus bu değeri önemli ölçüde aşmaktadır [3].

2.2 Su Kalitesi Analizleri

Kaynak suyunun kalitesi, üç akredite laboratuvar tarafından uzun yıllar boyunca yürütülen örnekleme çalışmalarıyla izlenmiştir. Analizlerde fiziksel, inorganik, organik (pestisit/VOC dahil) ve mikrobiyolojik parametreler ele alınmış; sonuçlar, İTASYY'de tanımlanan A1/A2/A3 sınıf sınırlarıyla karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, iletkenlik, klorür, sülfat, sodyum, sertlik, selenyum ve vanadyum parametrelerinin A1 sınırını aştığını, buna karşılık mikrobiyolojik parametrelerin (E. coli, fekal koliform) tüm örnekleme dönemlerinde negatif olduğunu göstermiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Ekinanbarı kaynağı su kalitesi parametrelerinin İTASYY A1 sınıf limitleri ile karşılaştırılması

Parametre	Birim	Ölçüm aralığı	A1 sınıfı limiti	Durum
İletkenlik	µS/cm	10.630-12.670	2.500	Aşıyor
Klorür	mg/L	3.185-4.780	250	Aşıyor
Sülfat	mg/L	123-766	250	Aşıyor
Sodyum	mg/L	429-2.656	200	Aşıyor
Toplam sertlik	mg CaCO3/L	878-1.420	-	Yüksek
Selenyum	µg/L	15,4-17,5	10	Aşıyor
Vanadyum	µg/L	<10-20,5	15	Sınırda/Aşıyor
Bulanıklık	NTU	0,17-0,80	1	Uygun
pH	-	7,19-8,46	6,5-9,5	Uygun
Toplam koliform	kob/100mL	0-170	0	Değişken

2.3 Arıtma Teknolojisi Seçimi ve Kavramsal Tasarım

Kaynak suyundaki toplam çözünmüş madde (TDS) konsantrasyonu yaklaşık 8.000 mg/L'dir. Bu değer, suyun 1.000-10.000 mg/L aralığında tanımlanan acı su (brackish water) sınıfında yer aldığını göstermektedir. Su kalitesini belirleyen parametrelerin çeşitliliği göz önünde bulundurularak kimyasal çökeltme, distilasyon ve membran (ters ozmoz) teknolojileri birlikte değerlendirilmiştir. Kimyasal çökeltme, her kirletici için ayrı bir reaktif gerektirmesi ve çamur bertarafı sorunu yaratması; distilasyon ise yüksek enerji tüketimi ve emisyon maliyeti nedeniyle uygun bulunmamıştır. Sodyum klorürün %95'inden fazlasını giderebilen ters ozmoz membran teknolojisi, en uygun arıtma seçeneği olarak belirlenmiştir [4], [5].

Kavramsal tasarımda arıtma hattı; su alma yapısı - terfi merkezi - basınçlı kum filtreleri - kartuş filtre - yüksek basınç pompaları ile beslenen paralel ters ozmoz ünitesi - kalsit kontaktörlü remineralizasyon - klorla dezenfeksiyon - temiz su deposu - isale hattı birimlerinden oluşmaktadır. Membran seçimi için dört farklı ticari membran (iki adet DuPont, bir LG, bir Hydranautics-enerji geri kazanımlı) için DuPont Wave for Membrane, LG Q+ Projection ve Hydranautics IMSDesign yazılımlarıyla projeksiyonlar hazırlanmış; işletme basıncı, akı ve membran alanı açısından karşılaştırma yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Değerlendirilen ters ozmoz membran alternatiflerinin tasarım parametreleri (25°C)

Membran (üretici)	Kılıf sayısı	Membran alanı (m²)	Basınç (bar)	Akı (L/m².sa)
BW30HR440 (Dupont)	360	88.295	22,0	20,4
SW30XLE440i (Dupont)	360	88.295	26,9	20,4
LGSW400R (LG)	400	88.800	24,37	20,18
SWC4 MAX (Hydranautics, ERD)	400	89.280	22,5	18,3

3. Değerlendirme

Üç farklı akredite laboratuvar tarafından uzun yıllar boyunca yapılan analizlerde, iletkenlik (10.630-12.670 µS/cm), klorür (3.185-4.780 mg/L), sülfat (123-766 mg/L), sodyum (429-2.656 mg/L) ve toplam sertlik (878-1.420 mg CaCO3/L; 30 °F üzeri) parametrelerinin İTASYY A1 sınırlarını düzenli olarak aştığı görülmüştür. Bu bulgu, kaynağın acı su niteliğinin (TDS ≈ 8.000 mg/L) yıllar boyunca korunan bir hidrojeokimyasal özellik olduğunu ve mevsimsel ya da insan kaynaklı kirlenmeden ziyade karst akiferine sızan deniz suyu girişimiyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Mikrobiyolojik parametrelerin sürekli negatif sonuç vermesi, arıtma ihtiyacının ağırlıklı olarak fizikokimyasal, diğer bir ifadeyle mineralizasyon ve tuzluluk kaynaklı olduğunu göstermektedir. Bu özellikler, kaynak suyunun RO membran ayırma prosesiyle arıtılmasına uygundur.

Membran projeksiyonları karşılaştırıldığında, enerji geri kazanım cihazlı (ERD) SWC4 MAX konfigürasyonunun 25°C'de 22,5 bar işletme basıncı gerektirdiği, buna karşılık ERD'siz alternatiflerin 24,4-26,9 bar aralığında basınca ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bu sonuç, literatürde enerji geri kazanım cihazlarının acı su RO sistemlerinde spesifik enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığı yönündeki bulgularla uyumludur. Kavramsal tasarımda hesaplanan toplam hidrolik yük kaybının (274,5 m) %98'inin RO ünitesinden (268 m) kaynaklanması da membran ve ERD seçiminin toplam enerji maliyeti üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, projede güneş enerjisi santrali (GES) entegrasyonunu öncelikli hâle getirmektedir. Bu kapsamda, tesisin yıllık yaklaşık 30,6 milyon kWh düzeyindeki elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla 13.800 kWe AC kurulu güce sahip bir GES kurulması planlanmaktadır. Sistemin yıllık yaklaşık 30,9 milyon kWh üretimle tesisin enerji ihtiyacının %87'sini karşılaması öngörülmektedir [3].

RO permeatındaki mineral içeriğinin neredeyse sıfıra düşmesi, suyun korozif özellik kazanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle dağıtım öncesinde kalsit kontaktörleriyle remineralizasyon yapılması gerekmektedir. Tasarımda kontaktör çıkışında 60 mg CaCO3/L alkalinite hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, remineralizasyonun yalnızca korozyon kontrolü değil, aynı zamanda kalsiyum/magnezyum alımı açısından halk sağlığı boyutu taşıdığını vurgulayan literatürdeki değerlendirmelerle uyumludur [6], [7]. Bununla birlikte, RO konsantresinin bertarafı, tesisin konumu nedeniyle kıyıdaki deniz suyu RO tesislerinden farklı riskler içermektedir. Açık denize seyreltilerek deşarj yerine, kaynağın kalan doğal boşalımıyla karıştırma, körfeze deşarj veya bölgedeki kıta içi balık çiftliklerine (8.700 ton/yıl ruhsatlı, 5.000 ton/yıl fiili üretim kapasitesi) su temini gibi sınırlı seçenekler bulunmaktadır. RO tesisinin iki kademede üreteceği toplam 37.000 m³/gün konsantrenin (birinci kademede 18.500 m³/gün), yıllık su ihtiyacı 157,68 milyon m³'e (432.000 m³/gün) ulaşan bölgedeki balıkçılık faaliyetlerinde kullanılması alternatif bir su kaynağı oluşturabilir. Bu seçenek, konsantre su deşarjının bentik ve deniz ekosistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini belgeleyen literatür [8] dikkate alındığında, sürekli bir su kalitesi izleme programıyla desteklenmelidir.

4. Sonuçlar

Ekinanbarı karst kaynağı, elektriksel iletkenliği (10.630-12.670 µS/cm) ve TDS değeri (~8.000 mg/L) ile acı su sınıfındadır; klorür, sülfat, sodyum, sertlik, selenyum ve vanadyum parametreleri İTASYY A1 sınırlarını aşmakta ve doğrudan içme suyu kullanımını engellemektedir.

Kimyasal çökeltme ve distilasyon alternatiflerine kıyasla, ters ozmoz membran teknolojisi enerji verimliliği, düşük çamur üretimi ve modülerlik avantajlarıyla bu kaynak için en uygun arıtma teknolojisi olarak belirlenmiştir.

Enerji geri kazanım cihazlı membran konfigürasyonu işletme basıncını yaklaşık %15-20 azaltmakta; güneş enerjisi santrali entegrasyonu ile birim su maliyeti yaklaşık %43 oranında düşürülebilmektedir.

Ürün suyunun korozif olmayan, sağlıklı bir içme suyuna dönüştürülmesi için kalsit kontaktörlü remineralizasyon aşaması tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır.

RO konsantresinin bertarafı, kıta içi konumu nedeniyle kıyı tesislerinden farklı ve sınırlı alternatiflere sahiptir; sürekli çevresel izleme gerektirmektedir.

Çalışma, karstik acı su kaynaklarının RO ile içme suyuna dönüştürülmesinin, iklim değişikliği ve turizm baskısı altındaki kıyı yerleşimleri için su arzı güvenliği açısından teknik ve ekonomik bakımdan uygulanabilir bir seçenek olabileceğini göstermektedir.

Çalışmada ele alınan tesisin avan projesi onaylanmış ve proje, 2026K05-27988 numarasıyla 2026 Yılı Yatırım Programı'na alınmıştır. Sunulan bulgular, uygulama aşamasına geçen bu yatırımın teknik dayanağını oluşturmaktadır.

5. Kaynaklar

[1] MUSKİ (2024). 2023 Faaliyet Raporu. Muğla Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü.

[2] İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (2005). T.C. Resmî Gazete, Sayı: 25730.

[3] İo Çevre Çözümleri (2025). Milas Ekinanbarı Kaynağından İçme ve Kullanma Suyu Temini (Desalinasyon) Projesi Fizibilite Raporu - Etap B. MUSKİ Genel Müdürlüğü.

[4] Horsley, Randtke (2012). Water Treatment Plant Design, 5th ed. McGraw-Hill, USA.

[5] Voutchkov, N. (2013). Desalination Engineering: Planning and Design. McGraw-Hill.

[6] Kozisek, F. (2020). Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the European Union member states. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 112, 104590.

[7] Lesimple, A., Ahmed, F.E. (2020). Remineralization of desalinated water: Methods and environmental impact. Desalination, 496, 114692.

[8] Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., Kang, S.-M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. Science of the Total Environment, 657, 1343-1356.

Gediz Nehir Havzasında Arıtılmış Atıksuyun Yeniden Kullanım Alternatiflerinin Önceliklendirilmesi

Arife ÖZÜDOĞRU*
Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye, 0000-0001-8601-6369
arife.ozudogru@gazi.edu.tr

Beril AKIN
Gazi Üniversitesi, Gazi Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi, Biyoloji Eğitimi, Ankara, Türkiye, 0000-0003-1730-154X
bsakin@gazi.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* arıtılmış atıksu, su yeniden kullanımı, çok kriterli karar verme, coğrafi bilgi sistemi, gediz nehir havzası

1. Amaç

Artan su talebi ve antropojenik baskıların yanı sıra, iklim değişikliğinin kuraklık ve yerüstü suyu akışlarındaki değişimler yoluyla su kaynakları üzerindeki baskıyı artırması, özellikle su stresi yaşayan bölgelerde, su kaynaklarının korunmasına ve kaynak verimliliğinin artırılmasına katkı sağlayan arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımını stratejik bir alternatif haline getirmektedir [1].

Bu çalışmanın amacı, Gediz Nehir Havzası'ndaki belediye atıksu arıtma tesisleri için potansiyel yeniden kullanım alternatiflerini belirlemek ve bu alternatifleri havza ölçeğinde önceliklendirmektir. Bu kapsamda, havzadaki atıksu arıtma tesislerine ilişkin coğrafi veriler bir araya getirilerek Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı mekânsal değerlendirme gerçekleştirilmiş; belirlenen yeniden kullanım alternatifleri Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca farklı ÇKKV yöntemleri arasındaki sonuçların uyumu ve elde edilen önceliklendirmelerin duyarlılığı incelenerek, önerilen yaklaşımın planlama açısından uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı ve Veri Seti

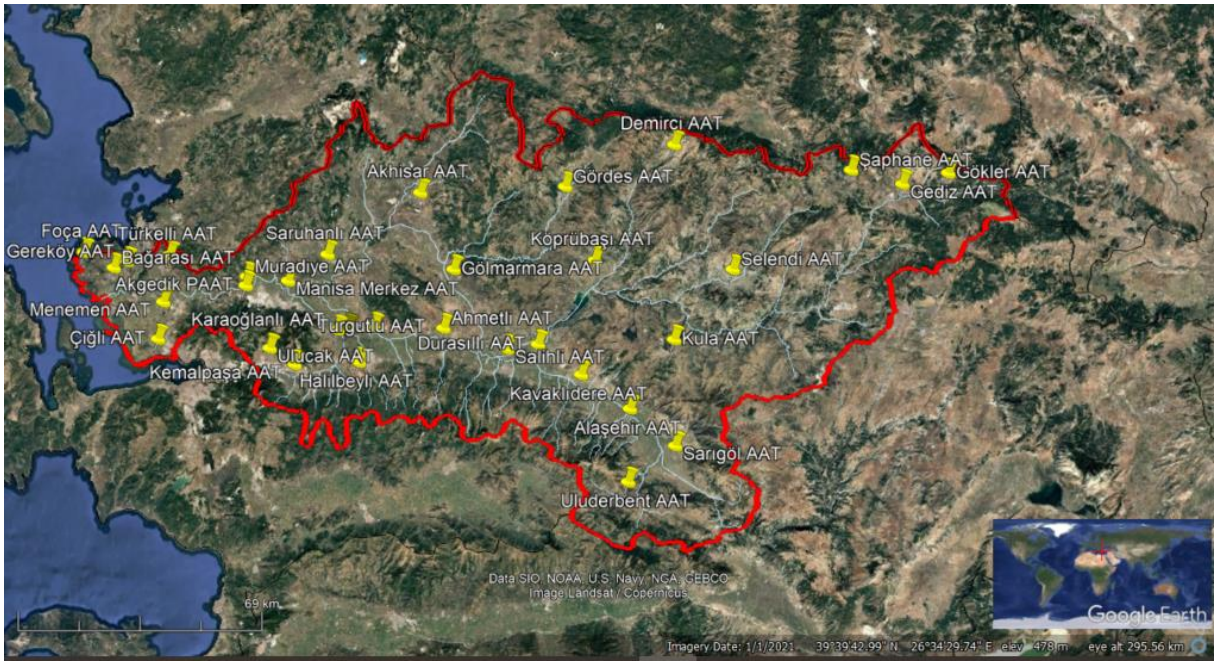
Gediz Nehir Havzası; Manisa, İzmir, Uşak, Kütahya, Denizli, Balıkesir ve Aydın illerinin bir bölümünü kapsamakta olup yoğun tarımsal ve sanayi faaliyetleri nedeniyle su miktarı ve kalitesi üzerinde önemli baskılarla karşı karşıyadır. Çalışmada, havza sınırları içerisinde belediyeler tarafından işletilen 33 atıksu arıtma tesisi (AAT) değerlendirilmiştir. Tesislerin konum, kapasite, arıtma teknolojisi ve deşarj noktalarına ilişkin verileri derlenmiş ve CBS ortamında değerlendirilmiştir. Tesislerin havza içerisindeki konumsal dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.2. Yeniden Kullanım Alternatiflerinin Belirlenmesi

Her bir AAT için tarımsal sulama, sanayide kullanım, peyzaj sulama, çevresel besleme ve yeraltı suyu (YAS) besleme olmak üzere beş yeniden kullanım alternatifi değerlendirilmiştir. Alternatiflerin belirlenmesinde tesislerin çevresindeki potansiyel kullanım alanları olarak tarım alanları, sanayi tesisleri ve organize sanayi bölgeleri, peyzaj alanları, sulak alanlar ve yerüstü suları ile yeraltı suyu besleme açısından uygun alanlar dikkate alınmıştır.

2.3. CBS Destekli Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı

Potansiyel yeniden kullanım alternatiflerinin önceliklendirilmesinde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları kullanılmıştır [2-7]. Öncelikle teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal-yasal-kurumsal olmak üzere 4 kriter grubu altında tanımlanan 16 alt kriterin ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile belirlenmiş, ardından havzanın 604.800 m^3/gün kapasite ile en büyük kapasiteli tesisi olan Çiğli AAT için CBS destekli ÇKKV yaklaşımı kullanılarak yeniden kullanım alternatifleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, TOPSIS ana önceliklendirme yöntemi olarak kullanılırken, elde edilen sıralamanın güvenilirliği ve tutarlılığını değerlendirmek amacıyla EDAS, VIKOR ve PROMETHEE II yöntemleriyle karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. Çiğli AAT için elde edilen TOPSIS sonuçları ayrıca duyarlılık analizi ile test edilmiştir.



Şekil 1. Gediz Nehir Havzasındaki AAT'lerin haritada gösterimi

Duyarlılık analizi sonuçları, kriter ağırlıklarında gerçekleştirilen değişikliklere rağmen alternatiflerin öncelik sıralamasının büyük ölçüde korunduğunu göstermiştir. Farklı ÇKKV yöntemleri ve ağırlık senaryoları altında elde edilen sonuçların tutarlı bulunması üzerine, Gediz Nehir Havzası'ndaki diğer AAT'ler için yeniden kullanım alternatiflerinin önceliklendirilmesinde TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

3. Değerlendirme

3.1 Yeniden Kullanım Alternatiflerinin Önceliklendirilmesi

Gediz Nehir Havzası'nda değerlendirilen 33 atıksu arıtma tesisinden proje aşamasında bulunan Köprübaşı AAT'de çevresel besleme dışında bir yeniden kullanım alternatifi belirlenemediğinden alternatifler arası karşılaştırma yapılmamıştır. Diğer 32 tesis için gerçekleştirilen TOPSIS analizinde, alternatiflerin öncelik sıralamalarında belirgin bir dağılım gözlenmiştir. Çevresel besleme alternatifi, 32 tesisin tamamında birinci sırada yer almıştır. Tarımsal sulama 23 tesiste ikinci, 6 tesiste üçüncü sırada yer alırken, 3 tesiste alternatif olarak belirlenmemiştir. Sanayide kullanım 8 tesiste ikinci, 9 tesiste üçüncü sırada yer almış; 16 tesiste ise alternatif olarak değerlendirilmemiştir. Yeraltı suyu (YAS) besleme 10 tesiste üçüncü, 11 tesiste dördüncü ve 3 tesiste beşinci sırada yer alırken, 9 tesiste alternatif olarak belirlenmemiştir. Peyzaj sulama ise 27 tesiste alternatif olarak bulunmamış, yalnızca sınırlı sayıdaki tesiste üst sıralarda yer almıştır. Bu dağılım Tablo 1'de sunulmuştur.

Çevresel beslemenin karşılaştırmaya dahil edilen tüm tesislerde birinci sırada yer alması; alıcı ortamlara yakınlık, düşük altyapı gereksinimi, sürekli talep yapısı ve görece düşük maliyet gibi uygulanabilirlik avantajlarıyla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, bu sonuç çevresel beslemenin her koşulda en yüksek stratejik faydayı sağlayacağı şeklinde yorumlanmamalıdır. Aksine, sonuçlar alternatiflerin değerlendirilmesinde kısa vadeli uygulanabilirlik ile uzun vadeli su güvenliği arasında ayrım yapılması gerektiğini göstermektedir. Tarımsal sulamanın ikinci güçlü alternatif olarak öne çıkması, Gediz Nehir Havzası'nın tarımsal karakteri ve sulama suyu talebiyle uyumludur [8]. Ancak bu seçeneğin uygulanabilirliği su kalitesi, tuzluluk, patojen yükü ve kullanım alanına ilişkin koşulların birlikte değerlendirilmesine bağlıdır [9]. Sanayide kullanımın daha sınırlı yaygınlık göstermesi ise sanayi bölgelerine mekânsal uzaklık ve gerekli iletim altyapısının bulunmamasıyla ilişkilendirilebilir [10].

YAS besleme, havza genelinde yaygın bir alternatif olmamakla birlikte, uygun hidrojeolojik koşullara sahip tesislerde uzun vadeli su güvenliği açısından stratejik bir seçenek olarak öne çıkmaktadır [11]. Peyzaj sulamanın ise alternatif olarak bulunmadığı tesis sayısının yüksek olması, bu seçeneğin mekânsal talep ve kullanım alanlarının sınırlılığı nedeniyle daha düşük uygulanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak bulgular, yeniden kullanım alternatiflerinin "yaygın ve kolay uygulanabilir"

seçenekler ile “sınırlı ancak yüksek stratejik etki potansiyeline sahip” seçenekler olarak farklılaştığını ve havza ölçeğinde tek tip bir yeniden kullanım yaklaşımının yeterli olmayacağını ortaya koymaktadır.

Tablo 1. TOPSIS sıralama sonuçlarının alternatifler açısından değerlendirilmesi

Alternatif	1. Sıra Sayısı	2. Sıra Sayısı	3. Sıra Sayısı	4. Sıra Sayısı	5. Sıra Sayısı	Alternatif Olmayan Yerler
Çevresel besleme	32	-	-	-	-	1
Tarımsal sulama	-	23	6	-	1	3
Sanayide kullanım	-	8	9	-	-	16
YAS besleme	-	-	10	11	3	9
Peyzaj sulama	-	1	1	4	-	27

3.2. Havza Ölçeğinde Planlama Açısından Değerlendirme

Elde edilen bulgular, arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımına yönelik planlamanın yalnızca tesis kapasitesine veya tek bir kullanım alternatifine dayandırılmaması gerektiğini göstermektedir. Tesis kapasitesi, arıtılmış su kalitesi, hedeflenen kullanım amacı, mekânsal uygunluk, işletme ve izleme kapasitesi ile yerel ekonomik koşullar birlikte değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda, Gediz Nehir Havzası’ndaki tesislerin ölçeklerine ve potansiyel etkilerine göre farklı planlama yaklaşımları benimsenmesi önerilmektedir.

Büyük ölçekli tesisler, yüksek debileri ve oluşturabilecekleri toplulaştırılmış geri kazanım hacimleri nedeniyle havza ölçeğinde stratejik öneme sahiptir [12]. Bu tesislerde ileri arıtma yatırımları, bölgesel yeniden kullanım altyapısının geliştirilmesi ve uygun hidrojeolojik koşullarda yeraltı suyu besleme gibi daha yüksek yatırım ve işletme gerektiren uygulamalar değerlendirilebilir [13]. Ancak bu uygulamaların ekonomik yapılabilirlik, enerji ve iletim altyapısı gereksinimleri ile izleme ve risk yönetimi koşulları birlikte ele alınarak aşamalı biçimde planlanması gerekmektedir [14].

Orta ölçekli tesislerde ise yerel ve mevsimsel su talebinin arıtılmış su arzıyla eşleştirilmesi özellikle tarımsal yeniden kullanım açısından önemli bir fırsat sunmaktadır [15]. Bu kapsamda sulama alanları, ürün deseni, sulama dönemi, su kalite gereklilikleri ve uzun dönemli toprak etkilerinin birlikte değerlendirilmesi; yeniden kullanım uygulamalarının sulama birlikleri ve ilgili yerel paydaşlarla koordineli biçimde planlanması önem taşımaktadır [16].

Küçük ölçekli tesislerde yüksek yatırım ve işletme gerektiren çözümler yerine, düşük enerji ve bakım gereksinimine sahip, yerel ölçekte uygulanabilir ve gerektiğinde modüler olarak geliştirilebilecek sistemlerin değerlendirilmesi daha uygun olacaktır [17]. Bununla birlikte, bu tesislerde uygulamaların sürdürülebilirliği teknik uygunluğun yanı sıra düzenli bakım, izleme, denetim ve yerel kurumsal kapasiteye bağlıdır [18].

4. Sonuçlar

Çalışma sonucunda elde edilen temel bulgular ve bu bulguların planlama açısından ortaya koyduğu başlıca sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Gediz Nehir Havzası’ndaki 33 belediye atıksu arıtma tesisinin 32’sinde birden fazla yeniden kullanım alternatifi belirlenmiş ve arıtılmış atıksuyun havza genelinde alternatif bir su kaynağı olarak değerlendirilebileceği ortaya konulmuştur.
- Çevresel besleme, değerlendirilen tesislerin tamamında en yüksek öncelikli yeniden kullanım alternatifi olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, ikinci öncelikli alternatifin tesisin konumu, arazi kullanımı, tarımsal ve sanayi faaliyetleri ile potansiyel su kullanıcılarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.
- Tarımsal sulama ve sanayide kullanım alternatiflerinin, sırasıyla tarımsal ve sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerde daha yüksek öncelik kazandığı; yeraltı suyu besleme ve peyzaj sulama

alternatiflerinin ise uygun mekânsal ve çevresel koşulların bulunduğu tesislerle sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

- TOPSIS sonuçlarının EDAS, VIKOR ve PROMETHEE II yöntemleriyle büyük ölçüde uyumlu olması ve duyarlılık analizlerinde genel öncelik sıralamasının korunması, elde edilen sonuçların tutarlılığını desteklemiştir.

Bu bulgular doğrultusunda, arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımına ilişkin kararların tesis kapasitesi, mekânsal uygunluk, su talebi ile sosyal ve çevresel koşulların birlikte değerlendirildiği havza ölçekli bir planlama yaklaşımıyla ele alınması; CBS destekli ÇKKV yaklaşımının ise bu süreçte uygulanabilir bir karar destek aracı olarak kullanılması önerilmektedir. Bununla birlikte, yeniden kullanım uygulamalarının yaygınlaştırılmasında gerekli arıtma ve iletim altyapısının yatırım ve işletme maliyetleri ile ilgili kurumlar ve su kullanıcıları arasındaki koordinasyonun sağlanması önemli uygulama koşulları olarak değerlendirilmelidir.

5. Kaynaklar

[1] Cordeiro, S., Ferrario, F., Pereira, H. X., Ferreira, F., Matos, J. S. (2023). Water reuse, a sustainable alternative in the context of water scarcity and climate change in the Lisbon metropolitan area. Sustainability, 15, 16, 12578, doi: 10.3390/su151612578.

[2] Goyal, K., Kumar, A. (2021). Multi-criteria analysis to identify the factors affecting water reuse scheme in India. Water Environ. J., 35, 2, 451–462, doi: 10.1111/wej.12642.

[3] Ibrahim, S. H., Sabir Ali, A. K. (2016). Sustainable wastewater management planning using multi-criteria decision analysis (mcda) a case study from Khartoum, Sudan. Int. J. Eng. Res., 5, 5, 540–545.

[4] Jing, L., Chen, B., Zhang, B., Li, P. (2013). A hybrid stochastic-interval analytic hierarchy process approach for prioritizing the strategies of reusing treated wastewater. Math. Probl. Eng., 2013, 1–10, doi: 10.1155/2013/874805.

[5] Hadipour, A., Rajaee, T., Hadipour, V., Seidirad, S. (2016). Multi-criteria decision-making model for wastewater reuse application: a case study from Iran. Desalination Water Treat., 57, 30, 13857–13864, doi: 10.1080/19443994.2015.1060905.

[6] Sajjadian, M., Firozjaee, T. T., Kootenaei, F. G., Haji, S. F. (2025). Application of the analytic hierarchy process for the selection of appropriate target of municipal wastewater reuse in Shiraz city. Water Conserv. Sci. Eng., 10, 1, 26, doi: 10.1007/s41101-025-00351-6.

[7] Sadr, S.M.K., Saroj, D.P., Mierzwa, J.C., McGrane, S.J., Skouteris, G., Farmani, R., Kazos, X., Aumeier, B., Kouchaki, S., Ouki, S.K. (2018) A multi expert decision support tool for the evaluation of advanced wastewater treatment trains: A novel approach to improve urban sustainability. Environ. Sci. Policy, 90, 1–10, doi: 10.1016/j.envsci.2018.09.006.

[8] Ballesteros-Olza, M. Blanco-Gutiérrez, I., Esteve, P., Gómez-Ramos, A., Bolinches, A. (2022). Using reclaimed water to cope with water scarcity: an alternative for agricultural irrigation in Spain. Environ. Res. Lett., 17, 12, 125002, doi: 10.1088/1748-9326/aca3bb.

[9] Ben Mordechay, E., Mordehay, V., Tarchitzky, J., Chefetz, B. (2022). Fate of contaminants of emerging concern in the reclaimed wastewater-soil-plant continuum. Sci. Total Environ., 822, 153574, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153574.

[10] Rafaai, N. H., Lee, K.E., Nazir, N.Z.M., Rahim, A.R.A., Goh, T.L., Mokhtar, M., Wan Abdullah, W.A.R., Husain, H., Raja Mamat, R.B. (2025). Mapping sewage treatment plants for wastewater reclamation and reuse in industrial parks of Peninsular Malaysia: A path towards water security. Water Resour. Ind., 33, 100284, doi: 10.1016/j.wri.2025.100284.

[11] Hartog, N., Stuyfzand, P. (2017). Water quality considerations on the rise as the use of managed aquifer recharge systems widens. *Water*, 9, 10, 808, doi: 10.3390/w9100808.

[12] Cagno, E., Garrone, P., Negri, M., Rizzuni, A. (2022). Adoption of water reuse technologies: An assessment under different regulatory and operational scenarios," J. Environ. Manage., 317, 115389, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115389.

[13] Rodrigues, P. M., Pinto, F. S., Marques, R. C. (2024). A framework for enabling conditions for wastewater reuse. Sustain. Prod. Consum., 46, 355–366, doi: 10.1016/j.spc.2024.02.022.

[14] Fournier, E. D., Keller, A. A., Geyer, R., Frew, J. (2016). Investigating the energy-water usage efficiency of the reuse of treated municipal wastewater for artificial groundwater recharge. Environ. Sci. Technol., 50, 4, 2044–2053, doi: 10.1021/acs.est.5b04465.

[15] Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. Sci. Total Environ., 760, 144026, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144026.

[16] Shoushtarian, F., Negahban-Azar, M. (2020). Worldwide regulations and guidelines for agricultural water reuse: a critical review. Water, 12, 4, 971, doi: 10.3390/w12040971.

[17] Capodaglio, A. G., Callegari, A., Cecconet, D., Molognoni, D. (2017). Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. Water Pract. Technol., 12, 2, 463–477, doi: 10.2166/wpt.2017.055.

[18] Massoud, M.A, Tarhini, A., Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *J. Environ. Manage.*, 90, 1, 652–659, doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.001.

Türkiye Hidrojeolojisinin Değerlendirilmesi Kapsamında Havza Bazlı Hidrojeolojik Etütler: Turkuaz Rapor Serisi

Sermin KOÇER*
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
sozsayin@dsi.gov.tr

Nami ERDOĞAN
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
namierdogan@dsi.gov.tr

Merve İŞLEK
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
merveislek@dsi.gov.tr

İsmail SEVİM
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
ismailsevim@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: havza bazlı hidrojeolojik etüt, yeraltısuyu yönetimi, hidrojeolojik kavramsal model, yeraltısuyu bütçesi, iklim değişikliği

1. Amaç

Yeraltısuları, ulaşılabilir tatlı su rezervleri içinde stratejik öneme sahip olmakla birlikte miktar ve kalite bakımından sınırlı bir kaynaktır. Artan nüfus ve sektörel su talepleri, kuraklık ve iklim değişikliği baskıları ile ulusal ve uluslararası mevzuattaki gelişmeler, yeraltısuyu sistemlerinin yalnızca ova veya münferit alan ölçeğinde değil, havza ölçeğinde değerlendirilmesini gerekli hale getirmiştir. DSİ bünyesinde 1969 yılında ova bazlı hidrojeolojik etüt raporları ile başlayan çalışmalar, 94 ovada tamamlanan “Yeşil Raporlar Serisi” sonrasında havza ölçeğine taşınmış; günümüzde “Turkuvaz Rapor Serisi” kapsamında sürdürülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı tarafından yürütülen havza bazlı hidrojeolojik etüt projelerinin temel aşamalarını, kullanılan veri ve yöntemleri, üretilen hidrojeolojik çıktıları ve bu çıktıların sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimindeki işlevini değerlendirmektir. Etütler; yeraltısuyunun nerede, ne miktarda ve hangi kalitede bulunduğunun belirlenmesi, akifer sistemlerinin karakterizasyonu, yeraltısuyu kütlelerinin ve baskı-etki ilişkilerinin ortaya konulması, miktar ve kalite izleme ağlarının kurulması, yeraltısuyu bütçelerinin ve emniyetli işletme rezervlerinin güncellenmesi ile iklim değişikliği koşullarında geleceğe yönelik projeksiyonların geliştirilmesine temel oluşturmaktadır. DSİ etüt takvimine göre 26 havzada hidrojeolojik etüt çalışmalarının 2029 yılı sonunda tamamlanması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

DSİ Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı tarafından; yeraltısularının nerede, ne kadar ve ne kalitede olduğunu belirlemek amacıyla teknik ve bilimsel çalışmalar yapılmakta, araştırma kuyuları açılmakta ve bu konuda arazi deneyleri (pompa testleri, boya deneyleri vd.) yapılmaktadır. Yeraltısuyu izleme ağı oluşturularak, yeraltısuyu kalite ve miktar çalışmaları yürütülmekte ve baskı-etki analizleri yapılmaktadır. Havza bazında hidrojeolojik etütler yapılarak, havzanın bütün jeolojik, hidrojeolojik, hidrolojik karakteristikleri ortaya konulmaktadır.

Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi’ne uygun bir şekilde Türkiye’nin bütün havzalarında yeraltısuyu kütleleri belirlenmekte ve yeraltısuyu kalite ve miktar izlemeleri yapılmaktadır. Yeraltısuyu miktarının aylık ve mevsimlik takibinin yapılması kapsamında rasat kuyuları açılmaktadır. Yeraltısularının kontrollü

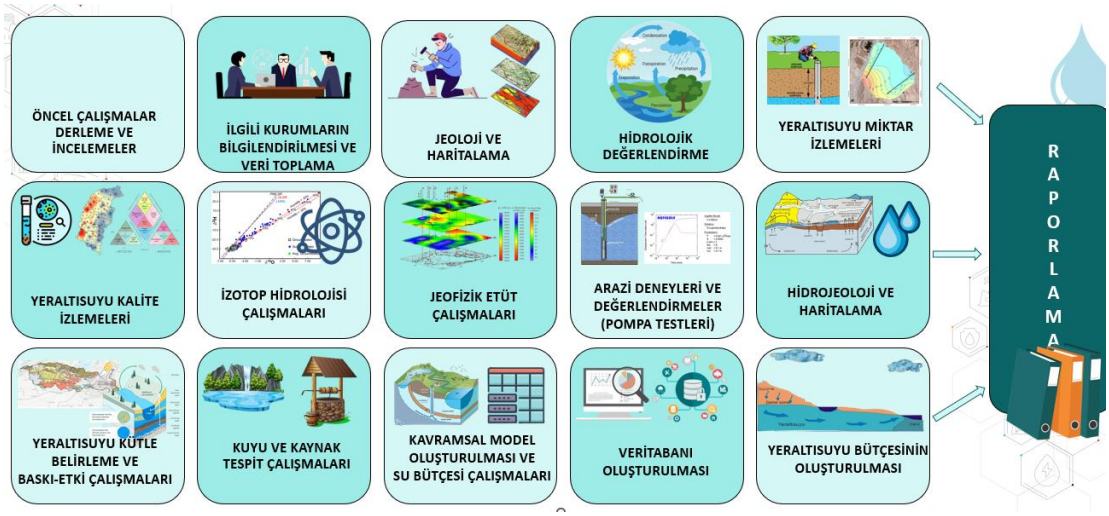
kullanımının belirlenmesi amacıyla yeraltısuyu rezervleri belirlenmekte ve bu alanlarda yeraltısuyu işletme sahaları ilan edilmektedir. Yeraltısuyu işletme tesisleri ve yeraltısuyu sulama kooperatiflerine sulama tesisleri (kuyu, dalgıç pompa, ENH) kurulmaktadır.

7139 sayılı Kanun kapsamında kooperatiflerce feragat edilen sulama tesisleri kiralama yolu ile işletilmektedir. İçme, kullanma, tarımsal ve endüstriyel amaçlı kullanımlar için yeraltısuyu temini ve tahsisler yapılmaktadır. Yeraltısuyu miktarının aylık ve mevsimlik takibinin yapılması kapsamında rasat kuyuları açılmaktadır. Yeraltısularının kontrollü kullanımının belirlenmesi amacıyla yeraltısuyu rezervleri belirlenmekte ve bu alanlarda yeraltısuyu işletme sahaları ilan edilmektedir. Yeraltısuyu işletme tesisleri ve yeraltısuyu sulama kooperatiflerine sulama tesisleri (kuyu, dalgıç pompa, ENH) kurulmaktadır.

7139 sayılı Kanun kapsamında kooperatiflerce feragat edilen sulama tesisleri kiralama yolu ile işletilmektedir. İçme, kullanma, tarımsal ve endüstriyel amaçlı kullanımlar için yeraltısuyu temini ve tahsisler yapılmaktadır. Yaban hayatını korumak amacı ile yeraltısuyu yapıları inşa edilmektedir.
Sondörlük eğitimi çalışmaları yürütülmekte ve sondörlük sınavları yapılarak sondör yeterlik belgesi verilmektedir. Yurtdışında suya erişimi zor olan ülkelerde yeraltısuyu temini yapılmaktadır. Afet durumlarında içme-kullanma suyu sağlamaktadır.

Daire Başkanlığı bünyesinde yürütülen havza bazlı hidrojeolojik etütler çok aşamalı bir çalışma programı çerçevesinde devam etmektedir. (Şekil 1). Öncel çalışmaların derlenmesi ve incelenmesi ile başlayan süreçte ilgili kurumların bilgilendirilmesi ve veri temini gerçekleştirilmekte; topoğrafik, jeolojik ve hidrolojik değerlendirmeler yapılarak çalışma alanının temel fiziksel özellikleri ortaya konulmaktadır. Sayısal yükseklik modeli, eğim ve yamaç yönelim haritaları ile jeoloji ve hidrostratigrafi haritaları hazırlanmakta; meteorolojik verilerden yağış, sıcaklık ve buharlaşma dağılımları değerlendirilmekte; yüzey suyu alt havzaları, drenaj ağı, baraj, gölet ve sulama sistemleri tanımlanmaktadır.

Hidrojeolojik çalışmalar kapsamında kuyu ve kaynak envanteri oluşturulmakta; temel, araştırma ve su sondaj kuyularının koordinat, derinlik, statik-dinamik seviye, kullanım amacı ve tahsis bilgileri derlenmektedir. Yeraltısuyu seviye değişimleri, kaynak akımları, yağış–yeraltısuyu ve kaynak–yeraltısuyu ilişkileri ile yeraltısuyu–yüzey suyu etkileşimleri incelenmektedir. Akiferlerin hidrolik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla arazi pompa testleri ve izleme deneyleri yapılmakta, elde edilen veriler uygun yöntemler ve yazılımlar kullanılarak çözümlenmektedir. Jeofizik etütler, hidrojeokimyasal çalışmalar, izotop hidrolojisi ve gerekli alanlarda jeotermal değerlendirmeler hidrojeolojik karakterizasyonu desteklemektedir.



Şekil 1. Hidrojeolojik etüt çalışmaları iş kalemleri

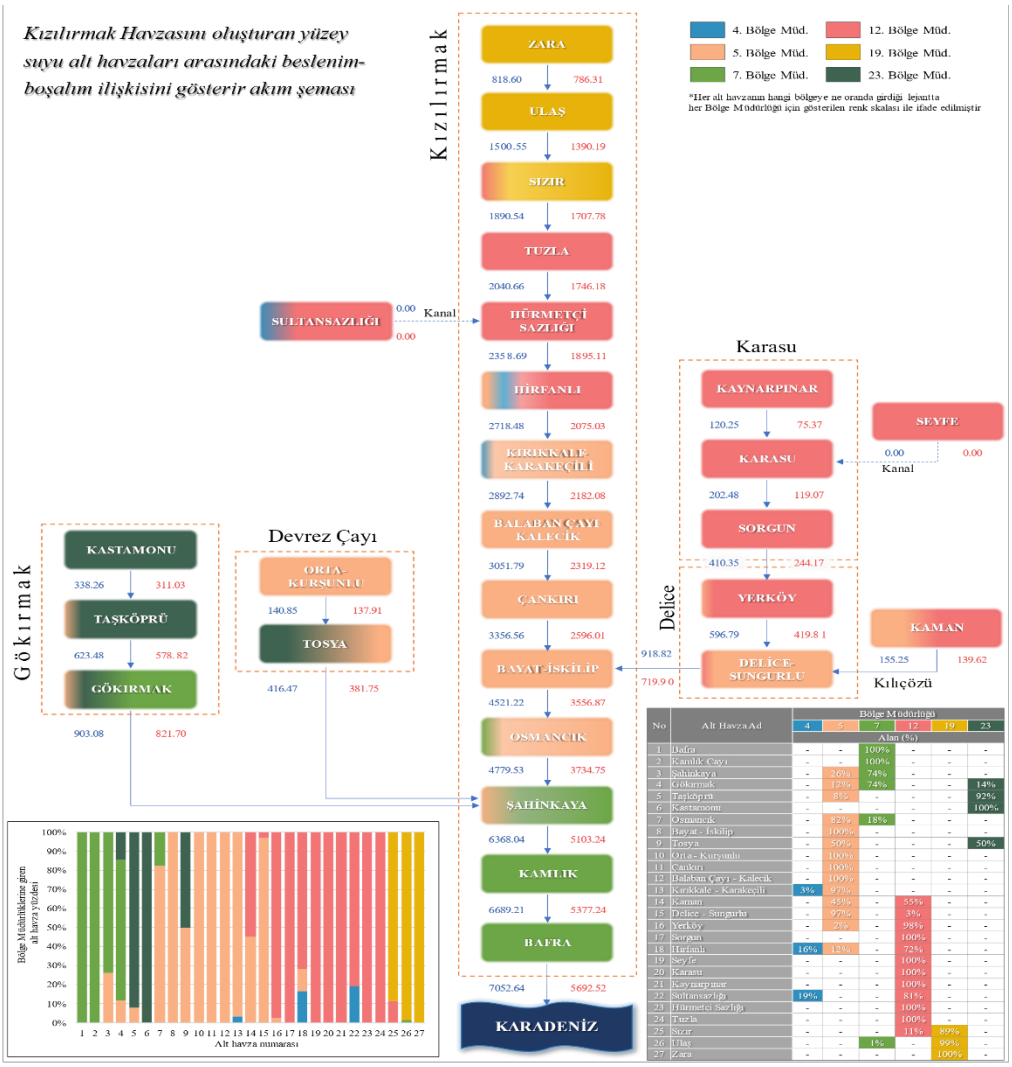
Etütlerin yönetim boyutunda yeraltısuyu kütleleri belirlenmekte veya güncellenmekte; miktar ve kalite baskı-etki analizleri, risk değerlendirmesi, izleme, eşik değerlerin belirlenmesi ve durum değerlendirmeleri yürütülmektedir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), arazi ve arşiv verilerinin standart bir veri yapısında depolanması, mekânsal dağılımlarının gösterilmesi ve haritalanması için temel araç

olarak kullanılmaktadır. Kuyu ve kaynak tespitleri, pompa testi ve kuyu logları, kimyasal ve izotop verileri, hidrostratigrafi, jeofizik ve miktar-kalite izleme sonuçları CBS veri tabanında bir araya getirilmektedir. Beslenim ve boşalım bileşenlerinin tanımlanması ile iki ve üç boyutlu hidrojeolojik kavramsal modeller oluşturulmakta, bu modeller temelinde yeraltısuyu bütçeleri, iklim değişikliği altında yeraltısuyu bütçe senaryoları ve rezerv-tahsis dengeleri değerlendirilmektedir.

3. Değerlendirme

Havza ölçeğinde yürütülen çalışmalar, yeraltısuyu sistemlerinin tekil kuyular veya idari sınırlar yerine hidrojeolojik sistemler ve alt havzalar temelinde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Güncellenen jeoloji ve hidrostratigrafi, akifer sınırları, beslenim-boşalım koşulları, kuyu ve kaynak tespitleri ile miktar-kalite izleme verileri kullanılarak yeraltısuyu kütleleri revize edilmekte ve yönetim açısından daha güncel bir hidrojeolojik çerçeve oluşturulmaktadır.

Kavramsal model ve su bütçesi çalışmaları, yüzey suyu–yeraltısuyu etkileşiminin, akiferler arası akımın, beslenim ve boşalım bileşenlerinin ve ekosistemlerle ilişkilerin aynı çerçevede ele alınmasını sağlamaktadır. Kızılırmak Havzası örneğinde alt havza ve yeraltısuyu sistemleri için hidrolojik bütçe bileşenleri membadan mansaba doğru hesaplanmış; işletme sonrası toplam giren ve çıkanların karşılaştırılması sonucunda bütçesi negatif ve miktar baskısı altında bulunan sistemlerin özellikle havzanın güney bölümünde, Sultansazlığı, Hürmetçi Sazlığı, Hirfanlı ve Karasu alt havzalarının bir bölümünde yoğunlaştığı ortaya konulmuştur [1] (Şekil 2).



Şekil 2. Kızılırmak Havzasında proje kapsamında belirlenen yüzey suyu alt havzalarının membadan mansaba işletme öncesi ve sonrası durum için birbirlerine olan katkılarını gösterir şema

İklim değişikliği etkisinde havza hidrojeolojik bütçesi çalışmaları, mevcut rezervlerin gelecekteki beslenim koşulları altında yeniden değerlendirilmesini hedeflemektedir. Dicle Havzası örneğinde MPI-ESM-MR modelinin RCP4.5 ve RCP8.5 projeksiyonları kullanılarak beş yeraltısuyu alt havzası için gelecek beslenimleri hesaplanmıştır. Tablo 1'deki sonuçlara göre Dicle Havzası toplamında 1970–2022 dönemi için 6634 hm³/yıl olan mevcut beslenime karşılık 2030–2100 dönemi projeksiyonunda RCP4.5 için 5052,85 hm³/yıl (%23,83 azalma), RCP8.5 için 5309,73 hm³/yıl (%19,96 azalma) değerleri elde edilmiştir. Alt havzalar arasında azalma oranlarının farklılaşması, iklim değişikliğine uyum tedbirlerinin havza içindeki hidrojeolojik farklılıkları dikkate alacak biçimde geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir [2].

Etüt sonuçları aynı zamanda izleme altyapısının önemini ortaya koymaktadır. Miktar ve kalite açısından düzenli gözlem ağlarının kurulması, yeraltısuyu trendlerinin izlenmesi ve verilerin zamansal-konumsal sürekliliğinin sağlanması; rezerv ve tahsis kararlarının güncellenmesi, içme suyu kaynaklarının korunması ve kirlenme risklerine erken müdahale açısından temel gerekliliklerdir. GIS-Cloud gibi bulut tabanlı uygulamalar arazi çalışmalarının anlık takibini desteklemekte; çevrim içi meteoroloji ve yeraltısuyu ölçüm sistemleri ise yıllık beslenim ve bilanço hesaplarının daha güncel verilere dayalı yapılabilmesi için potansiyel sunmaktadır.

Tablo 1. Dicle havzası iklim değişikliği projeksiyonlarına ilişkin yeraltısuyu beslenimi

Dicle Havzasının Yeraltısuyu Alt Havza Adı	MPI RCP4.5 Yeraltısuyu Beslenim (hm³/yıl) (2030-2100)	MPI RCP4.5 Yeraltısuyu Beslenim (Mevcut Duruma Göre % Değişim)	MPI RCP8.5 Yeraltısuyu Beslenim (hm³/yıl) (2030-2100)	MPI RCP8.5 Yeraltısuyu Beslenim (Mevcut Duruma Göre % Değişim)	Mevcut (1970-2022) Yeraltısuyu Beslenimi (hm³/yıl)
Midyat	628,00	-7,10%	635,00	-6,07%	676
Kuzey Dicle	3065,10	-23,35%	3360,52	-15,97%	3999
Hezil-Habur	133,18	-51,92%	133,24	-51,90%	277
Zap-Şemdinli	1188,08	-26,11%	1143,93	-28,86%	1608
Hazar-Behramaz	38,49	-47,99%	37,04	-49,95%	74
Dicle Havzası	5052,85	-23,83%	5309,73	-19,96%	6634

4. Sonuçlar

Havza bazlı hidrojeolojik etütler, jeoloji, hidroloji, hidrojeoloji, hidrojeokimya, izotop hidrolojisi, jeofizik, pompa testleri, CBS, kavramsal modelleme ve su bütçesi çalışmalarını ortak bir yönetim çerçevesinde birleştirmektedir.

Yeraltısuyu kütlelerinin belirlenmesi ve revizyonu; güncel hidrostratigrafi, akifer özellikleri, beslenim-boşalım koşulları, miktar-kalite izlemeleri ve baskı-etki analizleriyle desteklenmektedir.

Kavramsal model ve bütçe çalışmaları, yeraltısuyu rezervlerinin ve tahsis durumlarının havza ve alt havza ölçeğinde güncellenmesine, miktar baskısı altındaki sistemlerin belirlenmesine ve sürdürülebilir işletme kararlarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

İklim değişikliği projeksiyonları, bazı alt havzalarda yeraltısuyu besleniminde belirgin azalmalar oluşabileceğini göstermekte; bu nedenle sulama verimliliği, kontrollü yeraltısuyu kullanımı, yeniden kullanım, suni besleme ve düzenli izleme gibi uyum tedbirlerinin önemi artmaktadır.

Sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi için miktar ve kalite izleme ağlarının sürekliliği, CBS tabanlı standart veri yönetimi, yerli ölçüm ve değerlendirme teknolojilerinin geliştirilmesi ve kurumlar arası teknik iş birliğinin güçlendirilmesi gerekmektedir.

5. Kaynaklar

[1] DSİ Genel Müdürlüğü, 2019-2023 Kızılırmak Havzası Hidrojeolojik Etüt Projesi

[2] DSİ Genel Müdürlüğü, 2022-2025 Dicle Havzası Hidrojeolojik Etüt Projesi

Batı Akdeniz Havzasında Hidrostratigrafik Karakterizasyon ve Yeraltısuyu Alt Havza Sınırlarının Belirlenmesi

Serkan GÜNER
Hidrowell Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti, Ankara
serkanguner@hidrowell.com.tr

Hikmetcan AKDOĞAN
Hidrowell Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti, Ankara
hikmetcanakdogan@hidrowell.com.tr

Nilsu OĞUZ
PPM Kirlilik Önleme ve Yönetimi Ltd. Şti., Ankara
nilsu118oguz@gmail.com

Burak TURAN
NFB Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Ankara
burakturan@nfbproje.com

Harun AYDIN
Hacettepe Üniversitesi, Ankara
harun@hacettepe.edu.tr

Esra YILDIRIM
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
esrayildirim@dsi.gov.tr

Nezih Burak AKAR*
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
nezihburakakar@dsi.gov.tr

Sermin KOÇER
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
sozsayin@dsi.gov.tr

Merve İŞLEK
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
merveislek@dsi.gov.tr

İsmail SEVİM
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
ismailsevim@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: hidrostratigrafi, yeraltısuyu alt havzası, karst hidrojeolojisi, akifer sınıflaması, Batı Akdeniz Havzası

1. Amaç

Batı Akdeniz Havzası, farklı tektonostratigrafik birliklerin, yaygın karbonatlı kayaçların, ofiyolitik kütlelerin, Neojen havza dolgularının ve alüvyal akiferlerin bir arada bulunduğu; yeraltısuyu dolaşımının yalnızca topoğrafik drenajla açıklanamadığı karmaşık bir hidrojeolojik sistemdir. Bu çalışmanın amacı, havza ölçeğinde jeolojik birimleri hidrostratigrafik özelliklerine göre sınıflandırmak ve bu sınıflamayı jeoloji, tektonik, karst morfolojisi, hidrojeokimya, çevresel izotoplar, kaynak debileri, yeraltısuyu seviyeleri ve yüzey suyu drenajı ile birlikte değerlendirerek yeraltısuyu alt havza sınırlarını ortaya koymaktır.

Çalışma, Batı Akdeniz Havzası Hidrojeolojik Etüt Projesi kapsamında hazırlanan Genel Hidrojeoloji Raporu'nun hidrostratigrafik yapının belirlenmesi ile yeraltısuyu alt havza belirleme çalışmalarını bütünleştirmektedir. Hidrostratigrafik sınıflama, yeraltısuyu alt havzalarının belirlenmesi, hidrojeolojik kavramsallaştırma, yeraltısuyu bütçesi ve yeraltısuyu kütlelerinin tanımlanması için temel veri katmanı olarak ele alınmıştır. Bu nedenle sınıflama yalnızca litolojiye dayalı bir haritalama işlemi olarak değil, kuyu ve kaynak verileri ile pompa testi sonuçlarının birlikte yorumlandığı işlevsel bir akifer karakterizasyonu olarak uygulanmıştır.

İkinci temel amaç, yüzey suyu havza sınırlarının yeraltısuyu sistemleri için her yerde geçerli olmayabileceği kabulünden hareketle, yeraltısuyu akımını kontrol eden geçirimli ve geçirimsiz birimler, yapısal sınırlar, karstik süreksizlikler ve kimyasal/izotopik göstergeler üzerinden hidrojeolojik drenaj alanlarını tanımlamaktır. Sonuçta havza, Bodrum-Milas, Gökova, Datça-Marmaris, Köyceğiz, Kızılcadağ, Beydağları, Gölhisar ve Acıpayam-Serinhisar olmak üzere sekiz yeraltısuyu alt havzasına ayrılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Hidrostratigrafik Sınıflama

Genel Jeoloji Raporu kapsamında tanımlanan 172 jeolojik birim; yaş, kalınlık, oluşum tipi, litoloji, stratigrafik konum, yüzeylenme ilişkileri, birim üzerindeki kuyu ve kaynakların sayısı ve temsil yeteneği, debi-seviye bilgileri, karstik çöküntü yoğunluğu ve pompa testi sonuçları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Birimlerin akifer olma özellikleri, birincil ve ikincil/üçüncül gözeneklilik türleri ile hidrolik iletkenlik karakterleri bu çoklu veri seti üzerinden yorumlanmıştır.

Kuyu noktalarının jeolojik birimlerle ilişkilendirilmesinde yalnızca yüzeydeki konum kullanılmamış; log bilgisi bulunan kuyulardan akifer seviyeler incelenmiş ve kuyunun temsil ettiği birim belirlenmiştir. Benzer şekilde dokanaklardan boşalan kaynaklarda, kaynağın üzerinde bulunduğu poligon yerine beslenim ve boşalımı kontrol eden jeolojik birim esas alınmıştır. Böylece özellikle bindirmeli, naplı ve karstik alanlarda yüzey jeolojisine dayalı hatalı eşleştirmelerin azaltılması amaçlanmıştır.

Pompa testleri ile elde edilen hidrolik iletkenlik katsayısı (K) değerleri, hidrostratigrafik yorumların nicel kontrolü olarak kullanılmıştır. Pompa testi çözümlemeleri ile hidrostratigrafik sınıflama paralel yürütülmüş; litolojik beklenti ile saha hidrodinamiği arasında uyumsuzluk görülen birimler yeniden değerlendirilmiştir. Karstik birimlerde ise kuyu verisinin mekânsal olarak düşük kotlarda yoğunlaşması nedeniyle 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalardan ve önceki çalışmalardan sayısallaştırılan karstik çöküntüler ek bir gösterge olarak kullanılmıştır.

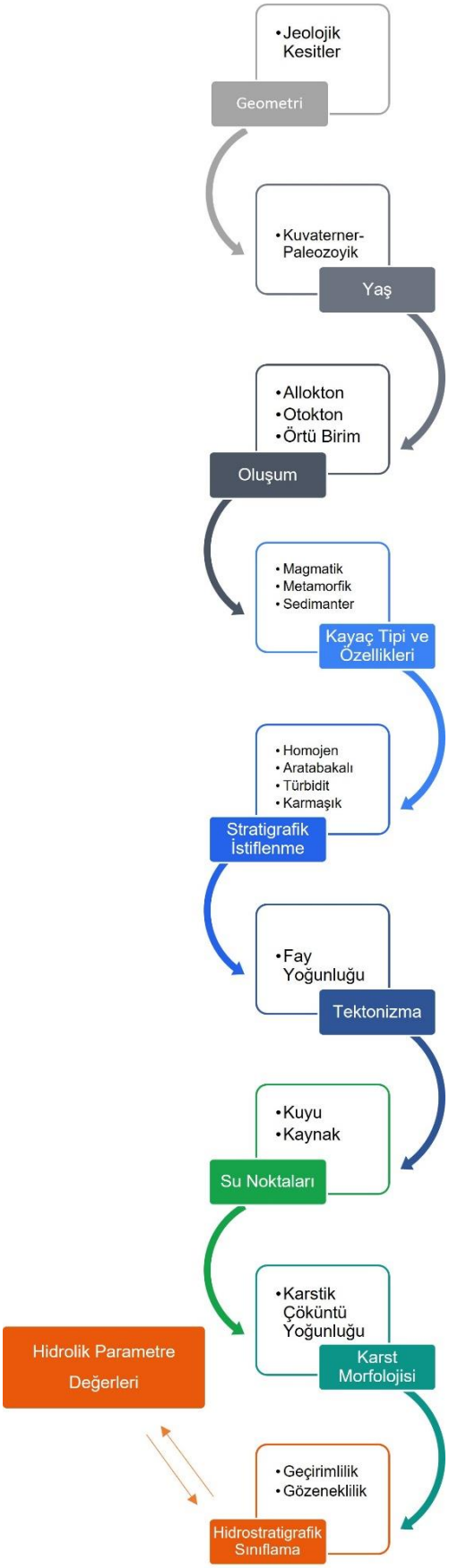
Hidrostratigrafik sınıflama; jeolojik birimlerin geometrisi, yaşı, oluşumu, kayaç tipi ve stratigrafik özellikleri ile tektonik yapı, kuyu-kaynak verileri ve karst morfolojisinin birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu veriler sonucunda birimlerin geçirimlilik ve gözeneklilik özellikleri ile hidrolik parametreleri dikkate alınarak hidrostratigrafik sınıfları belirlenmektedir (Şekil 1).

2.1.1 Hidrostratigrafik sınıflar

Hidrojeolojik haritalama lejantında Struckmeier ve Margat [1] yaklaşımı esas alınmış; birincil gözenekli akiferler mavi tonlarda, kırıklı-çatlaklı ve karstik akiferler yeşil tonlarda, düşük verimli birimler krem, belirsiz veya akifer özelliği göstermeyen birimler açık kahverengi tonlarda temsil edilmiştir. Çalışmada kullanılan temel sınıflar aşağıda özetlenmiştir (Tablo 1).

2.2 Yeraltısuyu Alt Havza Sınırlarının Belirlenmesi

Yeraltısuyu alt havza sınırları tek bir veri katmanına göre çizilmemiş; yüzey suyu alt havzaları, su bütçesi, tektonostratigrafi, tabaka eğim ve doğrultuları, hidrostratigrafi, jeolojik kesitler, karst morfolojisi, yeraltısuyu akım yönleri, hidrolojik korelasyonlar, hidrojeokimya ve çevresel izotop verilerinin ardışık ve karşılaştırmalı değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle karstik sistemlerde yüzey drenajı ile yeraltısuyu drenajının ayrışabildiği alanların tanımlanmasını sağlamıştır.

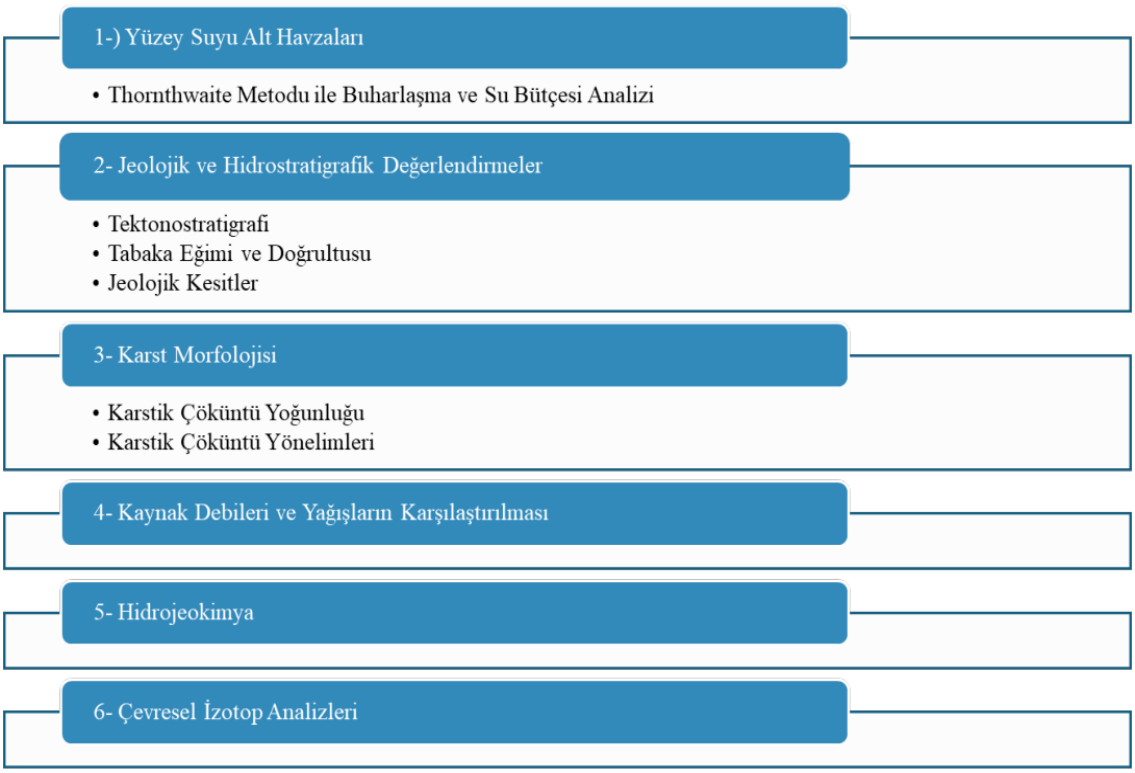


Şekil 1. Hidrostratigrafik sınıflama akış şeması

Tablo 1. Hidrostratigrafik sınıflama grupları

No	Hidrostratigrafik sınıf	Temel hidrojeolojik anlam
1	Yüksek verimli gözenekli akifer	Taneler arası gözenekliliğin baskın olduğu, yüksek iletkenlik ve verim gösteren birimler
2	Orta verimli gözenekli akifer	Gözenekli ortam akımının baskın olduğu, görece daha düşük/yerel verimli birimler
3	Yüksek verimli kırıklı-çatlaklı ve karstlaşmış akifer	Gelişmiş kırık-çatlak ve karst kanallarıyla yüksek verimli karbonatlı sistemler
4	Yüksek verimli kırıklı-çatlaklı akifer	Yapısal süreksizlikler boyunca yüksek iletim sağlayan kaya akiferleri
5	Orta verimli kırıklı-çatlaklı ve yer yer karstlaşmış akifer	Karstlaşmanın heterojen geliştiği orta verimli karbonatlı birimler
6	Orta verimli kırıklı-çatlaklı akifer	Süreksizlik kontrollü, orta düzey verimli kaya akiferleri
7	Düşük verimli ve/veya yerel kırıklı-çatlaklı akifer	Genel olarak zayıf, ancak yerel süreksizliklerde su iletebilen birimler
8	Belirsiz / akifer özelliği göstermiyor	Geçirimsiz veya mevcut veriyle akifer niteliği doğrulanamayan birimler

Yeraltısuyu alt havza sınırları; yüzey suyu alt havzaları ve su bütçesi, jeolojik-hidrostratigrafik yapı, tektonik özellikler ve karst morfolojisi temel alınarak belirlenmekte; sınırlar kaynak debisi–yağış ilişkileri, hidrojeokimyasal veriler ve çevresel izotop analizleri ile kontrol edilerek nihai hale getirilmesinde Batı Akdeniz Havzası özelinde yaklaşım geliştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yeraltısuyu alt havza sınırlarının belirlenmesinde kullanılan metodoloji

2.2.1 Yüzey suyu alt havzaları ve su bütçesi

Başlangıç geometrisi olarak DSİ Batı Akdeniz Havzası Master Planı'nda tanımlanan yüzey suyu alt havzaları kullanılmıştır [2]. Bu alt havzalar için Thornthwaite [3] yöntemiyle buharlaşma ve su bütçesi analizleri yapılmış; hidroloji ara raporunda üretilen yağış ve sıcaklık rasterları kullanılmıştır. Yüzey akış katsayısında akım gözlem istasyonlarından türetilen ortalama %25 değeri esas alınmış; hesaplanan beslenim miktarları alt havzalardaki kaynak debileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, yüzeysel

drenaj alanının kaynak boşalımını açıklamakta yetersiz kaldığı yerlerde yeraltısuyu havza sınırının yeniden değerlendirilmesi için bir kontrol mekanizması oluşturmuştur.

Yüzey suyu bütçesi sonuçları doğrudan nihai sınır olarak kabul edilmemiştir. Özellikle yüksek verimli kırıklı-karstik akiferlerde, topoğrafik su bölüm çizgilerini aşan yeraltısuyu transferlerinin olabileceği kabul edilmiş; buna karşılık düşük verimli birimlerin yaygın olduğu alanlarda yüzey drenaj sınırları daha güçlü bir gösterge olarak kullanılmıştır.

2.2.2 Tabaka eğimleri ve doğrultuları
Havzada MTA tarafından oluşturulan 1:25.000 ölçekli jeoloji veritabanındaki tabaka eğim/doğrultu sayısal verileri, yeraltısuyu dolaşımını kontrol edebilecek yapısal yönelimlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Antiklinal ve senklinal geometrileri ile tabakalanma gösteren karstik birimlerin doğrultuları; nap, masif ve grup bazında değerlendirilmiş, baskın yönelimler gül diyagramlarıyla karşılaştırılmıştır.

Beydağları Otoktonu'nda 4.185 ölçüm üzerinden kuzeydoğu-güneybatı, Bodrum Napı'nda 3.323 ölçüm üzerinden kuzey-güney ve Menderes Masifi'nde 1.573 ölçüm üzerinden kuzeydoğu-güneybatı doğrultuları baskın bulunmuştur. Tabaka doğrultuları doğrudan yeraltısuyu akım yönü olarak kabul edilmemiş; karstik çöküntü yönelimleri, jeolojik kesitler ve hidrostratigrafik süreklilikle birlikte sınır belirlemeyi destekleyen yapısal veri olarak kullanılmıştır. Genel jeoloji haritası üzerinde tabaka doğrultu yönelimleri ve sadeleştirilmiş jeoloji haritası lejantı Şekil 3'te sunulmuştur.

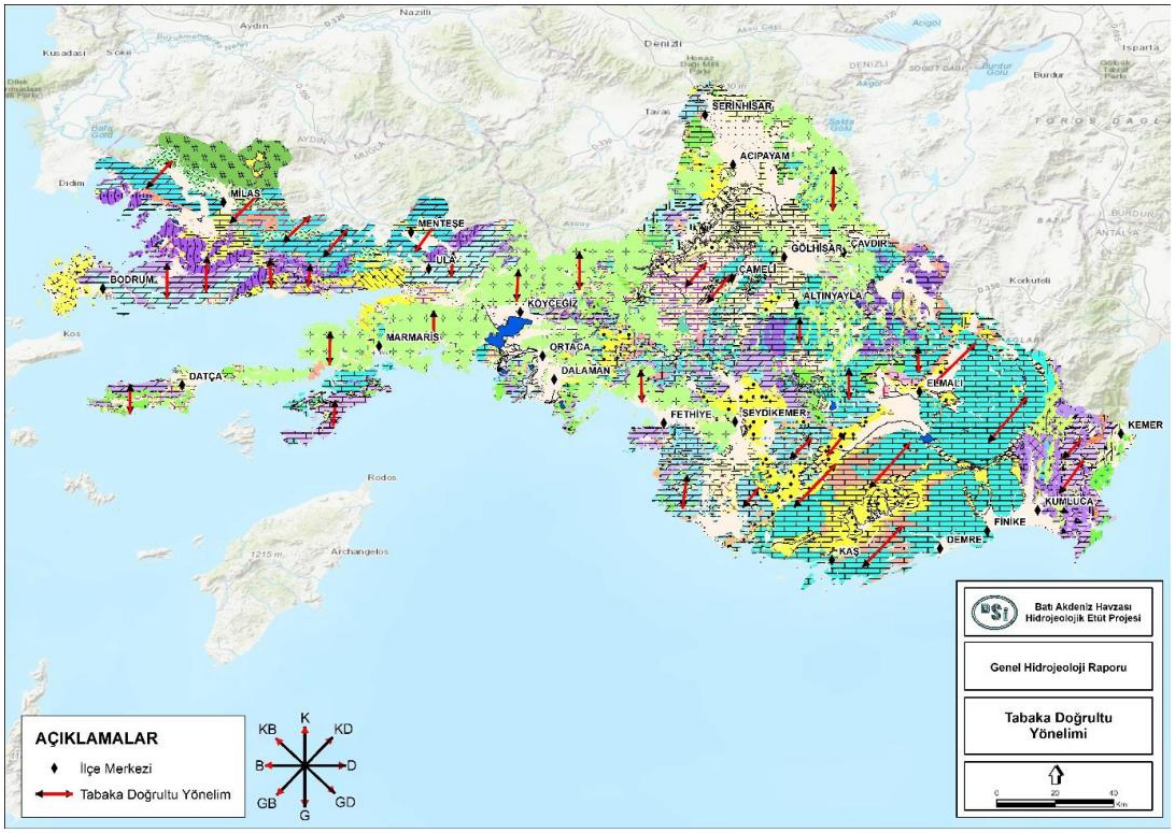
2.2.3 Hidrostratigrafi
Hidrostratigrafi haritası, yeraltısuyu alt havza sınırlarının belirlenmesindeki ana sentez katmanlarından biridir. Düşük verimli birimlerin egemen olduğu kesimlerde yüzey drenaj sınırları daha belirleyici olurken, yüksek verimli kırıklı-çatlaklı ve karstlaşmış akiferlerde formasyon sınırları, karbonatlı birimlerin sürekliliği ve yapısal ilişkiler ön plana çıkmıştır. Bu nedenle hidrostratigrafik sınıflama, topoğrafik sınırların hidrojeolojik olarak kontrol edilmesini sağlamıştır. Batı Akdeniz Havzası 8 farklı hidrostratigrafik sınıf altında haritalanmıştır (Şekil 4).

2.2.4 Karst morfometrisi
Batı Akdeniz Havzası'nda karstik birimlerin geniş yayılımı nedeniyle HGM topografik haritaları ve önceki çalışmalardan derlenen karstik çöküntüler CBS ortamına aktarılmış; yoğunluk, düzlemsellik ve yönelim olmak üzere üç morfometrik analiz uygulanmıştır. Çöküntü yoğunluğu, 1.000 x 1.000 m hücrelerde çöküntü sayısının hücre içindeki toplam karstik akifer alanına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Jeolojik grup bazında en yüksek yoğunluk Beydağları Otoktonu'nda 4.414,36 1/km²; en düşük yoğunluk ise Travertenler grubunda 5,02 1/km² olarak belirlenmiştir. Batı Akdeniz Havzası karstik çöküntü yoğunluğu haritası Şekil 5'te verilmiştir.

Düzlemsellik analizinde çöküntülerin uzun ekseni (L) ile kısa ekseni (W) arasındaki oran kullanılmıştır. L/W oranının 1'e yaklaşması dairesel, 1'den belirgin biçimde büyük olması ise ovalleşmiş çöküntü geometrisini ifade etmektedir. Havza genelinde verilerin büyük bölümü L=W ile L=2W arasında yoğunlaşmıştır. Yönelim analizinde ise dairesel şekillerin yönsüzlük etkisini azaltmak için yalnızca L/W > 1,3 olan eliptik çöküntüler kullanılmış; uzun eksen doğrultuları karst drenaj ağının olası yapısal yönelimleri açısından değerlendirilmiştir (Şekil 6).

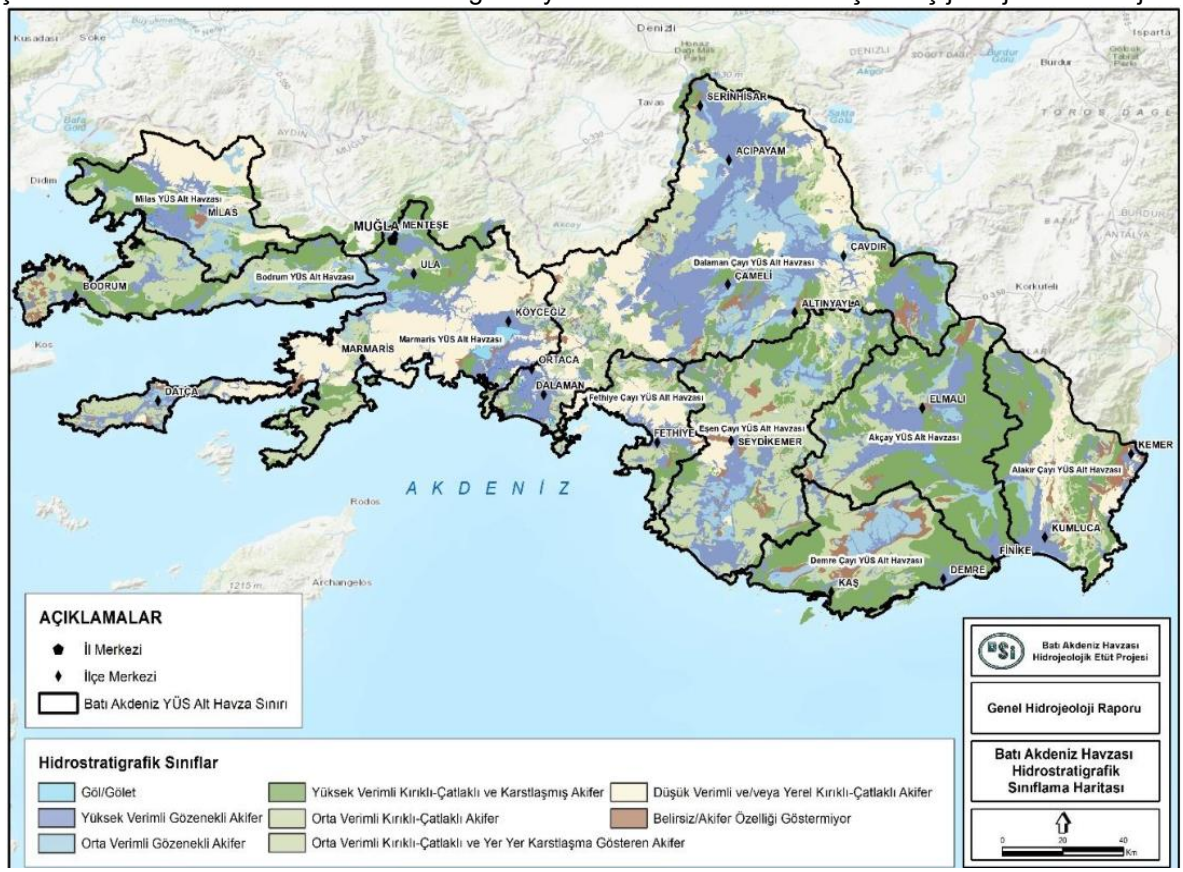
Karstik çöküntü yönelim haritasında havza ölçeğinde doğu-batı ve kuzey-güney doğrultuları baskın görünmektedir. Jeolojik grup bazlı gül diyagramlarında çöküntü yönelimleri tabaka doğrultuları ile karşılaştırılmış; iki veri grubunun tam olarak örtüşmediği belirlenmiştir. Bu sonuç, karst gelişiminde tabakalanmanın önemli olmakla birlikte tek başına belirleyici olmadığını; kırık-çatlak sistemleri ve diğer tektonik süreksizliklerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

2.2.5 Deniz suyu EC/tuzluluk özellikleri
Kıyı akiferlerinde denizel etkinin değerlendirilmesinde elektriksel iletkenlik (EC), tuzluluk, TDS ve majör iyon sonuçları birlikte ele alınmıştır. Raporda Tekfurambarı kaynağında EC değerlerinin 10.000 µS/cm'nin üzerinde olması ve drenaj alanının bu debiyi açıklamakta yetersiz kalması, deniz suyunun iç kesimlere girişimine ilişkin önemli bir hidrojeokimyasal gösterge olarak yorumlanmıştır. İki dönem izleme sonuçlarında Kumluca, Demre, Kemer, Fethiye, Milas, Marmaris ve Bodrum'un bazı kıyı kesimlerinde tuzlu su girişimi değerlendirilmiştir (Şekil 8).

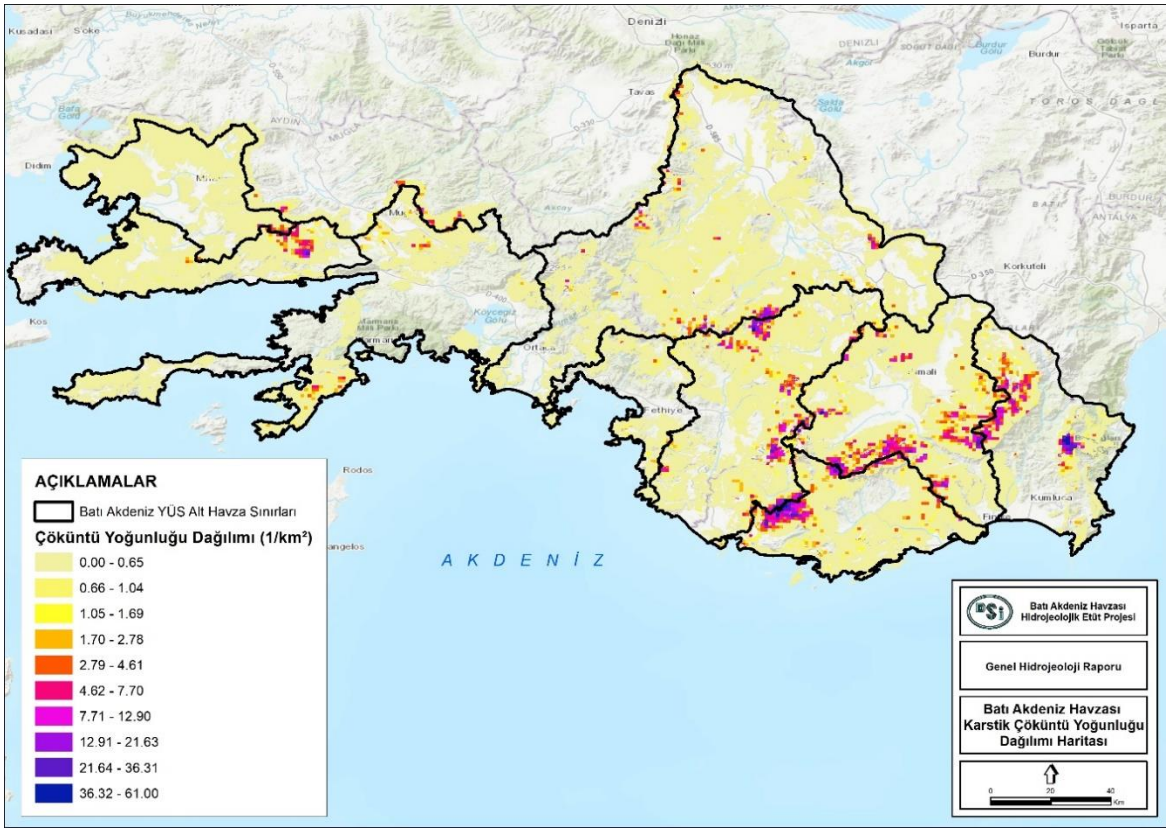


No	Renk / Sürşarj	Jeolojik Birim (Sadeleştirilmiş)	Yaş	Baskın Litoloji ve Özellikler	Harita Kodları (Örnek)
1		**Alüvyon ve Güncel Çökeller**	Kuvaterner (Q)	Alüvyon, taşkın düzlüğü, delta, göl ve kıyı çökelleri	Qal, Qym, Qay, Qe, Qa, Qtr, Q1ay
2		**Eski Alüvyon, Yamaç Molozu ve Karasal Genç Çökeller**	Kuvaterner – Pliyosen (Q–Pl)	Eski alüvyon, yamaç molozu, birikinti konisi, traverten, taraça ve karasal çökeller	Q1, Qp, Qt, plç, plçk, plçm, Qk, Qm
3		**Neojen Karasal ve Göl Çökelleri**	Miyosen – Pliyosen (M–Pl)	Kumtaşı, silttaşı, kiltaşı, marn, çakıltaşı, gölsel çökeller	Tmy, Tms, Tmk, Tmf, Tpg, Tmt, Tey, Tmm
4		**Paleojen ve Neojen Kırıntılı–Sedimanter Birimler**	Paleojen – Neojen (Pg – N)	Fliş, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı, marn, çakıltaşı	Te, Tmf, Tmk, Tay, Tms, Tey, Trçö
5		**Kretase – Senozoyik Karbonatlı Birimler**	Kretase – Paleojen (K – Pg)	Kireçtaşı, dolomit, rekristalize kireçtaşı, neritik karbonatlar	Kb, Kk, Kk a, Kk zm, Kk n, Kmo, Kg
6		**Jura – Kretase Karbonatlı Birimler**	Jura – Kretase (J – K)	Kalın katmanlı kireçtaşı, dolomit, resifal–masif karbonatlar	JKo, JKu, JKb, JKm, JKt, JKmu, JKmud
7		**Triyas – Jura Karbonatlı ve Sedimanter Birimler**	Triyas – Jura (Tr – J)	Kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı, radyolarit, kumtaşı, şeyl, silttaşı	TrJk, TrJd, TrJg, TrJt, Jb, Js, Jd
8		**Ofiyolitik Kayaçlar ve Melanj**	Mesozoyik (Tr – K)	Peridotit, serpantinit, gabro, bazalt, radyolarit, ofiyolitik melanj	Kü, Ktoh, Ktogd, Kç, Trat, Trak
9		**Metamorfik Temel Kayaçları**	Paleozoyik – Mesozoyik (Pz – Mz)	Şist, gnays, mermer, kuvarsit, amfibolit, metakumtaşı	Pzk ş, Pzk g, Pd, Pç, Pi, CP
10		**Magmatik ve Volkanik Kayaçlar**	Farklı yaşlar (Pz – Kz)	Granit, granodiyorit, diyorit, andezit, bazalt, tüf, ignimbrit vb.	Tay, Tf, Tek, Tek z, Tebe, Tpg, Trkv

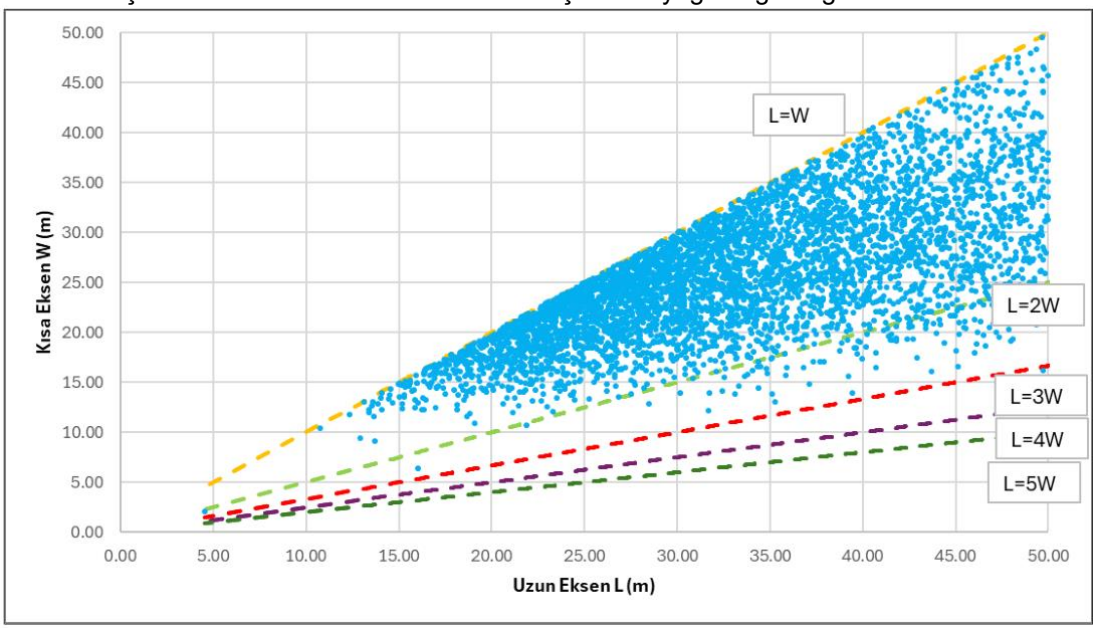
Şekil 3. Batı Akdeniz Havzası tabaka doğrultu yönelim haritası ve sadeleştirilmiş jeoloji haritası lejantı



Şekil 4. Batı Akdeniz Havzası hidrostratigrafi haritası

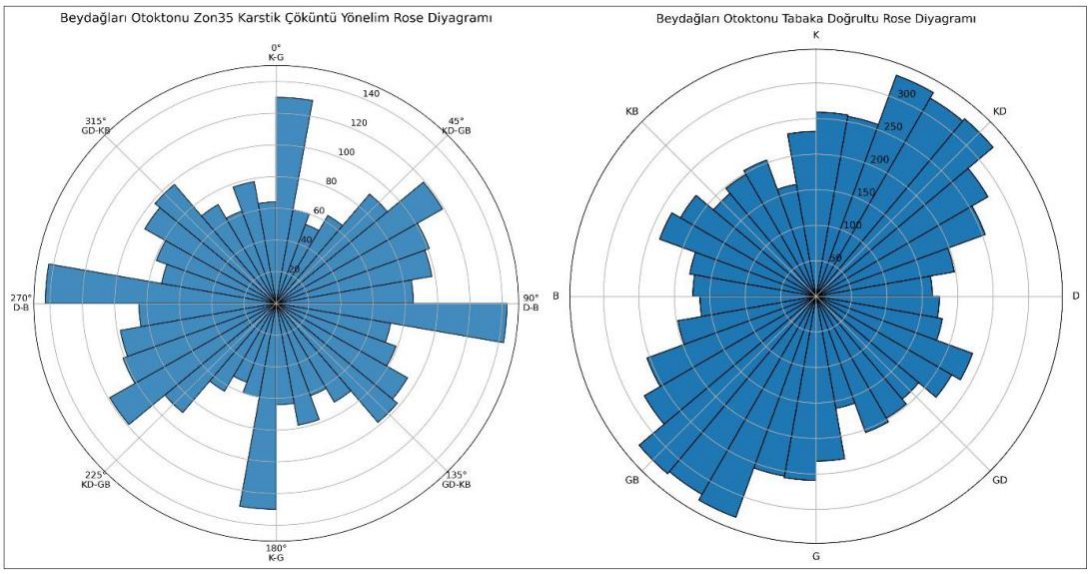


Şekil 5. Batı Akdeniz Havzası karstik çöküntü yoğunluğu dağılım haritası



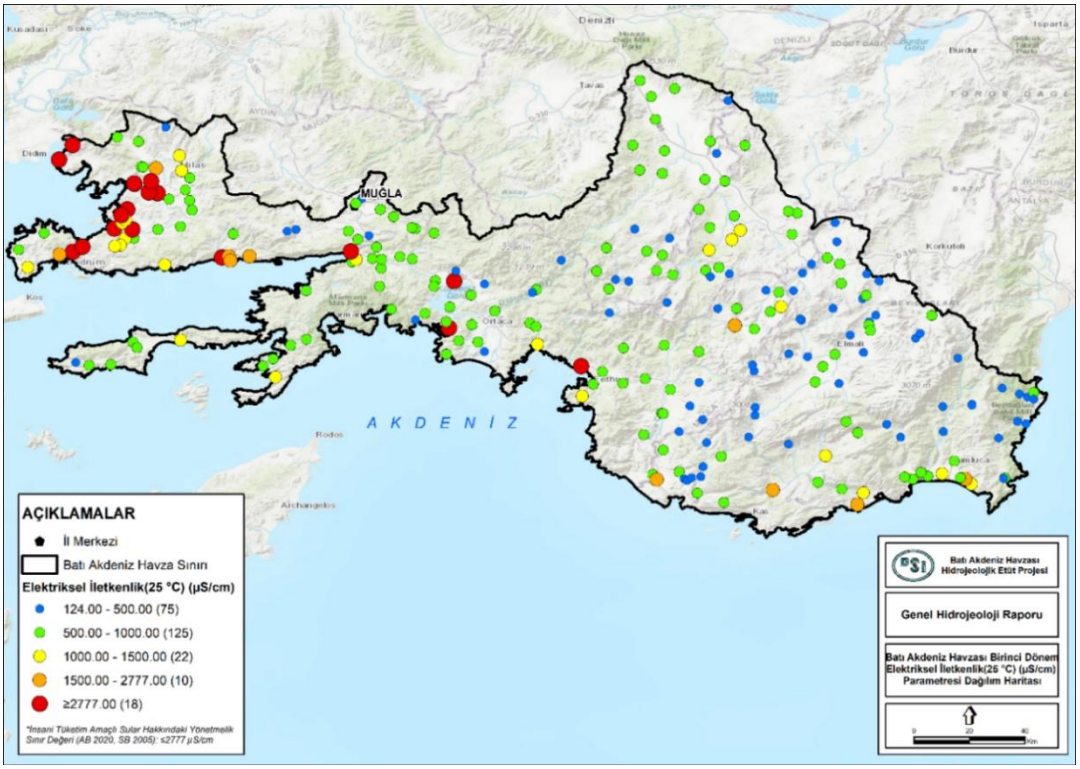
Şekil 6. Karstik çöküntülerde uzun eksen-kısa eksen oranı karşılaştırması

Batı Akdeniz Havzası özelinde farklı jeolojik formasyonlar için hazırlanan gül diyagramları kapsamında, Beydağları Otoktonu'na ait karstik çöküntülerin yönelimleri ile tabaka doğrultularını gösteren gül diyagramları Şekil 7'de sunulmuştur.

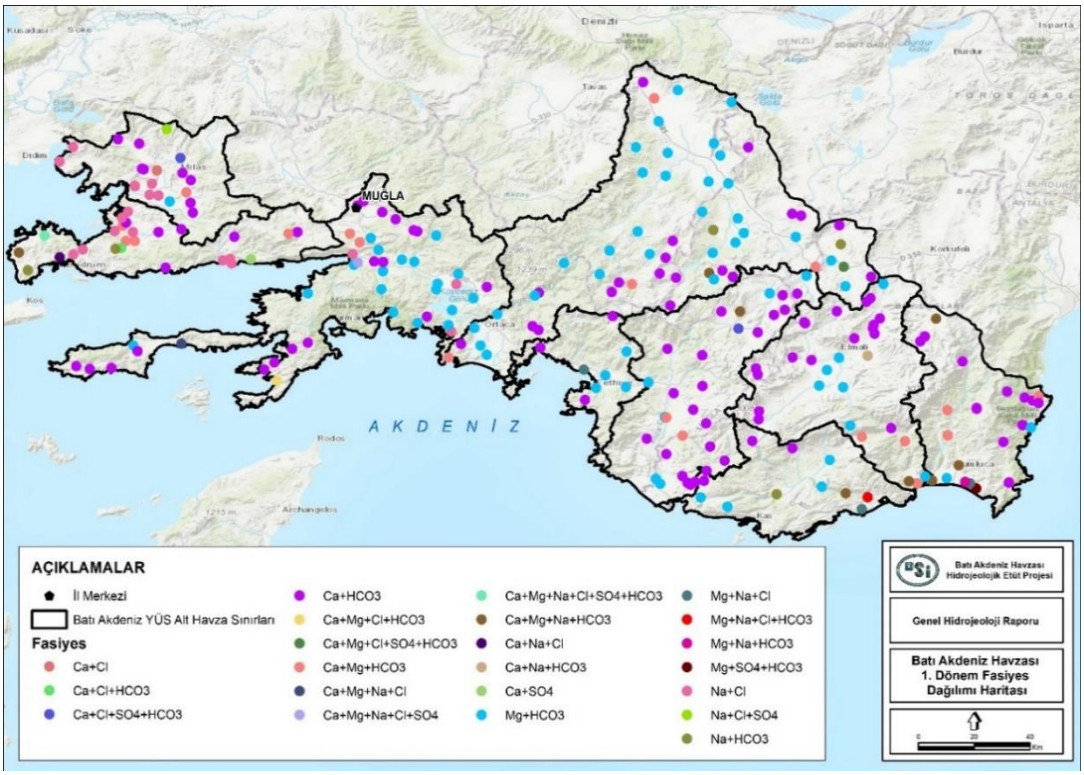


Şekil 7. Beydağları Otoktonu karstik çöküntü ve tabaka doğrultu gül diyagramları

Havza genelinde yüksek kotlu karbonatlı ve karstik beslenim alanlarında Ca-Mg-HCO_{33} fasiyesi ile görece düşük-orta EC değerleri doğal su-kayaç etkileşimini yansıtırken, kıyıya yaklaşıldıkça Na ve Cl oranlarının ve EC'nin artması denizel karışım/tuzlanma olasılığını güçlendirmektedir. Bununla birlikte EC artışlarının evaporasyon, sulama dönüş suları, drenaj suları ve yerel antropojenik etkilerden de kaynaklanabileceği dikkate alınmış; bu nedenle EC tek başına değil fasiyes, klorür-sodyum birlikteliği ve hidrojeolojik konumla birlikte yorumlanmıştır. Batı Akdeniz Havzası genel fasiyes dağılım haritası Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. Batı Akdeniz Havzası elektriksel iletkenlik değerleri dağılım haritası



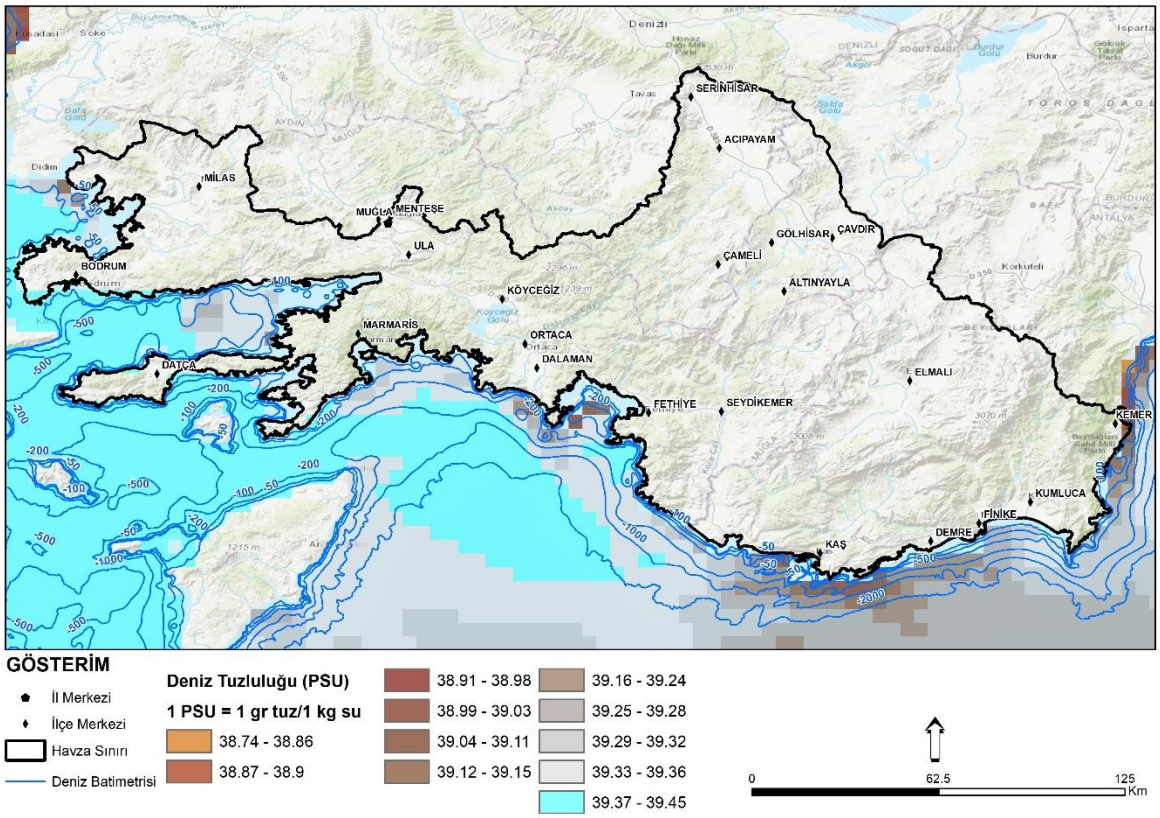
Şekil 9. Batı Akdeniz Havzası fasiyes dağılım haritası

2.2.6 Deniz batimetrisi ve kıyı yeraltısuyu-deniz etkileşimi

Denizaltı yeraltısuyu boşalımlarının değerlendirilmesinde Copernicus Programı batimetri ve deniz suyu tuzluluk verileri birlikte kullanılmıştır. Kıyı önündeki ani derinleşmeler, kıyıya paralel morfolojik kırıklar, lineamentler ve lokal çöküntüler; karstik akiferlerden denize boşalımı sağlayabilecek kırık, çatlak ve

karstik kanalların olası morfolojik yansımaları olarak değerlendirilmiştir. Açık denizde yaklaşık 39,2-39,4 PSU olan tuzluluğun bazı kıyı alanlarında 38,7-38,9 PSU'ya düşmesi, yaklaşık 0,3-0,6 PSU'luk tatlı su karışımı anomalisi olarak yorumlanmıştır.

Batimetri-tuzluluk birlikteliği Finike-Kumluca-Demre hattında en güçlü denizaltı yeraltısuyu boşalım potansiyeline işaret etmektedir: kıyıya yakın ani derinleşmeler, morfolojik düzensizlikler ve belirgin tuzluluk düşüşleri aynı alanlarda çakışmaktadır. Kaş-Kalkan kıyı bandında boşalımlar daha süreksiz ve noktasal, Fethiye-Göcek-Dalyan kesiminde daha zayıf ve dağınık, Marmaris-Datça-Bodrum kesiminde ise rapordaki değerlendirmeye göre ihmal edilebilir düzeydedir. Bu kıyı analizi, karstik akiferlerin denizle doğrudan hidrolik bağlantısının ve alt havza sınırlarının kıyıdaki boşalım davranışıyla birlikte ele alınmasının önemini göstermektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Batı Akdeniz Havzası kıyı kesimleri tatlısu girişimleri ve deniz batimetri haritası

2.2.7 Hidrojeokimya, çevresel izotoplar ve hidrolojik korelasyonlar

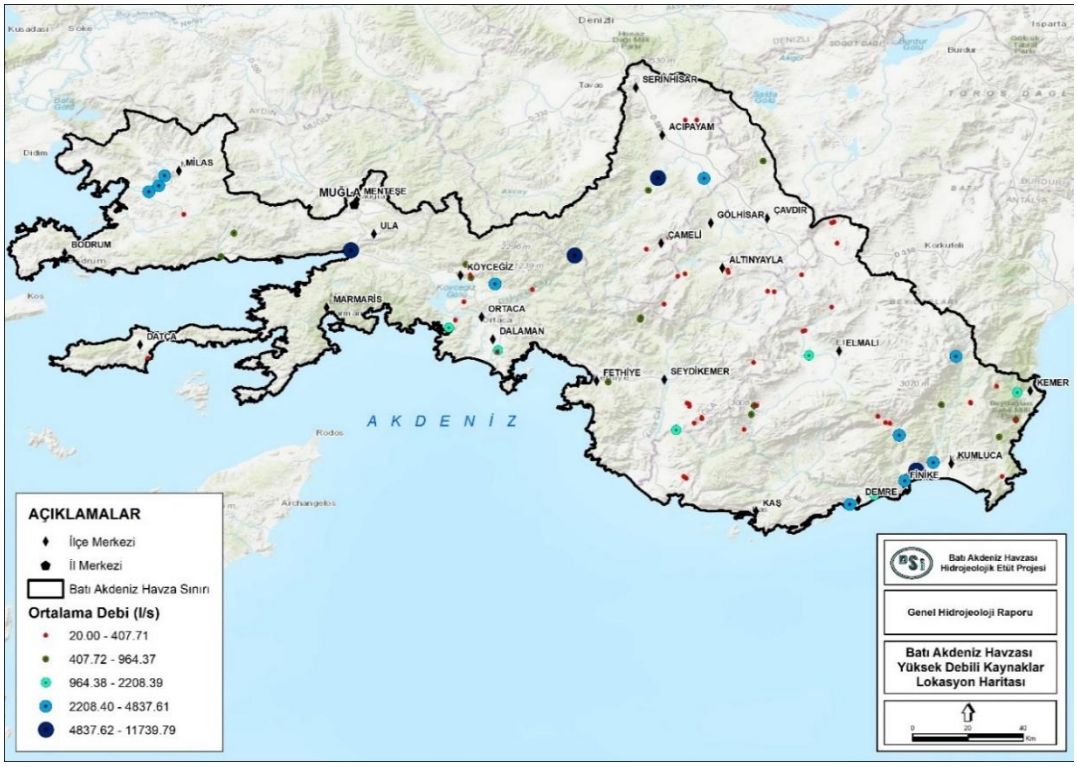
İki dönem su kimyası analizleriyle belirlenen fasiyesler, çevresel izotop sonuçları ve kaynak debisi-yağış/yeraltısuyu seviyesi ilişkileri; jeoloji, hidrostratigrafi ve karst morfometrisiyle belirlenen sınırların kontrolünde tamamlayıcı veri olarak kullanılmıştır. Benzer fasiyes ve izotopik karakterin jeolojik süreklilikle birlikte görülmesi hidrolik bağlantıyı desteklerken, belirgin kimyasal farklılaşmalar farklı beslenim veya akım sistemlerinin göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

3. Değerlendirme

3.1 Hidrostratigrafik Yapının Değerlendirilmesi

Hidrostratigrafik sınıflama sonuçları, Batı Akdeniz Havzası'nda litolojik adlandırmanın tek başına akifer davranışını açıklamak için yeterli olmadığını göstermektedir. Aynı litolojik grup içinde kırık-çatlak yoğunluğu, karstlaşma derecesi, tektonik konum ve örtü koşulları nedeniyle farklı verim sınıfları gelişebilmektedir. Bu nedenle sınıflama, birimlerin saha verisiyle gösterdiği hidrojeolojik işlevi esas alan dinamik bir yorum olarak ele alınmıştır.

Bu yaklaşımın belirgin örneklerinden biri Marmaris Peridotitleridir. Birim litolojik olarak düşük geçirgenlik beklenen bir kaya kütlesi olmasına karşın, raporda 20-11780 l/s aralığında debiye sahip 107 kaynakla temsil edilmektedir. Kaynakların varlığı, kırık ve çatlak sistemlerinin yoğunlaştığı zonlarda yerel yeraltısuyu iletiminin gelişebildiğini göstermiş; bu nedenle birim 'akifer özelliği göstermeyen' sınıftan çıkarılarak 'düşük verimli ve/veya yerel kırıklı-çatlaklı akifer' olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuç, hidrostratigrafik sınıflamanın litolojik varsayım yerine gözlemsel hidrojeolojik davranışla doğrulanmasının önemini ortaya koymaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. Batı Akdeniz Havzası yüksek debili kaynaklar haritası

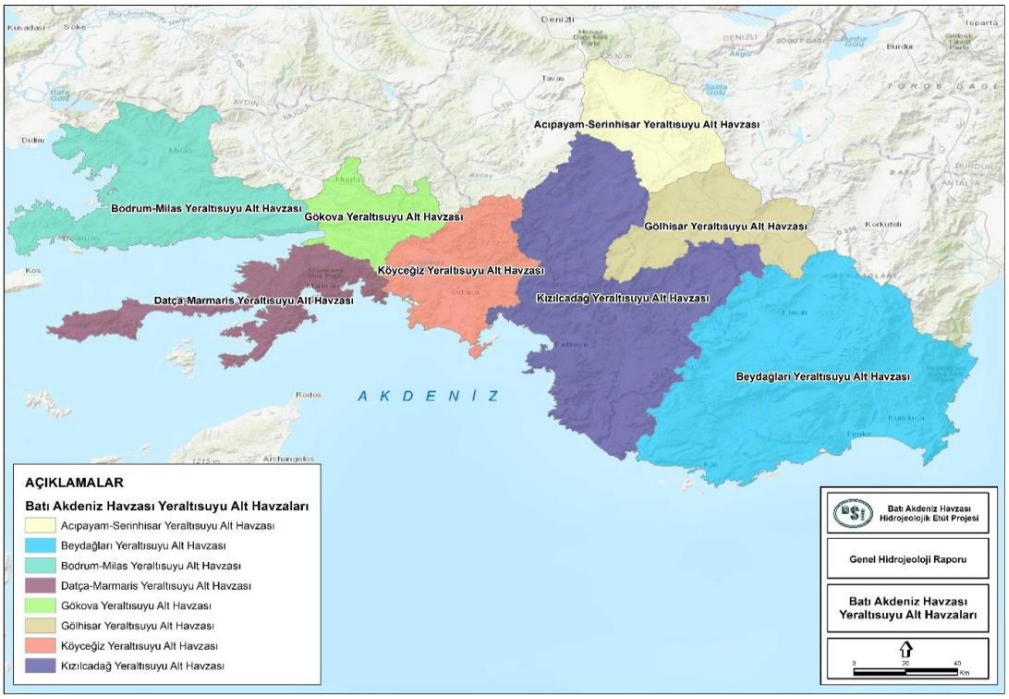
Karbonatlı birimlerde karstik çöküntü yoğunluğu özellikle kuyu verisinin az olduğu yüksek kotlarda sınıflama için kritik olmuştur. Karataş Formasyonu üzerinde yalnızca sınırlı kuyu verisi bulunmasına rağmen, yüksek karstik çöküntü yoğunluğu ve gelişmiş karst morfolojisi nedeniyle birim orta verimli kırıklı-çatlaklı ve yer yer karstlaşmış akifer olarak değerlendirilmiştir. Bu tür örnekler, morfolojik göstergelerin hidrojeolojik veri boşluklarını bütünüyle ikame etmese de sınıflama belirsizliğini azaltabildiğini göstermektedir.

Adet bazındaki dağılımda 82 jeolojik birimin akifer özelliği göstermeyen veya mevcut verilerle akifer niteliği doğrulanamayan grupta yer alması, havzadaki litostratigrafik çeşitliliğin önemli bir bölümünün bölgesel ölçekte üretken akifer oluşturmadığını göstermektedir. Buna karşılık yüzey alanı ve su üretimi açısından karbonatlı kırıklı-karstik sistemler ile alüvyal/gözenekli akiferler yeraltısuyu dolaşımında orantısız derecede yüksek öneme sahiptir. Bu durum, alt havza sınırlandırmasında birim sayısından çok akiferlerin mekânsal sürekliliği ve hidrolik işlevinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

3.2 Yeraltısuyu Alt Havza Sınırlarının Değerlendirilmesi

Sınır belirleme sürecinde yüzey suyu alt havzaları başlangıç çerçevesi sağlamış, ancak nihai sınırlar hidrojeolojik kanıtlarla değiştirilmiştir. Geçirimsiz veya düşük verimli birimlerin oluşturduğu bariyerler, nap ve tektonik dokanaklar, karbonatlı akiferlerin sürekliliği, karstik yönelimler ve yeraltısuyu akım yönleri birlikte değerlendirilmiştir. Bu nedenle ortaya çıkan yeraltısuyu alt havzaları, yüzey topoğrafyasını tamamen izleyen klasik havza sınırlarından farklılaşabilmektedir.
Özellikle Batı Akdeniz'in karstik kesimlerinde beslenim ve boşalım alanları arasında uzun mesafeli bağlantılar bulunabilmesi, yüzey suyu bölümü çizgilerinin tek başına kullanılmasını sakıncalı hale getirmektedir. Buna karşılık ofiyolitik kütleler ve düşük verimli kaya birimleri, bazı kesimlerde yeraltısuyu

sistemlerini ayıran etkili hidrojeolojik sınırlar oluşturmuştur. Hidrojeokimyasal fasiyesler ve çevresel izotoplar, bu jeolojik-hidrostratigrafik yorumların bağımsız kontrolü olarak değerlendirilmiştir. Batı Akdeniz Havzası 8 farklı yeraltısuyu alt havzası olarak ayrımlanmıştır (Şekil 12). Yeraltısuyu alt havzalarına ait alan bilgilerinin sunulduğu tablo, Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 12. Batı Akdeniz Havzası yeraltısuyu alt havzaları

Tablo 2. Belirlenen yeraltısuyu alt havzaları ve alanları

No	Yeraltısuyu alt havzası	Alan (km²)
1	Bodrum-Milas	2.883
2	Gökova	1.031
3	Datça-Marmaris	1.434
4	Köyceğiz	1.681
5	Kızılcadağ	4.979
6	Beydağları	5.979
7	Gölhisar	1.631
8	Acıpayam-Serinhisar	1.429

3.3 Yeraltısuyu Alt Havzalarının Hidrojeolojik Özellikleri

3.3.1 Bodrum-Milas yeraltısuyu alt havzası

Yaklaşık 2.883 km² alana sahip Bodrum-Milas alt havzasında sınırlar; karbonatlı ve kırıklı kaya akiferleri, Milas Ovası gözenekli akiferleri, düşük verimli birimler, jeolojik kesitler ve kıyı hidrojeokimyası birlikte değerlendirilerek belirlenmiştir.

3.3.2 Gökova yeraltısuyu alt havzası

Yaklaşık 1.031 km² alana sahip Gökova alt havzasında alüvyal ve karbonatlı akiferlerin ilişkisi, Menderes Masifi çevresindeki jeolojik sınırlar, yüzey drenajı ve kıyıya yönelen yeraltısuyu akımı temel belirleyicilerdir.

3.3.3 Datça-Marmaris yeraltısuyu alt havzası

Yaklaşık 1.434 km² alana sahip Datça-Marmaris alt havzasında yarımada geometrisi, Marmaris Peridotitleri, karbonatlı birimler ve kıyı drenajı öne çıkmaktadır; peridotitlerdeki yerel kırık-çatlak geçirgenliği sınır yorumlarında dikkate alınmıştır.

3.3.4 Köyceğiz yeraltısuyu alt havzası
Yaklaşık 1.681 km² alana sahip Köyceğiz alt havzasında Marmaris Peridotitleri, yüzey suyu sınırları, Namnam ve Dalaman drenajı ile göl-akarsu-yeraltısuyu ilişkileri birlikte değerlendirilmiştir.

3.3.5 Kızılcadağ yeraltısuyu alt havzası
Yaklaşık 4.979 km² alana sahip Kızılcadağ alt havzasında Marmaris Peridotitleri, Beydağları Otoktonu-Yeşilbarak Napı ilişkisi, jeolojik kesitler ve Dalaman-Eşen drenaj sistemleri sınırlandırmada belirleyici olmuştur.

3.3.6 Beydağları yeraltısuyu alt havzası
Yaklaşık 5.979 km² alanıyla en geniş alt havza olan Beydağları'nda Beydağları Otoktonu, Yeşilbarak Napı, geçirimsiz sınır birimleri ve Demre-Akçay-Alakır drenajları; yaygın kırıklı-karstik akifer sistemiyle birlikte değerlendirilmiştir.

3.3.7 Gölhisar yeraltısuyu alt havzası
Yaklaşık 1.631 km² alana sahip Gölhisar alt havzası, Söğüt-Çavdır-Gürsu akifer sistemleri ile Gölhisar Sulak Alanı arasındaki hidrolik ilişkiler nedeniyle çok bileşenli ve bütünleşik bir hidrojeolojik sistem olarak değerlendirilmiştir.

3.3.8 Acıpayam-Serinhisar yeraltısuyu alt havzası
Yaklaşık 1.429 km² alana sahip Acıpayam-Serinhisar alt havzasında ova alüvyonları ile çevredeki kırıklı-karstik kaya akiferlerinin birlikte çalıştığı karma sistem; havza ayırım sınırları ve komşu alt havzalarla ilişkiler üzerinden tanımlanmıştır.

3.4 Yöntemin Güçlü Yönleri ve Belirsizlikler

Uygulanan metodolojinin en güçlü yönü, farklı ölçek ve türdeki verileri aynı hidrojeolojik soruya bağlamasıdır. Jeoloji ve hidrostratigrafi akifer ortamının fiziksel çerçevesini; pompa testleri hidrodinamik davranışı; karst morfolojisi ikincil/üçüncül gözeneklilik gelişimini; hidrojeokimya ve izotoplar suyun köken ve karışım özelliklerini; hidrolojik korelasyonlar ise sistemin zamansal tepkisini temsil etmektedir. Bu veri gruplarının aynı sınırı desteklemesi, alt havza tanımının güvenilirliğini artırmaktadır.

Bununla birlikte raporda sınırların projenin ilerleyen aşamalarında elde edilecek yeni izotop, su kimyası ve su bütçesi bulgularına göre gerekli görülmesi halinde revize edilebileceği belirtilmiştir. Bu yaklaşım, hidrojeolojik sınırların özellikle karstik alanlarda mutlak ve değişmez çizgiler yerine, yeni gözlemlerle geliştirilebilen kavramsal sınırlar olduğunu kabul etmektedir. Kuyu ve kaynak verilerinin mekânsal dağılımındaki eşitsizlik, yüksek kotlarda gözlem eksikliği, bazı formasyonlarda sınırlı pompa testi ve kıyı akiferlerinde deniz suyu etkisi başlıca belirsizlik kaynaklarıdır.

Bu nedenle alt havza sınırları, hidrojeolojik yönetim ve bütçe çalışmalarında kullanılabilecek en uygun güncel sentez olarak değerlendirilmekle birlikte, uzun dönemli seviye-debi izlemeleri, yeni izotop dönemleri ve nicel yeraltısuyu bütçesi sonuçlarıyla periyodik olarak kontrol edilmelidir. Özellikle komşu alt havzalar arasında yüksek verimli karbonatlı akiferlerin devam ettiği kesimlerde sınır duyarlılığı daha yüksektir.

4. Sonuçlar

Batı Akdeniz Havzası'nda 172 jeolojik birim, litoloji ve stratigrafik konumun yanı sıra kuyu-kaynak temsiliyeti, debi-seviye verileri, pompa testleri ve karst morfolojisi kullanılarak hidrostratigrafik açıdan değerlendirilmiştir.

Hidrostratigrafik sınıflama, birincil gözenekli akiferler ile kırıklı-çatlaklı/karstik akiferleri verim düzeylerine göre ayırmış; düşük verimli ve akifer özelliği göstermeyen birimler ayrıca tanımlanmıştır.

Litoloji ile hidrojeolojik davranışın her zaman bire bir örtüşmediği görülmüştür. Marmaris Peridotitleri, çok sayıdaki kaynak ve kırık-çatlak kontrollü boşalımlar nedeniyle yerel ölçekte su iletebilen düşük verimli kırıklı-çatlaklı akifer olarak değerlendirilmiştir.

Karstik çöküntü yoğunluğu, özellikle kuyu verisinin az olduğu yüksek kotlu karbonatlı alanlarda akifer sınıflamasını destekleyen önemli bir yardımcı veri olmuştur.

Yeraltısuyu alt havza sınırları; yüzey suyu havzaları, Thornthwaite su bütçesi, tektonostratigrafi, tabaka geometrisi, hidrostratigrafi, jeolojik kesitler, karst morfolojisi, hidrojeokimya, çevresel izotoplar ve hidrolojik korelasyonların bütünleşik değerlendirilmesiyle belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda Bodrum-Milas (2.883 km²), Gökova (1.031 km²), Datça-Marmaris (1.434 km²), Köyceğiz (1.681 km²), Kızılcadağ (4.979 km²), Beydağları (5.979 km²), Gölhisar (1.631 km²) ve Acıpayam-Serinhisar (1.429 km²) olmak üzere sekiz yeraltısuyu alt havzası tanımlanmıştır.

Karstik ve kırıklı akiferlerin egemen olduğu kesimlerde yeraltısuyu sınırlarının yüzey suyu bölümü çizgilerinden sapabileceği; düşük verimli ve geçirimsiz birimlerin ise etkili hidrojeolojik sınırlar oluşturabildiği ortaya konmuştur.

Hidrojeokimyasal fasiyesler ve çevresel izotop verileri, jeolojik-hidrostratigrafik sınırların kontrolünde tamamlayıcı kanıt sağlamış; özellikle ortak beslenim alanları ve olası hidrolik bağlantıların yorumlanmasına katkıda bulunmuştur.

Gölhisar alt havzası, Söğüt-Çavdır-Gürsu akifer sistemleri ile Gölhisar Sulak Alanı arasındaki bölgesel bağlantılar nedeniyle çok bileşenli bütünleşik bir sistem; Acıpayam-Serinhisar ise kırıklı-karstik çevre akiferleri ile yoğun kullanılan alüvyal ova akiferlerinin birlikte çalıştığı karma bir sistem olarak değerlendirilmiştir.

Belirlenen sınırlar, kavramsal modelleme, yeraltısuyu bütçesi ve yeraltısuyu kütlelerinin tanımlanması için temel hidrojeolojik altlığı oluşturmaktadır. Yeni izotop, su kimyası, uzun dönem izleme ve bütçe sonuçları elde edildikçe sınırların kontrol edilmesi ve gerektiğinde revize edilmesi önemlidir.

5. Kaynaklar

[1] Struckmeier, W. F., & Margat, J. (1995). Hydrogeological Maps: A Guide and a Standard Legend. Hannover: Verlag Heinz Heise.

[2] DSİ. (2017). Batı Akdeniz Havzası Master Plan Raporu. Ankara.

[3] Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review.

[4] Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Groundwater. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

Bahçeyaka-Bayır Bölgesindeki (Muğla, Türkiye) İçme Suyu Kuyuları ve Kaynakları İçin Yeraltısuyu Koruma Alanlarının Belirlenmesi Projesi

Ahmet EMİN*
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
ahmetemin@dsi.gov.tr

Merve İŞLEK
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
merveislek@dsi.gov.tr

Burcu EŞSİZ
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
burcusengoz@dsi.gov.tr

Özay YURTTAŞ
DSİ 21. Bölge Müdürlüğü, Aydın
ozayyurttas@dsi.gov.tr

Yarkın ÜNLÜOĞLU
Hidrowell Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti., Ankara
yarkinunluoglu@hidrowell.com.tr

Serkan GÜNER
Hidrowell Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti., Ankara
serkanguner@hidrowell.com.tr

Murat EKMEKÇİ
Jeomes Yer Bilimleri Mühendislik Müşavirlik, Muğla
murat-ekmekci@hotmail.com

Bora TURAN
NFB Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Ankara
bora.turan@nfbproje.com

Burak TURAN
NFB Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Ankara
burak.turan@nfbproje.com

Harun AYDIN
Hacettepe Üniversitesi, Hidrojeoloji Mühendisliği Programı, Ankara
harun@hacettepe.edu.tr

İsmail SEVİM
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
ismailsevim@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* yeraltısuyu koruma alanı, nümerik yeraltısuyu akım modeli, izleyici deneyleri

1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, Muğla ili Yatağan ilçesi çevresindeki Bahçeyaka-Bayır içme suyu kuyuları ile başta Dipsiz ve Pınarbaşı olmak üzere içme-kullanma suyu sağlayan kaynakların beslenim, dolaşım ve boşalım sistemlerini ortaya koymak; su kaynaklarını miktar ve kalite açısından değerlendirmek; etkin yeraltısuyu koruma alanlarını belirlemektir. Bu çalışmada, jeoloji, jeofizik, hidroloji, hidrojeokimya, izotop hidrolojisi ve hidrojeoloji verileri üç boyutlu jeolojik model, hidrojeolojik kavramsal model, yeraltısuyu bütçesi ve nümerik akım modelinde bütünleştirilmiştir.

Mart 2025-Mayıs 2026 döneminde 15 izleme dönemi yürütülmüş; su seviyeleri, kaynak ve akarsu debileri ve yerinde fizikokimyasal parametreler izlenmiştir. Kemograf kayıtları, su kimyası ve çevresel izotop analizleri, akifer testleri, boya izleme deneyleri ve jeofizik araştırmalar birlikte değerlendirilerek koruma alanlarının yalnızca topografik sınırlar üzerinden değil, ölçülen ve modellenen yeraltısuyu bağlantıları üzerinden tanımlanması sağlanmıştır.

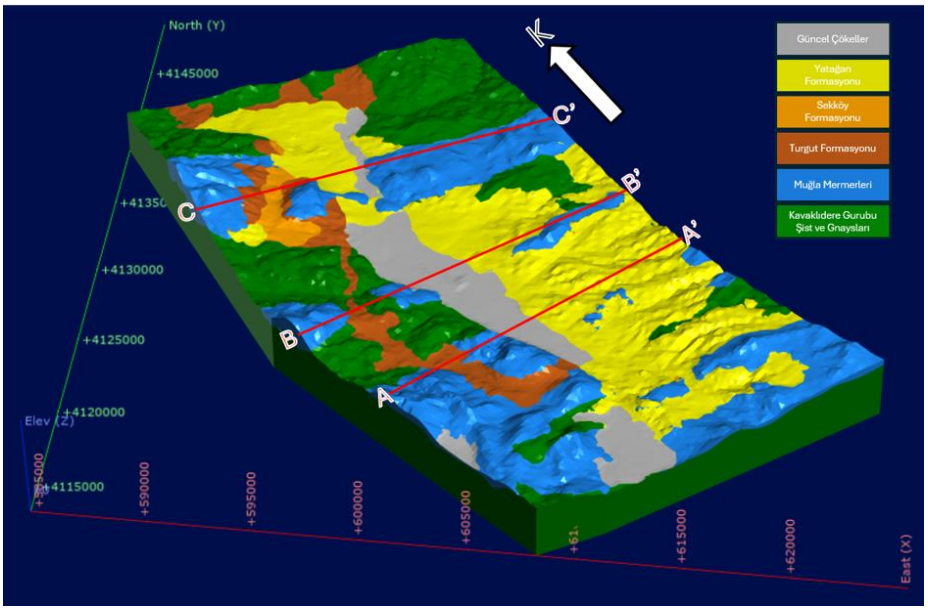
2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Veri Altyapısı

Çalışma alanı, Büyük Menderes ve Batı Akdeniz havzalarının kesişiminde, Muğla Mermerleri ile Kavaklıdere Grubu'nun yüksek kotlu yüzeylenmeleri ve Yatağan Ovası'nı kapsayan çok ölçekli bir hidrojeolojik sistemdir; değerlendirme bölgesel ölçek, bütçe-hassasiyet alanı ve 237 km²'lik nümerik model alanı olmak üzere üç ölçekte yürütülmüştür. Kasım 2024-Ocak 2025 envanterinde toplam 1.658 kuyu tespit edilmiş; MUSKİ'den 270 su noktasına ait veri alınmış, toplam antropojenik su kullanımı 52,84 hm³/yıl hesaplanmıştır.

2.2 Jeoloji, Jeofizik ve Üç Boyutlu Katı Model

Jeolojik yapı 1/25.000 ölçekte haritalanmış; litoloji, stratigrafi, fay-süreksizlik sistemleri ve karst morfolojisi arazi gözlemleriyle denetlenmiştir. Altı hat üzerinde 30 düşey elektrik sondajı, Pınarbaşı ve Dipsiz membalarında elektriksel özdirenç tomografisi uygulanmıştır. Üç boyutlu katı model, 44 DSİ, 20 MTA ve 37 özel sektör kuyusu (101 gerçek log) ile jeofizik kesitlerden türetilen 117 sanal kuyu kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 1). Kavaklıdere Grubu temelinin, Muğla Mermerlerinin, Neojen istifin ve alüvyonun yanal-düşey geometrisini ortaya koyarak nümerik model katman geometrisine girdi sağlamıştır.



Şekil 1. Yatağan çalışma alanının üç boyutlu jeolojik katı model gösterimi

2.3 Hidrolojik İzleme ve Kemograf Değerlendirmesi

Hidrolojik değerlendirme; meteorolojik gözlem ağı, uzun dönem yağış-sıcaklık serileri, akım gözlem istasyonları, kaynak debileri, kuyu seviyeleri ve 15 aylık saha ölçümlerinin birlikte yorumlanmasına dayanmaktadır. Dipsiz, Deştin ve Pınarbaşı sistemlerinde kemograflarla yüksek zaman çözünürlüklü seviye, sıcaklık ve elektriksel iletkenlik verileri elde edilmiştir. Veriler, kaynakların kısa süreli yağışa doğrudan yağmur suyu biçiminde değil, rezervuar suyunun hidrolik itilmesi ve karışım yoluyla tepki verdiğini göstermiştir. Pınarbaşı sistemi 2025 yazında kaynak kotunun altına düşerek kurumuş, 2026 başındaki yağışlarla hızla yeniden etkinleşmiştir. Dipsiz Kaynağı için ortalama beslenim 288,3 mm/yıl, ortalama toplam depolama yaklaşık 76,2 hm³ olarak Maillet üstel boşalım eşitliğiyle hesaplanmış ve çekilme döneminde depolamanın ortalama %56'sının boşaldığı belirlenmiştir [1]. Çekilme eğrisinin genel formuna göre kaynak, Worthington sınıflamasında Tip 1 olarak değerlendirilmiştir [2].

2.4 Hidrojeokimya ve İzotop Hidrolojisi

Mart 2025-Mayıs 2026 yerinde ölçümleri ile Mart ve Eylül 2025 laboratuvar analizleri kullanılmıştır. Ortalama elektriksel iletkenlik 663 µS/cm, sıcaklık 17,1 °C, pH 7,3; örneklerin %78'i Ca-HCO3 fasiyesindedir. Çevresel izotop analizlerinde iki dönemde toplam 22 kaynak, 55 kuyu, 5 yağış ve 1 akarsu örneklenmiş; oksijen-18, döteryum ve trityum sonuçları meteorik kökeni, yüksek kotlu beslenimi ve genç-yaşlı su karışımını değerlendirmek için kullanılmıştır [3,4].

2.5 Akifer Testleri, Boya Deneyleri ve Hidrolik Bağlantılar

Pınarbaşı ve Dipsiz sistemlerinde akifer testleri ve boya deneyleri, karstik ve Neojen akiferler arasındaki hidrolik bağlantıların doğrudan sınanması için kullanılmıştır. Pınarbaşı AT-2 kuyusunda kaynak akış göstermiyorken 60-70 L/s debi alınabilmesi, kaynak kotunun altında ve ova yönünde devam eden karstik rezervi göstermiştir. Dipsiz AT-1 testinde ~41 m düşüme karşılık 130 m uzaktaki GK-1 kuyusunda 0,92 m düşüm ~8 saat sonra gözlenmiştir. Pınarbaşı boya deneyinde ~%44 geri kazanım, 40-45 m/gün (yağışlı koşullarda 600-1.000 m/gün) hız hesaplanmıştır. Dipsiz deneylerinde geri kazanım %34-99,9, maksimum hızlar 44-1.900 m/gün aralığında değişmiş; bu geniş aralık karstik sistemin heterojen yapısını göstermektedir.

2.6 Yeraltısuyu Bütçesi ve Nümerik Modelleme

USGS Thornthwaite Aylık Su Dengesi Modeli yağış, sıcaklık, evapotranspirasyon, toprak nemi, yüzey akışı ve yeraltısuyu beslenimi bileşenleri üzerinden kalibre edilmiştir [5,6]. 1.041,90 km²'lik bütçe alanında uzun dönem ortalama yağış hacmi 673,50 hm³/yıl; gerçek evapotranspirasyon 434,73 hm³/yıl; yüzey akışı 29,87 hm³/yıl ve yeraltısuyu beslenimi 208,86 hm³/yıl olarak hesaplanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Hidrolojik bütçe bileşenleri

Bileşen	Değer (hm³/yıl)	Yaklaşık pay
Yağış	673,50	%100
Gerçek evapotranspirasyon	434,73	%65
Yüzey akışı	29,87	%4
Yeraltısuyu beslenimi	208,86	%31

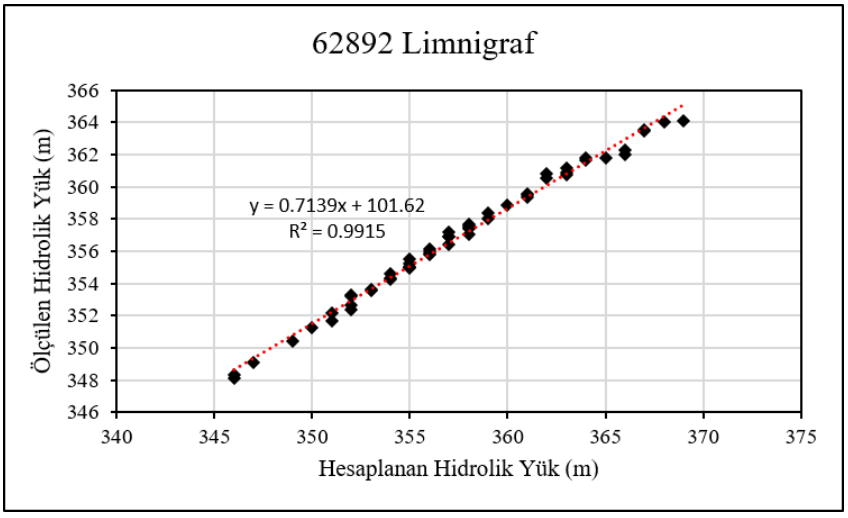
Nümerik yeraltısuyu akım modeli, Bahçeyaka-Bayır çevresindeki MUSKİ kuyularının beslenim güzergâhlarını, akım yönlerini ve koruma alanlarını nicel değerlendirmek amacıyla yaklaşık 237 km²'lik ova kesimi için MODFLOW 6 ve ModelMuse kullanılarak dört katmanlı kurulmuştur [7,8,9,10]. Karstik Muğla Mermerleri ve Kavaklıdere Grubu, sürekli gözenekli ortam varsayımının karstik akımı yeterince temsil etmemesi nedeniyle model alanına sağladıkları yanal ve derin beslenim üzerinden sınır koşullarına aktarılmıştır. Kararlı akım bütçesi bağımsız hidrolojik bütçeyle uyumlu kurulmuş; süzülme ~112.000 m³/gün, karstik birimlerden yanal/derin beslenim ~226.000 m³/gün, akarsulara baz akım ~338.000 m³/gün olarak tanımlanmıştır. Kalibrasyon PEST ve 22 pilot nokta ile yürütülmüş; DSİ kuyularında ~%3, sanal noktalar dahil ~%6 hata ve ~6 m RMSE elde edilmiştir.

Kararsız akım modeli 2020-2035 için 14 senaryoyla çalıştırılmıştır; ana senaryoda kuyu çekimi 2020'de 18,2, 2025'te 20, 2035'te 24,6 hm³/yıl, 62892 no.lu kuyuda ortalama hata %0,4 ve RMSE 1,75 m bulunmuştur (Şekil 2).

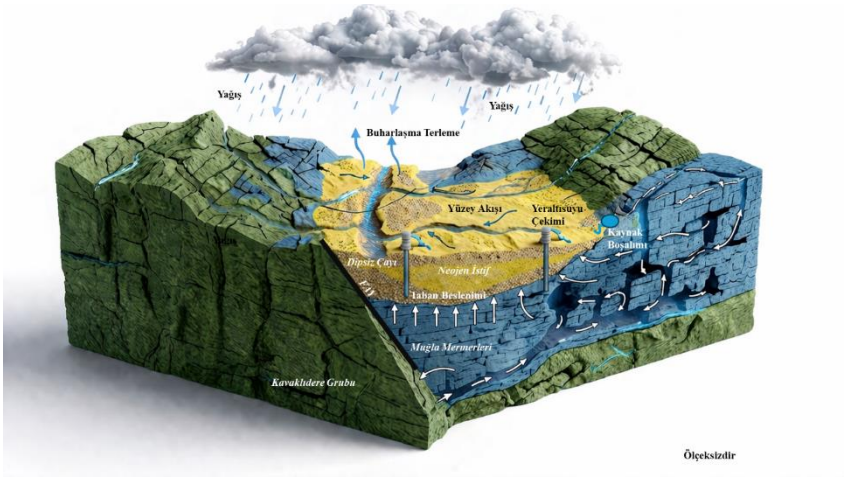
3. Değerlendirme

3.1 Hidrojeolojik Sistem ve Beslenim-Boşalım İlişkileri

Bulgular, karstik, kırıklı-çatlaklı ve gözenekli ortamların güçlü hidrolik ilişkiler kurduğu çok bileşenli bir sistemi göstermektedir: Muğla Mermerleri ve Kavaklıdere Grubu ana karstik akiferleri, Yatağan-Sekköy-Turgut formasyonları orta verimli kırıklı-çatlaklı akiferleri, güncel çökeller yüksek verimli gözenekli akiferi temsil etmektedir. Yüksek kotlarda karstik sisteme giren su hızlı kanal akımı ve derin dolaşımla kaynaklara ulaşmakta, Muğla Mermerlerinin ova altındaki devamı ise Neojen istifi yanal ve tabandan beslemektedir (Şekil 3).



Şekil 2. Kararsız akım koşullarında Bahçeyaka-Bayır bölgesi tahmin grafiği



Şekil 3. Proje alanının basitleştirilmiş kavramsal hidrojeolojik kesiti

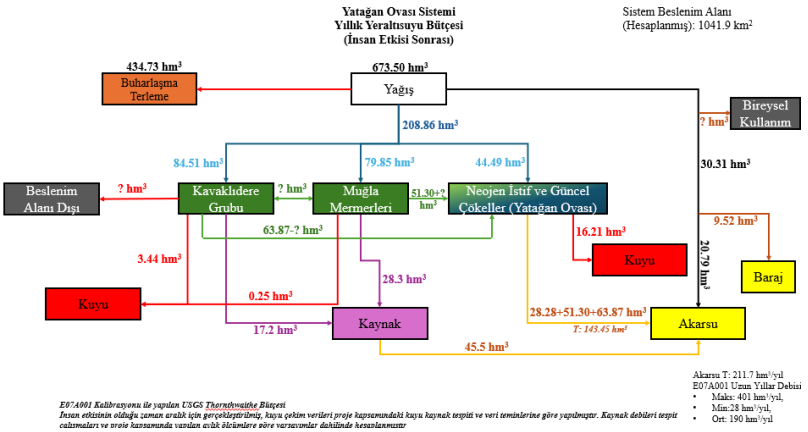
3.2 İzotop, Su Kalitesi ve Kaynak Dinamiği

İzotop sonuçları, çoğu su noktasında 650-900 m ve üzerindeki yükseltilerden beslenime işaret etmektedir; Dipsiz sistemi yaklaşık 850-900 m, Pınarbaşı sistemi yaklaşık 800-850 m kotlarındaki beslenim bölgeleriyle ilişkilendirilmiştir. Trityum, derin kuyularda daha yaşlı-uzun dolaşımlı, yüksek kotlu kaynaklarda güncel beslenim etkisini göstermektedir. Su kalitesinde bölgesel değil, mangan, sülfat, nitrat ve iz elementler bakımından tarım, sanayi ve madencilikle ilişkilendirilebilecek yerel baskılar belirlenmiştir.

3.3 Bütçe, Model ve Gelecek Senaryoları

Toplam beslenimin (208,86 hm³/yıl) yaklaşık 165 hm³/yılı Kavaklıdere Grubu ve Muğla Mermerleri, yaklaşık 45 hm³/yılı Neojen istif ve alüvyonla ilişkili alanlardan sağlanmaktadır. Bu değer doğrudan tahsis edilebilir rezerv değildir, kaynak boşalımları, akarsu baz akımı ve derin dolaşımı da desteklemektedir (Şekil 4).

En olumsuz senaryoda (MUSKİ çekimleri 2 kat, yıllık %5 artış, beslenimde %50 azalış) kalan bileşen 2035'te 1-2 hm³/yıla inmektedir (Tablo 2); en kritik risk yalnızca talep artışı değil, beslenim azalmasıyla talep artışının aynı dönemde birleşmesidir.



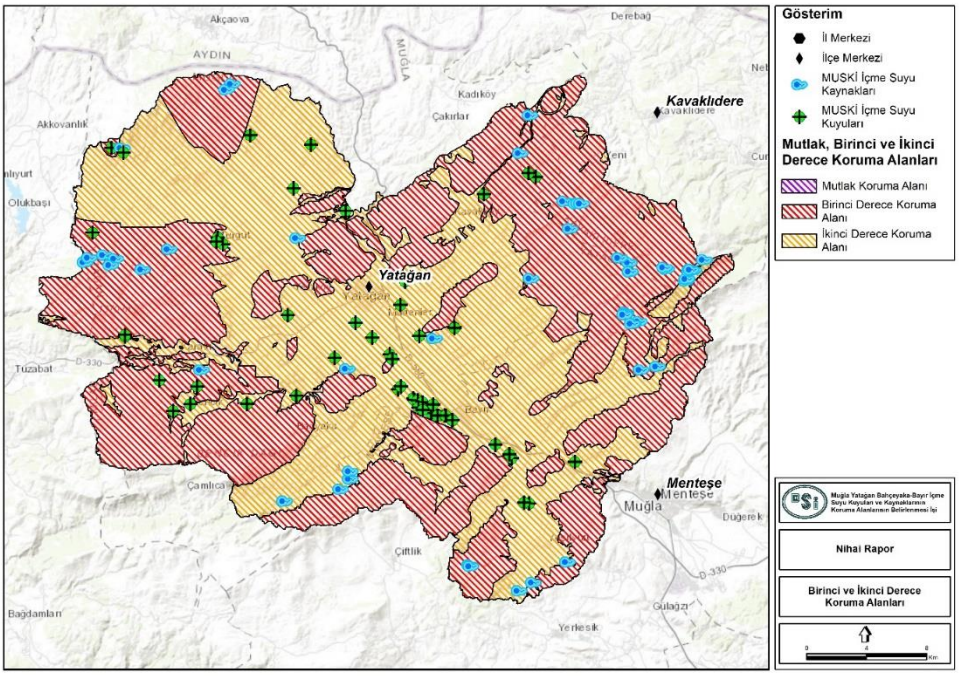
Şekil 4. İnsan etkisi sonrası yeraltısuyu bütçesinin kavramsal gösterimi

Tablo 2. Yönetici özetinde öne çıkan 2030-2035 senaryo sonuçları

Senaryo	2030 (hm³/yıl)	2035 (hm³/yıl)
Ana senaryo: çekimler yılda %2 artış	~35	~30
En olumsuz: MUSKİ 2 kat + %5 artış + beslenim %50 azalış	~10-15	~1-2

3.4 Koruma Alanları ve Hassasiyet

Neojen istifteki MUSKİ kuyuları için 50 günlük geçiş süresi esas alınarak geriye doğru partikül izleme yapılmıştır. Kuyu merkezinden 50 m yarıçap mutlak, 50 günlük güzergahları kapsayan zarf birinci derece, sistemi ve bütçe alanını temsil eden geniş çevre ise ikinci derece koruma yaklaşımının teknik altlığıdır. Karstik ve kırıklı birimlerde sürekli ortam modeli tek başına yeterli görülmediğinden DRASTIC ve EPIK yöntemleri birlikte kullanılmıştır [11,12]. DRASTIC sonucunda 388 km² birinci derece, 164 km² ikinci derece ve 156 km² düşük hassasiyet; EPIK sonucunda sırasıyla 542 km², 147 km² ve 21 km² alan belirlenmiştir. Her hücre için daha yüksek hassasiyet sınıfı seçilerek 547 km² birinci derece, 124 km² ikinci derece, 16 km² düşük hassasiyet alanı tanımlanmıştır. Nihai sınırlar; nümerik model, partikül izleme, boya deneyleri, izotop beslenim kotları, bütçe ve kavramsal akım güzergahlarının ortak değerlendirmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Hassasiyet analizi ve nümerik modelleme sonucu belirlenen nihai koruma alanları

4. Sonuçlar

Çalışma, Yatağan çevresindeki içme suyu kaynaklarının bağımsız noktalar değil, yüksek kotlu karstik beslenim alanları, ova altındaki mermer devamlılığı, Neojen akiferler, faylar, kaynaklar ve akarsular arasında bağlantı bulunan bütünleşik bir sistemin parçaları olduğunu; Bahçeyaka-Bayır kuyularının korunmasında ova kenarı ve yüksek kotlu karstik beslenim alanlarının da dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Hidrolojik ve kemograf kayıtları sistemin iklim değişkenliğine duyarlı olduğunu göstermiştir; 2025 kuraklığında kaynak debileri azalmış, Pınarbaşı kaynağı kurumuş, 2026 başındaki yağışlarla hızlı toparlanmıştır. Kaynakların yağışa tepkisi doğrudan yüzey suyu girişinden çok rezervuar suyunun hidrolik itilmesi ve karışımıyla açıklanmıştır.

Hidrojeokimyasal ve izotop sonuçları suların Ca-HCO3 karakterinde ve meteorik kökenli, ana beslenimin 650-900 m üzerindeki kotlardan sağlandığını; yerel mangan, sülfat, nitrat ve iz element aşımının bölgesel değil yerel antropojenik baskılara işaret ettiğini göstermiştir. Akifer testleri ve boya deneyleri, Dipsiz'de hızların yaklaşık 44-1.900 m/gün arasında değişmesiyle karstik sistemin yüksek heterojenitesini doğrudan göstermiştir.

Nümerik model, mevcut koşullarda büyük ölçekli bir miktar sorunu göstermemekle birlikte, çekim artışı ile beslenim azalmasının aynı dönemde gerçekleşmesi halinde güvenlik payının hızla daraldığını; en olumsuz senaryoda 2035 için kalan bileşenin 1-2 hm³/yıl düzeyine inebileceğini ortaya koymuştur.

Koruma alanları tek bir yönteme göre değil; Neojen istifte nümerik model ve 50 günlük partikül izleme, karstik alanlarda DRASTIC-EPIK hassasiyet analizi, boya deneyleri, izotop beslenim kotları, bütçe ve kavramsal akım güzergahlarının birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmiş; nihai sınıflamada 547 km² birinci derece, 124 km² ikinci derece ve 16 km² düşük hassasiyet alanı tanımlanmıştır.

5. Kaynaklar

[1] Maillet, E. (1905). Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Paris: A. Hermann, 218 p.

[2] Worthington, S. (1991). Karst Hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains. Hamilton, Ontario: McMaster University.

[3] Clark, I. (2015). Groundwater Geochemistry and Isotopes.

[4] Cook, P. (2020). Introduction to Isotopes and Environmental Tracers as Indicators of Groundwater Flow. Ontario: Groundwater Project.

[5] Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38(1), 55-94.

[6] USGS. (2020). A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1088, 6 p.

[7] Harbaugh, A. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (Vol. 6). Reston, VA, USA: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

[8] ASTM International. (2013). Standard Guide for Documenting a Groundwater Flow Model Application, ASTM-D5718-13.

[9] USGS. (2025a). MODFLOW 6: USGS Modular Hydrologic Model.

[10] USGS. (2025b). ModelMuse: A Graphical User Interface for Groundwater Models.

[11] Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Ada, Oklahoma: U.S. Environmental Protection Agency.

[12] Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1998). Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK). Bern: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL).

Konya Kapalı Havzası'nda Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Bitki Su Tüketimi Esas Alınarak Yeraltısuyu Fiili Çekimlerinin ve Çekim Lokasyonlarının Belirlenmesi

İsmail SEVİM
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
ismailsevim@dsi.gov.tr

Mine TOLUN
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
minetolun@dsi.gov.tr

Nezih Burak AKAR
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
nezihburakakar@dsi.gov.tr

Nevin AĞAÇLIOĞLU*
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
nevina@dsi.gov.tr

Nuriye AYDIN
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
nuaydin@dsi.gov.tr

Banu Çiçek TOKGÖZ
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
banucicektokgoz@dsi.gov.tr

Emre TUNALI
Agrovisio Tarım Bilişim Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, 1308. Sokak, ODTÜ Teknokent No:6, Ankara
emre@agrovis.io

Rasim Caner ÇALIK
Agrovisio Tarım Bilişim Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, 1308. Sokak, ODTÜ Teknokent No:6, Ankara
caner@agrovis.io

Sinan ÖZ
Agrovisio Tarım Bilişim Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, 1308. Sokak, ODTÜ Teknokent No:6, Ankara
sinan@agrovis.io

Elçin KENTEL ERDOĞAN
ODTÜ İnşaat Müh. Su Kaynakları Lab. K4 Binası No:103 Üniversiteler Mahallesi 06800 Ankara
ekentel@metu.edu.tr

Anahtar Kelimeler*:* uzaktan algılama, ürün deseni, dinamik bitki katsayısı, yeraltısuyu çekimi, kuyu lokasyon

1. Amaç

Konya Kapalı Havzası'nda tarımsal sulama, yeraltısuyu kaynakları üzerindeki baskının önemli bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Havza ölçeğinde sürdürülebilir yeraltısuyu yönetimi için yalnızca kayıtlı kuyu ve tahsis bilgilerinin değil, fiili tarımsal su kullanımının da mekânsal ve zamansal olarak ortaya konulması gerekmektedir. Bu kapsamda uzaktan algılama verileri, geniş alanlarda ürün deseni, sulanan alanlar ve bitki su tüketiminin düzenli olarak izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, ürünlerin gerçek fenolojik gelişimlerinin dikkate alınması ve farklı parsellerdeki ekim, gelişim ve hasat dönemlerinin su tüketimi hesaplarına yansıtılması, parsel bazında daha gerçekçi su kullanım tahminleri açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle, çok zamanlı uzaktan algılama verilerinin dinamik bitki

katsayısı yaklaşımıyla birlikte kullanılması, tarımsal su kullanımının mekânsal ve zamansal değişkenliğinin ortaya konulması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu sayede, parsel bazlı bitki türü ve gelişimi için kullanılan su miktarı tespit edilerek, yeraltısuyu çekimi ve çekim lokasyonları belirlenebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Konya Kapalı Havzası'nda çok zamanlı uzaktan algılama ve yardımcı mekânsal veriler kullanılarak ürün deseninin ve sulanan tarım alanlarının belirlenmesi, parsel bazında bitki su tüketiminin izlenmesi ve tarımsal sulamaya bağlı fiili su kullanımının tespit edilmesidir. Çalışmanın özgün yönünü, bitki su tüketiminin belirlenmesinde sabit bitki katsayıları yerine, her parselin uzaktan algılama verilerinden belirlenen fenolojik gelişimine bağlı olarak zamansal olarak güncellenen dinamik bitki katsayılarının kullanılması ve elde edilen sulama suyu ihtiyacının yeraltısuyu kullanımı ile ilişkilendirilmesi oluşturmaktadır [1, 8-10]. Ayrıca yüksek çözünürlüklü görüntülerden belirlenen olası kuyu yerlerinin mevcut kuyu envanteri, sulanan parseller ve enerji altyapısı verileriyle birlikte değerlendirilmesiyle fiili yeraltısuyu çekimlerinin gerçekleştirildiği alanların belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylece tarımsal su kullanımının parsel ve havza ölçeğinde ortaya konulması ve elde edilen sonuçların yeraltısuyu izleme, planlama ve denetim süreçlerinde kullanılabilecek bir karar destek altyapısına dönüştürülmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı ve Veri Setleri

Çalışma, Türkiye yüzölçümünün yaklaşık %7'sini kapsayan Konya Kapalı Havzası'nda 2021–2025 dönemi için gerçekleştirilmiştir. Havzanın yarı kurak iklim özellikleri, sınırlı yağış koşulları ve tarımsal sulamanın yaygınlığı, bitki su tüketimi ve yeraltısuyu kullanımı arasındaki ilişkinin geniş alanlarda izlenmesini gerekli kılmaktadır.

Analizlerde Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat ve MODIS zaman serileri ile seçili alanlara ait yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, ortofotolar ve dron görüntüleri kullanılmıştır. Bu verilere ek olarak Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından sağlanan havza ve alt havza sınırları, tarım parselleri, Çiftçi Kayıt Sistemi (ÇKS) verileri, kuyu envanterleri, yeraltı ve yerüstü sulama sahaları, elektrik abonelik ve trafo konumları ile meteorolojik veriler çalışmaya dâhil edilmiştir.

Yağışın zamansal ve mekânsal dağılımının belirlenmesinde kurumsal meteorolojik ölçümlerin yanı sıra CHIRPS yağış verilerinden ve sanal meteoroloji istasyonlarından yararlanılmıştır. Farklı veri kaynakları, parsel bazındaki analizlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla ortak koordinat sistemi ve ortak zamansal yapı içerisinde bütünleştirilmiştir.

2.2 Ön İşleme ve Ürün Deseninin Belirlenmesi

Uydu görüntülerine ortorektifikasyon, geometrik ve radyometrik düzeltme işlemleri uygulanmış; bulut, bulut gölgesi ve karla kaplı pikseller otomatik olarak analiz dışında bırakılmıştır. Farklı sensörlerden elde edilen görüntüler ortak koordinat sistemine dönüştürülerek üretim sezonlarını kapsayan zaman serileri oluşturulmuştur.

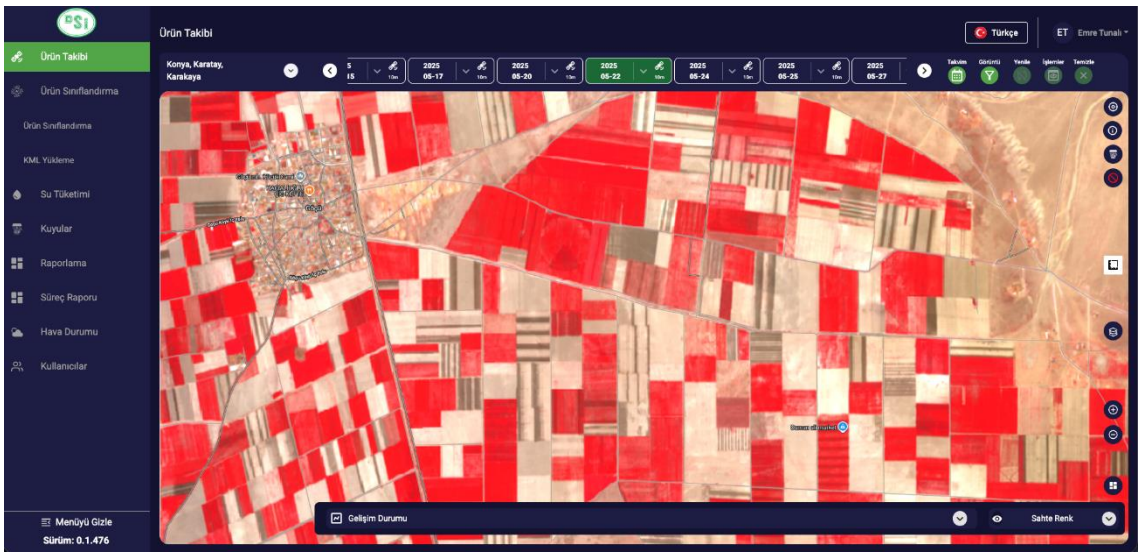
Her parsel için görünür, yakın kızılötesi, kırmızı kenar ve kısa dalga kızılötesi bantların yanı sıra NDVI, NDMI ve SAVI göstergeleri ile fenolojik gelişim ölçütleri hesaplanmıştır. Ürün deseninin belirlenmesinde tek tarihli görüntüler yerine yeşillenme başlangıcı, hızlı ve bitkisel gelişim, en yüksek biyokütle, olgunlaşma ve hasat dönemlerini temsil eden çok zamanlı fenolojik imzalar kullanılmıştır.

Ana sınıflandırma modeli olarak CatBoost algoritması uygulanmış; Random Forest ve zamansal derin öğrenme yöntemleri karşılaştırmalı değerlendirmelerde kullanılmıştır. Piksel tabanlı sınıflandırma sonuçları kadastral parsel sınırlarıyla ilişkilendirilmiş ve her parsel için baskın ürün sınıfı belirlenmiştir. Sınıflandırma sonuçlarının doğruluğu referans veriler kullanılarak değerlendirilmiş ve sınıflar bazında doğruluk değerleri hesaplanmıştır.

2.3 Sulanan Alanların ve Fiili Yeraltısuyu Çekim Miktarının Belirlenmesi

Sulanan alanların belirlenmesinde parsel bazlı bitki gelişimi, yüzey nemliliği ve yağış zaman serileri birlikte değerlendirilmiştir. Sentinel-1 verileri yüzey nemliliğinin, Sentinel-2 ve Landsat görüntüleri ise bitki gelişimi, yüzey sıcaklığı ve nemlilik değişimlerinin izlenmesinde kullanılmıştır.

Yağışsız veya sınırlı yağışlı dönemlerde bitki gelişimini sürdüren, tekrarlayan nemlilik artışları gösteren ve ürün fenolojisiyle uyumlu sulanan alan olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 1). Uydu gözlemlerinin meteorolojik verilerle birlikte değerlendirilmesiyle yağış kaynaklı geçici nemlilik ile sulama kaynaklı düzenli nemlilik davranışları ayrıştırılmıştır. Yağmurlama sulamaya bağlı çizgisel ve bantlı nemlilik desenleri de sulama tespitini destekleyen mekânsal göstergeler olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Yağmurlama sulama uygulamaları sonucu ortaya çıkan düzenli çizgisel ve bantlı yapılar

Referans evapotranspirasyonun (ET_0) hesaplanmasında FAO-56 Penman–Monteith, Blaney–Criddle, Makkink, Priestley–Taylor, Jensen–Haise, Hargreaves–Samani ve Turc yöntemleri aynı dönem ve meteorolojik veriler kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yöntemler; veri gereksinimleri, eksik verilere duyarlılıkları, zamansal tutarlılıkları ve havza koşullarındaki performansları bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Veri bütünlüğünün sağlandığı alanlarda FAO-56 Penman–Monteith yöntemi ana referans olarak kullanılmış; diğer yöntemlerden sonuçların tutarlılığının değerlendirilmesinde ve meteorolojik veri kısıtlılığı bulunan alanlarda yararlanılmıştır. FAO-56 Penman–Monteith yöntemi Allen vd. [1] tarafından, diğer yöntemler ise Blaney ve Criddle [2], Makkink [3], Priestley ve Taylor [4], Jensen ve Haise [5], Hargreaves ve Samani [6] ile Turc [7] tarafından ortaya konulan yaklaşımlara dayanmaktadır.

Çalışmanın temel metodolojik bileşenlerinden biri, uzaktan algılama verilerine dayalı dinamik bitki katsayısı yaklaşımıdır. Geleneksel sabit veya gelişme dönemlerine göre önceden tanımlanmış dinamik bitki katsayısı (Kc) değerleri yerine, her parselin çok zamanlı uydu verilerinden elde edilen fenolojik gelişim eğrisi kullanılmıştır. Yeşillenme başlangıcı, gelişim hızı, maksimum biyokütle dönemi, olgunlaşma ve hasat tarihleri parsel bazında belirlenmiş ve Kc değerleri bitkinin gelişimine bağlı olarak günlük zaman adımında güncellenmiştir.

Bu yöntem sayesinde aynı ürünün farklı parsellerindeki ekim zamanı, gelişim süresi, hasat tarihi ve yetiştirme koşullarından kaynaklanan değişkenlik hesaplamalara yansıtılmıştır. FAO-56 standart Kc eğrileri karşılaştırma amacıyla kullanılırken, fiili bitki su tüketiminin hesaplanmasında uzaktan algılama destekli dinamik Kc değerleri esas alınmıştır (Şekil 2).

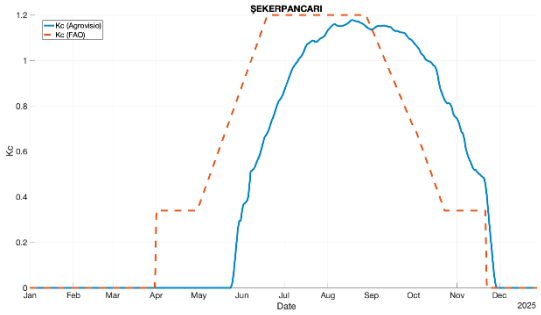
Bitki su tüketimi, referans evapotranspirasyon ile parsel bazında belirlenen dinamik bitki katsayısının birlikte değerlendirilmesiyle hesaplanmıştır:

$$ET_c = ET_0 \times K_{c,din} \quad (1)$$

Burada ETc bitki su tüketimini, Kc parsel bazında belirlenen dinamik bitki katsayısını ve ET_0 referans evapotranspirasyonu ifade etmektedir. Sulama ile karşılanması gereken su ihtiyacı ise etkin yağış dikkate alınarak aşağıdaki eşitliği ile belirlenmiştir.

$$SSİ = max(ET_c - P_{eff}, 0) \quad (2)$$

Burada SSİ sulama suyu ihtiyacını, P_{eff} ise etkin yağışı ifade etmektedir.



Şekil 2. Şeker pancarı için üretilen dinamik K_c eğrisi ile standart FAO K_c eğrisinin karşılaştırılması

Burada ET_c bitki su tüketimini, $K_{c,din}$ parsel bazında türetilen dinamik bitki katsayısını, P_{eff} etkin yağışı ve SSİ sulamayla karşılanması gereken su ihtiyacını ifade etmektedir. Etkin yağış hesabında USBR yöntemi esas alınmış; USDA–SCS ve FAO sabit yüzde yöntemleri karşılaştırmalı kontrol amacıyla değerlendirilmiştir. Günlük sonuçlar üretim sezonu boyunca birleştirilmiş ve parsel alanıyla ilişkilendirilerek hacimsel fiili su çekimi tahminleri oluşturulmuştur.

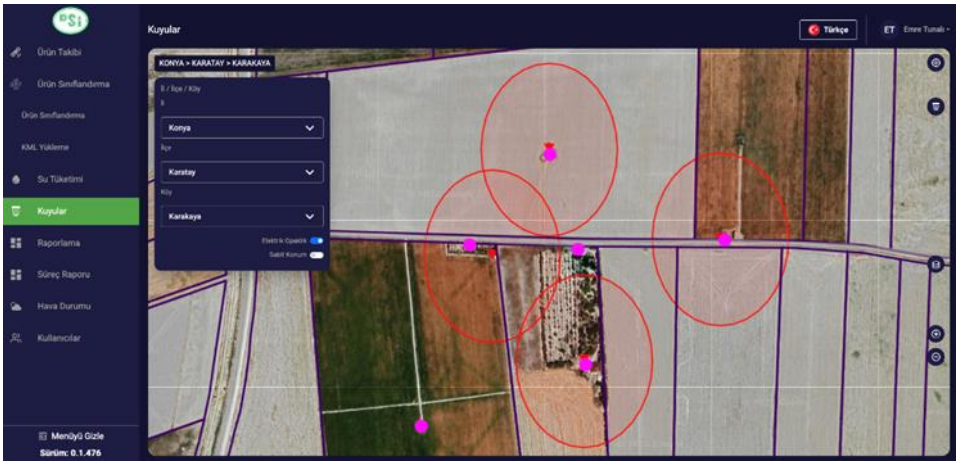
Sulama suyu ihtiyacının yeraltısuyu kaynaklı bölümünün belirlenmesinde sulanan parseller, mevcut kuyu envanteri, kuyu yerleri, sulama sahaları ve enerji altyapısı birlikte değerlendirilmiştir. Böylece bitki su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacı ile yeraltısuyu kullanımının mekânsal olarak ilişkilendirilmesi sağlanmıştır.

2.4 Zirai Tüketimde Kullanılan Fiili Yeraltısuyu Çekimlerinin Yapıldığı Kuyuların Tespiti

Kuyu tespitinde yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve ortofotolar yapay zekâ destekli görüntü analizleriyle incelenmiştir. Görüntülerden belirlenen olası kuyu noktaları; sulanan parseller, mevcut kuyu envanteri, elektrik abonelikleri ve trafo konumları ile birlikte Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında değerlendirilmiştir.

Belirlenen her kuyu noktası çevresinde 30 m yarıçaplı tampon bölge oluşturulmuş ve bu alan içerisinde kayıtlı bir kuyu bulunup bulunmadığı kontrol edilmiştir. Mevcut kuyu envanteriyle eşleşmeyen noktalar “olası kayıt dışı kuyu” olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3).

Olası kuyu noktalarının sulama yapılan parsellerle ilişkilendirilmesi amacıyla kuyu noktaları çevresinde 200 m yarıçaplı yakınlık analizi uygulanmıştır. Bu mesafe içerisinde bulunan ve uydu verileriyle sulandığı belirlenen parseller, ilgili kuyu ile ilişkili olabilecek sulama alanları olarak değerlendirilmiştir. Kuyu tespit sonuçları enerji altyapısı, sulama sahaları ve mevcut kayıtlarla birlikte değerlendirilerek saha doğrulaması gerektiren alanlar belirlenmiştir.



Şekil 3. Konya / Karatay ilçesi özelinde tespit edilen örnek kuyu sonuçları

2.5 Web Tabanlı CBS Platformu

Çalışma kapsamında üretilen ürün deseni, sulanan alan, fiili yeraltısuyu çekimi ve kuyu tespit sonuçlarının görüntülenmesi, sorgulanması ve karşılaştırılması amacıyla web tabanlı bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) platformu geliştirilmiştir (Şekil 4). Platform, parsel bazlı analiz sonuçlarını uydu görüntüleri, kadastral sınırlar, ürün bilgileri, meteorolojik veriler ve kuyu katmanlarıyla aynı ortamda bütünleştirmektedir.

Su tüketimi modülünde kullanıcılar analiz yılını ve ayını seçebilmekte, hesaplanan değerleri parsel bazında harita üzerinde görüntüleyebilmekte ve seçilen parsele ait zamansal değişimi grafikler üzerinden inceleyebilmektedir. Platform ayrıca FAO-56 Penman–Monteith, Blaney–Criddle, Makkink, Priestley–Taylor, Jensen Haise, Hargreaves ve Turc yöntemleri arasında geçiş yapılmasına olanak sağlayarak ET_0 hesaplarının ve buna bağlı su tüketimi sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece yöntemler arasındaki farklılıklar, belirsizlikler ve havza koşullarına duyarlılık doğrudan arayüz üzerinden analiz edilebilmektedir.

Platformdaki ürün takibi, ürün sınıflandırma, su tüketimi, kuyular ve raporlama modülleri aracılığıyla sonuçlar parselden havza ölçeğine kadar farklı düzeylerde sorgulanabilmektedir. Katmanların açılıp kapatılması, seçilen parsellerin ayrıntılı incelenmesi, zamansal grafiklerin görüntülenmesi ve sonuçların dışa aktarılması sayesinde platform, yalnızca bir görselleştirme aracı olarak değil, DSİ'nin izleme, denetim ve planlama faaliyetlerini destekleyen operasyonel bir karar destek sistemi olarak uygulamaya aktarılmıştır.



Şekil 4. Geliştirilen web tabanlı CBS platformunun parsel bazlı yeraltısuyu tüketimi görüntüleme ve yöntem karşılaştırma arayüzü

3. Değerlendirme

Çok zamanlı uydu görüntüleri ve fenolojik özelliklerin birlikte kullanılması, tek tarihli görüntülerde benzer spektral özellik gösteren ürünlerin ayrıştırılmasını iyileştirmiştir. Ürün sınıflandırmasında incelenen bütün sınıflarda doğruluk %91'in üzerinde gerçekleşmiştir. Özellikle şeker pancarı, mısır, patates ve ayçiçeği sınıflarında sırasıyla %96,45, %95,65, %95,20 ve %94,06 doğruluk elde edilmiştir. Hububat, nohut ve mercimek gibi erken gelişim dönemlerinde aynı dalga boyu özelliğini gösteren ürünlerde dahi doğruluk oranlarının %91–92 aralığında kalması, çok zamanlı fenolojik bilgilerin ürün ayrımındaki katkısını ortaya koymuştur.

Yağmurlama sulamaya bağlı çizgisel ve bantlı nemlilik desenlerinin zaman içerisindeki devamlılığı da sulama faaliyetlerinin belirlenmesini desteklemiştir.

Çalışmanın temel bileşenlerinden biri, bitki su tüketiminin parsel bazında belirlenen dinamik Kc değerleri kullanılarak hesaplanmasıdır. Uydu görüntülerinden belirlenen gerçek fenolojik gelişim eğrilerinin hesaplamalara dâhil edilmesiyle aynı ürünün farklı parsellerindeki ekim, gelişim ve hasat tarihlerine bağlı değişkenlik dikkate alınmıştır. Böylece sabit Kc değerlerine dayalı hesaplamalara göre parsel bazındaki üretim koşullarının su tüketimine etkisinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulması sağlanmıştır. Uzaktan algılama tabanlı dinamik Kc kullanımının bitki gelişimindeki mekânsal değişkenliği sulama suyu hesaplarına yansıtabilmesi, farklı bölgelerde gerçekleştirilen güncel çalışmalarla da uyumludur.

Çalışma kapsamında bitki su tüketimi, sulama suyu ihtiyacı ve yeraltısuyu çekimi birbirinden ayrı bileşenler olarak değerlendirilmiş; sulama ihtiyacının yeraltısuyu kaynaklı bölümü kuyu ve parsel ilişkileri üzerinden belirlenmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca toplam sulama alanının veya toplam su ihtiyacının belirlenmesinden farklı olarak, fiili yeraltısuyu kullanımının mekânsal dağılımının da ortaya konulmasını sağlamıştır. Dastane [8], USDA–SCS [9] ve Brouwer ve Heibloem [10] tarafından açıklanan etkili yağış ve sulama suyu ihtiyacı yaklaşımları bu aşamada temel alınmıştır.

Yüksek çözünürlüklü görüntülerden belirlenen olası kuyu noktalarının mevcut kuyu envanteri, sulanan parseller ve enerji altyapısıyla birlikte değerlendirilmesi, saha incelemesi gerektiren alanların önceliklendirilmesine olanak vermiştir. Kayıtlı kuyu verileriyle eşleşmeyen aday noktaların doğrudan kesin kayıt dışı kuyu olarak değerlendirilmesi yerine, “olası kayıt dışı kuyu” olarak sınıflandırılması ve saha doğrulamasına tabi tutulması, uzaktan algılama tabanlı tespitlerin belirsizliklerinin dikkate alınması açısından önemlidir.

Elde edilen sonuçların web tabanlı CBS platformunda bütünleştirilmesi, ürün deseni, sulanan alan, bitki su tüketimi, fiili yeraltısuyu çekimi ve kuyu tespit sonuçlarının aynı mekânsal ortamda birlikte değerlendirilmesini sağlamıştır. Böylece farklı ET_0 yöntemlerinin karşılaştırılması, parsel bazlı su tüketimi bilgilerinin incelenmesi, kuyu ve sulanan alan ilişkilerinin değerlendirilmesi ve tahsis-kullanım farklılıklarının belirlenmesi mümkün hâle gelmiştir.

Çalışmanın başlıca sınırlılığı, uzaktan algılama verilerinden elde edilen her bir bileşenin kendi belirsizliğine sahip olmasıdır. Ürün sınıflandırma doğruluğu, sulama tespiti, dinamik Kc belirlenmesi, ET_0 ve bitki su tüketimi hesapları ile kuyu tespit sonuçları birbirinden bağımsız doğrulama gerektiren bileşenlerdir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, doğrudan saha ölçümü yerine çoklu uzaktan algılama ve yardımcı veri kaynaklarının birlikte değerlendirilmesine dayalı mekânsal tahminler olarak ele alınmalıdır. Özellikle olası kayıt dışı kuyu olarak belirlenen noktaların nihai değerlendirmesinde saha doğrulamasının yapılması önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma ile Konya Kapalı Havzası'nda ürün deseni, sulanan tarım alanları, bitki su tüketimi, tarımsal sulama suyu ihtiyacı ve fiili yeraltısuyu çekimleri parsel bazında ve bütünleşik bir uzaktan algılama yaklaşımıyla belirlenmiştir.

Çok zamanlı uydu görüntülerinden elde edilen fenolojik bilgiler kullanılarak gerçekleştirilen ürün sınıflandırmasında bütün sınıflarda doğruluk %91'in üzerinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, çok zamanlı fenolojik bilgilerin geniş alanlarda ürün deseninin belirlenmesinde etkin biçimde kullanılabileceğini göstermiştir.

Sulanan alanların belirlenmesinde bitki gelişimi, yüzey nemliliği ve yağış zaman serilerinin birlikte kullanılması, yağış kaynaklı nemlilik ile sulama kaynaklı nemlilik davranışlarının ayrıştırılmasına olanak sağlamıştır. Özellikle yağışsız dönemlerde devam eden bitki gelişimi ve tekrarlayan nemlilik değişimleri sulanan parsellerin belirlenmesinde önemli göstergeler oluşturmuştur.

Çalışmada, bitki su tüketiminin parsel bazında dinamik Kc değerleri kullanılarak hesaplanmasıdır. Uydu verilerinden belirlenen fenolojik gelişim özelliklerinin günlük Kc değerlerine dönüştürülmesiyle zamansal ve mekânsal değişkenliğin daha ayrıntılı biçimde dikkate alınması sağlanmıştır.

Farklı ET_0 yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, meteorolojik veri yeterliliğinin ve yöntem seçiminin bitki su tüketimi hesaplarına etkisinin incelenmesine olanak sağlamıştır. FAO-56 Penman–Monteith yöntemi veri bütünlüğünün sağlandığı koşullarda ana referans olarak kullanılırken, diğer yöntemler karşılaştırma ve veri kısıtlılığı bulunan alanlarda alternatif hesaplama yaklaşımı olarak değerlendirilmiştir.
Sulama suyu ihtiyacının parsel bazında hesaplanması ve sulama kaynağına ilişkin verilerle birlikte değerlendirilmesi sonucunda, zirai tüketimde kullanılan fiili yeraltısuyu çekimlerinin mekânsal olarak belirlenmesine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece yeraltısuyu kullanımının yalnızca kayıtlı kuyu ve tahsis verileri üzerinden değil, fiili tarımsal faaliyetler ve uzaktan algılama gözlemleri üzerinden de değerlendirilmesine olanak sağlanmıştır.

Olası kuyu noktaları yüksek çözünürlüklü görüntüler aracılığı ile belirlenmiş olup, mevcut kuyu envanteri, sulanan parseller ve enerji altyapısıyla birlikte değerlendirilmesi, saha denetimi gerektiren alanların önceden belirlenmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, geniş bir havza alanında tüm noktaların doğrudan saha çalışmasıyla incelenmesi yerine, öncelikli inceleme alanlarının uzaktan algılama ve CBS tabanlı analizlerle belirlenmesine katkı sunmaktadır.

Çalışmada ayrıca, kayıtlı kuyularla sulanan parsellerdeki fiili kullanımın tahsis miktarlarıyla karşılaştırılmasına olanak sağlayan bir değerlendirme altyapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, havzadaki yeraltısuyu kullanımının yalnızca kayıt dışı kuyularla sınırlı olmadığını, kayıtlı kuyularla gerçekleştirilen sulamalarda da tahsis-kullanım farklılıklarının bulunabileceğini ortaya koymuştur.

Çalışma kapsamında geliştirilen web tabanlı CBS platformu ile ürün deseni, sulanan alanlar, bitki su tüketimi, fiili yeraltısuyu çekimleri, kuyu yerleri ve tahsis-kullanım karşılaştırmaları aynı ortamda görüntülenebilir ve sorgulanabilir hâle getirilmiştir. Bu yönüyle geliştirilen yaklaşım, geniş alanlarda düzenli olarak güncellenebilen ve DSİ'nin yeraltısuyu izleme, planlama ve denetim çalışmalarında karar desteği sağlayabilecek bir uygulama altyapısı sunmaktadır.

Geliştirilen yöntemin farklı yıllara ait uydu görüntüleri ve güncellenen yardımcı verilerle tekrarlanabilmesi, havza genelindeki tarımsal su kullanımının zamansal değişiminin izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, özellikle olası kayıt dışı kuyu tespitleri ve fiili yeraltısuyu çekimlerinin kesinleştirilmesinde saha doğrulamalarının sürdürülmesi, yöntemin doğruluğunun artırılması açısından önem taşımaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

[2] Blaney, H. F., Criddle, W. D. (1950). Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. Technical Paper No. 96, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.

[3] Makkink, G. F. (1957). Ekzameno de la formulo de Penman. Netherlands Journal of Agricultural Science, 5(4), 290–305. DOI: 10.18174/njas.v5i4.17731.

[4] Priestley, C. H. B., Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100(2), 81–92. DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.

[5] Jensen, M. E., Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89(IR4), 15–41. DOI: 10.1061/JRCEA4.0000287.

[6] Hargreaves, G. H., Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96–99. DOI: 10.13031/2013.26773.

[7] Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle: formule climatique simplifiée et mise à jour. Annales Agronomiques, 12(1), 13–49.

[8] Dastane, N. G. (1978). Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 25, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

[9] United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA–SCS). (1970). Irrigation Water Requirements. Technical Release No. 21, revised edition, Engineering Division, Washington, DC.

[10] Brouwer, C., Heibloem, M. (1986). Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. Training Manual No. 3, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Türkiye'de Yeraltısuyu Aramaları: Hidrojeofiziksel DES Verilerinin Ters Çözümü ve Yorumlanması İçin Yazılım Geliştirilmesi

Aydın Özgür AKIN
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 0009-0003-0321-7539
aoakin@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* düşey elektrik sondaj (DES), 1B ters çözüm, yeraltısuyu aramaları, hidrojeofizik, açık kaynaklı yazılım, PyGIMLi, jeolojik entegrasyon

1. Amaç

Türkiye, coğrafi konumu ve jeolojik çeşitliliği sebebiyle oldukça karmaşık ve çok bileşenli hidrojeolojik sistemlere sahiptir. Özellikle karstik mermer ve kireçtaşı formasyonları, alüvyon çökelleri ve Neojen yaşlı kırıntılı seriler, ülkenin temel yeraltısuyu rezervuarlarını oluşturmaktadır. İklim değişikliği ve kuraklık periyotlarının sıklaşması, yüzey suyu kaynaklarının yetersiz kalmasına neden olmakta; bu durum, tarımsal sulamadan endüstriyel kullanıma ve içme suyu teminine kadar her alanda yeraltısuyu kaynaklarına olan bağımlılığı artırmaktadır. Bu bağlamda, akifer sistemlerinin üç boyutlu geometrilerinin, beslenim-boşalım ilişkilerinin ve yeraltı su seviyelerinin hassas bir şekilde haritalanması stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir.

Yeraltısuyu potansiyelinin belirlenmesinde sondajlı aramalardan önce jeofizik araştırmalar yapılması, zaman ve maliyet açısından büyük tasarruf sağlamaktadır. Bu araştırmalar içerisinde en yaygın, ekonomik ve uygulaması pratik olan yöntem Doğru Akım Özdirenç temelli Düşey Elektrik Sondajı (DES) tekniğidir. Akifer özelliği taşıyan gözenekli ve su doygun birimler ile geçirimsiz bariyer görevi gören birimler veya masif ana kayalar, özdirenç kontrastları sayesinde ayırt edilebilir. Ancak araziden elde edilen görünür özdirenç verilerinin ters çözüm süreci doğrusal olmayan karmaşık bir matematiksel problemdir. Mevcut ticari yazılımlar günümüz veri bilimi ve CBS entegrasyonu standartlarının gerisinde kalabilmekte ve yüksek lisans ücretleri nedeniyle erişimi kısıtlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı; DES verilerinin modern matematiksel algoritmalarla modellenmesi, analizi ve Türkiye'nin yerel jeolojik yapısıyla bütünleşik olarak yorumlanabilmesi için açık kaynak tabanlı bir yazılımın geliştirilmesidir. Fiziksel gerçekliğe uygun ve kararlı çalışan bir ters çözüm motorunu (PyGIMLi tabanlı), Türkiye'nin ulusal jeoloji veri tabanı (MTA) ve coğrafi koordinat sistemleriyle tam entegre çalışacak bir arayüzde birleştirmek hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Yazılım, esneklik ve açık kaynak ekosisteminin sunduğu geniş kütüphane desteği nedeniyle Python programlama dili kullanılarak tasarlanmıştır. Yazılımın modüler mimarisi; kullanıcı arayüzü, veri işleme ve kalite kontrol, ileri/ters çözüm motoru ve coğrafi entegrasyon modüllerinden oluşmaktadır.

2.1 Yazılım Mimarisi ve Kullanıcı Arayüzü

Arayüzü modern ve ölçeklenebilir bir tasarım dili sunan CustomTkinter ile inşa edilmiştir. Grafiksel çizimler ve etkileşimli paneller için Matplotlib kütüphanesinin nesne yönelimli API'si kullanılmış, yüksek çözünürlüklü çıktılar elde edilmesi sağlanmıştır. Olay güdümlü mimari sayesinde, grafikler üzerindeki kullanıcı etkileşimleri anlık olarak algılanmakta ve arka plandaki veri modelleri asenkron güncellenmektedir.

2.2 İleri (Forward) ve Ters Çözüm (Inversion) Altyapısı

Yazılımın matematiksel çekirdeğinde, jeofizik modelleme ve ters çözüm süreçleri için pyGIMLi kütüphanesi yer almaktadır [2]. İleri çözüm aşamasında, yatay tabakalı yeryüzü modeli için lineer filtreleme yöntemleri kullanılarak Schlumberger dizilimi tepkileri simüle edilir. Ters çözüm için ise En Küçük Kareler (LSQR) temelli, düzgünlük kısıtlamalı Occam ters çözüm prensipleri kullanılmaktadır [1]. Ters çözüm probleminin çözülebilmesi için minimize edilen amaç fonksiyonu Φ denklem 1'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_m \quad (1)$$

Burada Φ_d veri uyumsuzluğunu, Φ_m model düzgünlüğünü ve λ düzenlileştirme parametresini temsil etmektedir. Sayısal instabiliteyi önlemek amacıyla, hem veri uzayı hem de model uzayı logaritmik uzaya ($\log_{10}$) dönüştürülerek işlenmektedir.

2.3 Büküm Noktası Analizi ve Otomatik Başlangıç Modeli

Kullanıcı müdahalesini azaltmak için "Büküm Noktası Analizi" modülü içerir [4]. Görünür özdirenç (ρ_a) ve elektrot yarı açıklığı ($AB/2$) verileri log-log uzayına dönüştürülür ve ardışık noktalar arasında birinci türev hesaplanır (Denklem 2).

$$\frac{\Delta \log(\rho_a)}{\Delta \log(AB/2)} \quad (2)$$

Eğimler arasındaki farklar alınarak eğrilik değişimi bulunur. Eğrinin yön değiştirdiği büküm noktaları, litolojik sınır geçişleri olarak kabul edilir ve derinlik faktörü (yaklaşık 0,5) kullanılarak sınır derinlikleri hesaplanır. Algoritma bu yolla kalınlık modelini dinamik olarak yaratır.

2.4 İnteraktif Veri Kalite Kontrolü ve MN Düzeltmesi

Schlumberger diziliminde potansiyel elektrot (MN) açıklığının büyütüldüğü noktalarda oluşan kaymaları düzeltmek için otomatik "MN düzeltmesi" algoritması uygulanır. Aynı $AB/2$ açıklığına sahip okuma çiftleri arasındaki oran düzeltme katsayısı olarak belirlenir. Ayrıca "Sürüklenebilir Noktalar" modülü ile kullanıcılar eğri üzerindeki uç değerleri silebilir veya sürükleyerek manuel düzeltme yapabilir.

2.5 Logaritmik IDW ve Kriging Enterpolasyon ve 2B Kesit Oluşturma

Yeraltının jeolojik yapısını profiller boyunca anlamak için 1B ters çözüm sonuçları düzenli bir grid yapısı üzerine yansıtılır. Yüksek özdirençli yapıların yapay anomaliler oluşturmasını engellemek amacıyla logaritmik dönüşümü alınmış değerler üzerinden Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW) enterpolasyon kullanılır [3]: (Denklem 3).

$$\hat{V} = 10^{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \log_{10}(v_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right)} \quad (3)$$

Burada $w_i = \frac{1}{d_i^p}$ (genelde $p = 2{,}0$) olarak alınmaktadır.

Kriging yönteminde ise veriler arasındaki uzamsal ilişki (variogram modeli) dikkate alınarak daha optimum ağırlıklar hesaplanır. Bu logaritmik ve jeoistatistiksel yaklaşımlar, yüksek özdirençli masif yapıların komşu düşük özdirençli zonları domine ederek yapay (artifact) anomaliler oluşturmasını engeller ve hidrojeolojik geçişleri çok daha pürüzsüz ve gerçeğe yakın bir şekilde modeller.

2.6 Coğrafi ve Jeolojik Entegrasyon (MTA ve CBS Bağlantısı)

ED50 sisteminden WGS84 koordinatlara dönüşüm yapan yerleşik bir Molodensky dönüşüm motoru barındırır [6]. Elde edilen WGS84 koordinatları ile REST/WMS servisleri üzerinden MTA jeoloji haritaları [5] ve topoğrafik uydu görüntüleri doğrudan çalışma arayüzüne entegre edilir.

3. Değerlendirme

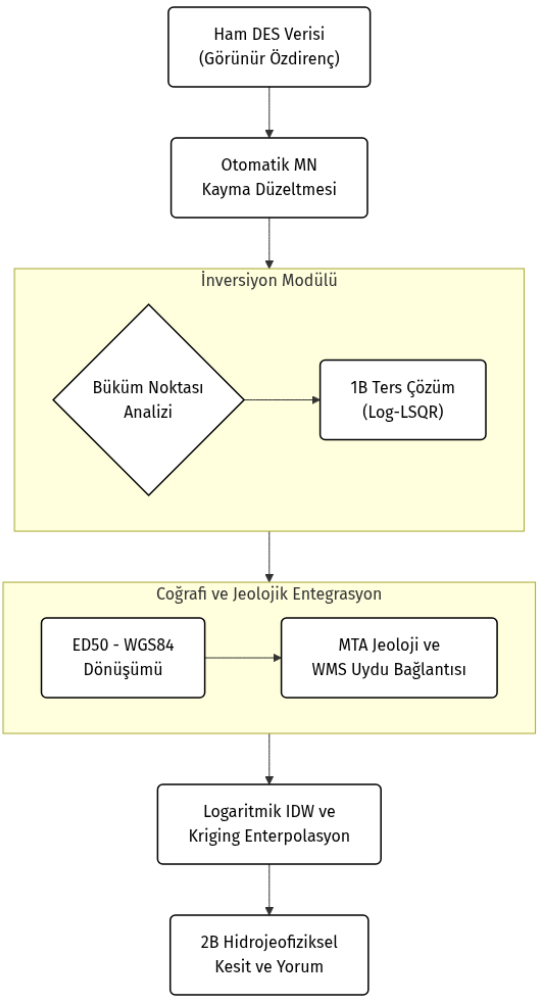
Yazılımının performansı, sentetik veriler ve karmaşık karstik ortamlardan elde edilen saha verileri üzerinde endüstri standardı yazılımlarla (Zond1D, IPI2Win) karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

3.1 Ters Çözüm Kararlılığı ve Doğruluk

Yapılan RMS hata analizlerinde, kısıtsız iteratif LSQR algoritmasının %2.5 - %4.5 hata bandında ve ortalama 4-6 iterasyonda sonuca ulaştığı gözlemlenmiştir. Büküm Noktası Analizi ile oluşturulan akıllı başlangıç modellerinin global minimuma yakınlığı sayesinde, özellikle 4 veya daha fazla tabakalı sondaj eğrilerinde ara tabaka kalınlıkları çok daha yüksek çözünürlükle tespit edilmiştir.

3.2 Yorumlama Pratikliği ve Jeolojik Tutarlılık

Jeoloji entegrasyonu paneli, yeraltısuyu potansiyeli yüksek alüvyon taban kotlarının ve kırıklı-karstik ana kayanın derinliğinin yorumlanmasında belirgin bir avantaj sağlamıştır. Değerlendirme kısmında örnek çalışma alanı olarak belirtilen karmaşık karstik ortamlara ait saha verileri, Dicle Havzası Yeraltısuyu Planlama (Hidrojeolojik Etüt) Raporu kapsamında alınan DES (Düşey Elektrik Sondaj) verileri ile detaylandırılmıştır. Geliştirilen yazılım üzerinden analiz edilen Hat-2 güzergahındaki (DES13 - DES20) verilerle; yüzeydeki alüvyon ve karstik yapıların yanı sıra, bölgenin temel stratigrafisini oluşturan Şelmo Formasyonu, Gercüş Formasyonu ve derinlerde yer alan yüksek dirençli Midyat Kireçtaşı birimlerinin sınırları modellenmiştir. Elde edilen özdirenç derinlik kesitleri, bölgedeki DSİ kuyu logları (Örn: 56060, 55021 ve 57721 nolu kuyular) ile başarılı bir şekilde korele edilmiştir. Klasik iş akışlarında farklı CBS platformlarına ihtiyaç duyulurken, jeofizik kesit, bölgesel tektonik hatlar ve litolojik sınırlar aynı ekranda eş zamanlı görünür hale gelerek sahaya ve DSİ normlarına uygun raporlama yapılmasını sağlamıştır.



Şekil 1. Açık kaynak kodlu hidrojeofiziksel modelleme yazılımının temel algoritma mimarisi ve işlem basamakları

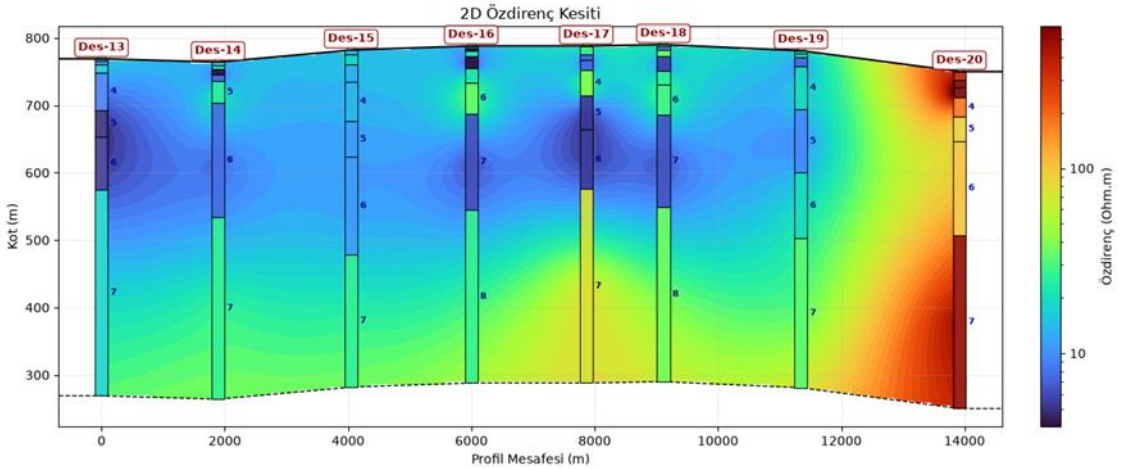
3.3 Kullanıcı Deneyimi ve Süre Optimizasyonu

Arazide toplanan ham verinin MN düzeltmelerinin otomatikleşmesi ve manuel gürültü temizleme aracının sürükle-bırak mantığıyla çalışması, veri işlem süresini yaklaşık %60 oranında azaltmıştır. Modern arayüz tasarımı, eğitim süreçlerini kısaltmış ve yazılımın verimliliğini artırmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'nin hidrojeolojik dinamikleri ve yeraltısuyu arama projelerinin ihtiyaçları göz önüne alınarak geliştirilen yazılım, yüksek kararlılıklı ters çözüm çekirdeği ile DES modelleme süreçlerinde hızlı ve düşük hata oranlı çözümler sunmuştur. "Logaritmik Uzayda Büküm Noktası Analizi"

sayesinde otomatik başlangıç modelleri üretilmiş, manuel kalınlık tahmini ihtiyacı ortadan kaldırılarak ters çözüm sonuçlarının objektifliği artırılmıştır.



Şekil 2. Dicle Havzası Yeraltısuyu Planlama (Hidrojeolojik Etüt) Hat-2 kriging enterpolasyonu ile oluşturulmuş 2B özdirenç kesiti

Yazılımın ED50-WGS84 koordinat dönüşümleri yapabilmesi ve MTA canlı jeoloji haritalarını doğrudan arayüz üzerinde eşleştirebilmesi, lokalizasyon belirleme aşamasındaki jeolojik tutarlılığı maksimize etmiştir. Ek olarak, logaritmik IDW ve Kriging enterpolasyonu tabanlı 2 boyutlu kesit oluşturma yeteneği ile bağımsız DES noktaları anlamlı hidrojeolojik profillere dönüştürülmüştür.

Yazılım, yüksek maliyetli ticari yazılımlara açık kaynaklı, yerli ve bütünleşik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Gelecek sürümler için; çok elektrotlu sistemlerden toplanan 2B ve 3B ERT verilerinin ters çözüm desteği, makine öğrenmesi algoritmalarıyla ters çözüm öncesi litoloji tahminlerinin otonomlaştırılması ve elde edilen parametrelerin nümerik yeraltısuyu akım modellerine (ör. MODFLOW) entegrasyonu hedeflenmektedir. Bu geliştirmeler, Türkiye'de su mühendisliği alanındaki dijitalleşme hedeflerine güçlü bir zemin sağlayacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam’s inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52(3), 289-300.

[2] Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. M. (2017). pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. Computers & Geosciences, 109, 106-123.

[3] Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference, 517-524.

[4] Zohdy, A. A. R. (1989). A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54(2), 245-253.

[5] Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü. Türkiye Jeoloji Haritaları Arşivi ve WMS Web Servisleri.

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrasında Enkaz Döküm Alanlarındaki Asbest ve İnorganik Kirleticilerin Yeraltısuyu Kimyası Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Aylin CİVAN*
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
aylincivan@dsi.gov.tr

Adnan MORKOÇ
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
adnanmorkoc@dsi.gov.tr

Elçin KABADAYI
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
elcink@dsi.gov.tr

Şeyda GÜNEŞ
DSİ 20. Bölge Müdürlüğü, Kahramanmaraş
seydagunes@dsi.gov.tr

Yılmaz Sıddık DOĞRULUK
DSİ 20. Bölge Müdürlüğü, Kahramanmaraş
ysdogruluk@dsi.gov.tr

İsmail SEVİM
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara
ismailsevim@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: Deprem Enkaz Alanları, Yeraltısuyu Kirliliği, Hidrojeokimya, Asbest, Ağır Metaller

1. Amaç

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde meydana gelen 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki depremlerin ardından oluşan enkaz yığınlarının yeraltısuyu sistemleri üzerindeki olası etkileri, Kahramanmaraş, Adıyaman ve Gaziantep illerinde yer alan beş enkaz depolama alanının yakınında bulunan 12 örnekleme noktasında (11 yeraltısuyu, 1 yüzey suyu) gerçekleştirilen yerinde ölçümler (elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık) ve su numunelerinde yapılan asbest, majör iyon ve ağır metal analizleri aracılığıyla araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

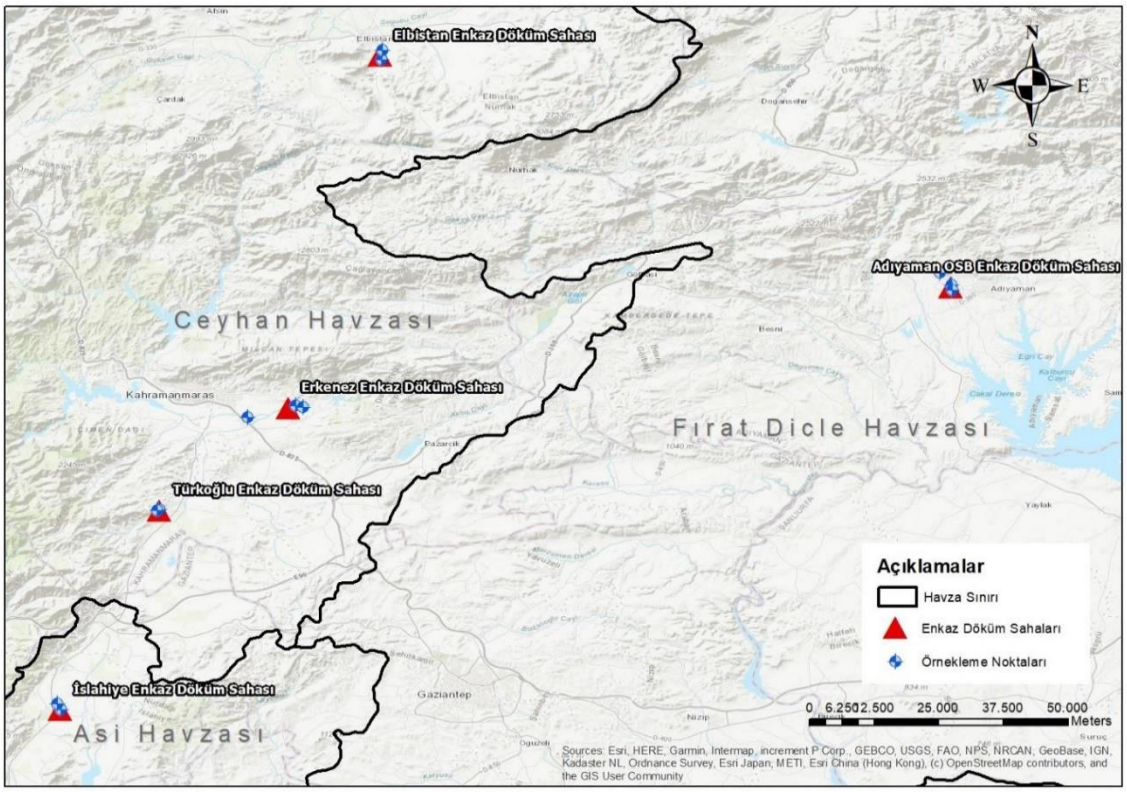
Deprem sonrası hidrojeokimyasal koşulların karakterize edilmesi ve olası kirletici baskı unsurlarının belirlenmesi amacıyla, beş farklı alan içerisindeki 12 noktada (Şekil 1) yeraltısuyu örneklemesi gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmalarına başlanmadan önce, 2023 depremleri sonucunda oluşan enkazın depolandığı alanların konumları, bu alanların çevresindeki yeraltısuyu kaynakları ve yeraltısuyu akım yönleri hakkında bilgi edinmek amacıyla Kahramanmaraş Devlet Su İşleri 20. Bölge Müdürlüğü ile görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bilgiler ve yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, enkaz depolama alanlarının yakınındaki yeraltısuyu kaynaklarının akım yönleri dikkate alınarak örnekleme noktaları belirlenmiştir (Tablo 1). Karşılaştırmalı değerlendirme yapılabilmesi için memba–mansap ilişkisi kurulmuştur.

2.1. Jeolojik ve Hidrojeolojik Özellikler

2.1.1. Erkenez enkaz depolama alanı

Erkenez Çayı, Orta Ceyhan Havzası'ndaki Aksu Çayı'nın en büyük kollarından biridir ve Ahırdağı etekleri boyunca yer alan çok sayıdaki kaynaktan çıkan suların birleşmesiyle oluşur. Erkenez enkaz depolama alanı ile üç örnekleme noktası, Jura–Kretase yaşlı Çekerek Nehri Formasyonu, Ankara Melanjı ve Orta

Miyosen yaşlı kumtaşı–çamurtaşı–kireçtaşı birimleri ile çevrili Kuvaterner alüvyonlar üzerinde yer almaktadır [1].



Şekil 1. Enkaz döküm sahaları ve örnekleme noktaları

2.1.2. Türkoğlu enkaz depolama alanı
Türkoğlu ilçesinin jeolojisi, dolomitik ve çörtlü kireçtaşlarından oluşan Hoya–Kavalköy Formasyonu ile Kuvaterner alüvyonlardan meydana gelmektedir. Türkoğlu Enkaz Depolama Alanı ve Türkoğlu-1 örnekleme noktası Kuvaterner alüvyonlar üzerinde, depolama alanının membasında bulunan Türkoğlu-2 örnekleme noktası ise Kretase yaşlı kireçtaşları üzerinde yer almaktadır [1].

2.1.3. Adıyaman enkaz depolama alanı
Fırat Havzası Master Planı Hidrojeoloji Nihai Raporu'na göre Kırkgöz Kaynağı, Aşağı Fırat Alt Havzası'nda, Adıyaman kent merkezinin yaklaşık 4 km kuzeyinde yer almakta ve Eosen–Pliyosen yaşlı kireçtaşlarından çok sayıda çıkış noktası şeklinde boşalmaktadır. Debinin bir bölümü Adıyaman kent merkezinin içme ve kullanma suyu ihtiyacını karşılamak üzere alınırken, kalan kısım Kırkgöz Çayı'nın sürekli akışına katkı sağlamakta ve sulama amacıyla kullanılmaktadır [2]. Yaklaşık 200 L/s debiye sahip Kırkgöz kaynaklarının, arazi gözlemleri ve çok sayıda çıkış noktasından boşalması dikkate alınarak karstik kökenli olduğu değerlendirilmektedir.

Adıyaman-1 örnekleme noktası, Kırkgöz Kaynağı'nın en büyük çıkışlarından birine karşılık gelmekte ve depolama alanıyla ilişkili beslenim bölgesini temsil etmektedir. Adıyaman-2 noktası ise Orta Miyosen–Üst Miyosen yaşlı konglomera–çamurtaşı–kumtaşı birimleri üzerinde yer almakta ve benzer şekilde beslenim alanını temsil etmektedir. Adıyaman-2 noktasının hemen aşağı yamacında bulunan enkaz depolama alanı da aynı jeolojik birim üzerinde yer almaktadır.

2.1.4. Elbistan Enkaz Depolama Alanı
Elbistan ilçesinin güney kesiminde Üst Jura–Alt Kretase yaşlı volkanosedimanter kayaçlar ile Triyas–Kretase yaşlı kireçtaşları; kuzey kesiminde ise Pliyosen yaşlı kumtaşı–çamurtaşı–kireçtaşı ardalanmaları ve alüvyonlar yüzeylemektedir. Enkaz depolama alanı volkanosedimanter kayaçlar üzerinde, Elbistan-1 örnekleme noktası kireçtaşları üzerinde, Elbistan-2 noktası ise kumtaşı–çamurtaşı–kireçtaşı birimleri üzerinde yer almaktadır [1].

Tablo 1. Enkaz döküm sahaları ve örnekleme noktalarına ait bilgiler

Saha Adı	Örnekleme Nokatsı	Örnekleme Kodu	Temsil Edilen Saha	Örnek Türü	Kuyu Derinliği	Ek Bilgiler
Kahramanmaraş Erkenez Çayı	Erkenez-1	ERK1	Enkaz Döküm Sahası Mansabı	Kuyu	90 m	Turat Madencilik kuyusu
	Erkenez-2	ERK2	Enkaz Döküm Sahası Mansabı	Kuyu	Bilinmiyor	DSİ 20. Bölge Müdürlüğü bahçesinde yer alan kuyu
	Erkenez-3	ERK3	Enkaz Döküm Sahası Membası	Kuyu	50 m	KASKİ kuyusu
Türkoğlu	Türkoğlu-1	TRK1	Enkaz Döküm Sahası Mansabı	Kuyu	100 m	KASKİ kuyusu
	Türkoğlu-2	TRK2	Enkaz Döküm Sahası Membası	Kuyu	100 m	KASKİ kuyusu
Adıyaman	Adıyaman-1	ADY1	Enkaz Döküm Sahası Membası	Kaynak	-	Kırkgöz kaynakları
	Adıyaman-2	ADY2	Enkaz Döküm Sahası Membası	Kuyu	Bilinmiyor	Adıyaman OSB Güçlü Tekstil kuyusu
	Adıyaman-3	ADY3	Enkaz Döküm Sahası Mansabı	Yüzey Suyu	-	Kırkgöz kaynaklarının devamı olan dere
Elbistan	Elbistan-1	ELB1	Enkaz Döküm Sahası Membası	Kuyu	100 m	Taşburun Yeşilyurt Çiftlik Kuyusu
	Elbistan-2	ELB2	Enkaz Döküm Sahası Mansabı	Kaynak	-	Pınarbaşı Kaynağı
İslahiye	İslahiye-1	ISL1	Enkaz Döküm Sahası Mansabı	Kuyu	172 m	Şahıs Kuyusu
	İslahiye-2	ISL2	Enkaz Döküm Sahası Membası	Kuyu	200 m	Şahıs Kuyusu

2.1.5. İslahiye enkaz depolama alanı

Kuvaterner yaşlı İslahiye Delihalil Bazaltı; gevşek piroklastik kayaçlar, volkanik kül çökelleri ve bazaltik lav akıntılarından oluşmaktadır. Piroklastik birimler; volkanik bombalar, lapilli, pomza ve skoryanın yanı sıra sarı, kahverengi, pembe ve kırmızımsı renklerde volkanik kül tabakalarını içermektedir. Petrografik olarak olivinli bazalttan bazalta kadar sınıflandırılan lav akıntılarında plajiyoklaz, olivin ve piroksen baskın mineral topluluğunu oluşturmaktadır [3]. Enkaz depolama alanı ile her iki örnekleme noktası da bu bazalt birimi üzerinde yer almaktadır.

2.2. Arazi Ölçümleri ve Laboratuvar Analizleri

Kahramanmaraş, Adıyaman ve Gaziantep illerinde belirlenen 12 örnekleme noktasında, 2024 yılının yağışlı ve kurak dönemlerinde taşınabilir çok parametreli ölçüm cihazı kullanılarak elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık ölçümleri yerinde gerçekleştirilmiştir. Majör iyonlar, besin elementleri, ağır metaller ve asbest analizleri için uygun koşullarda su numuneleri alınmıştır.

Majör iyon ve ağır metal analizleri DSİ Bölge Müdürlüğü laboratuvarlarında, asbest analizleri ise akredite özel bir laboratuvarda (AGT VONKA Laboratuvarları) gerçekleştirilmiştir. Ca^{2+}, Na^{+}, Mg^{2+}, K+, Cl-, $SO_4$2-, NO_3-, NH_3, NO_2- ve PO_4- iyonları iyon kromatografisi yöntemiyle (Metot: TS EN ISO 10304-1), CO_3 ve HCO_3 ise titrimetrik yöntemle (Metot: TS 3790 EN ISO 9963-1) belirlenmiştir. Ağır metal analizleri ICP-MS yöntemi kullanılarak (Metotlar: TS EN ISO 17294-1, TS EN ISO 17294-2 ve EPA 200.8) gerçekleştirilmiştir. Su numunelerindeki asbest tayini ise SEM-EDX yöntemiyle (Metot: VDI 3866) yapılmıştır.

3. Değerlendirme

İzleme ağının tasarımında yeraltısuyu akım dinamikleri dikkate alınmış ve olası çevresel etkilerin değerlendirilmesi amacıyla örnekleme noktaları enkaz depolama alanlarının memba ve mansabında olacak şekilde stratejik olarak belirlenmiştir. Alınan su numunelerinde majör iyonlar, besin elementleri, ağır metaller ve asbest analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.

Hiçbir numunede asbest tespit edilmemiştir. Ancak, suda asbest tayinine (Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi ile Taramalı Elektron Mikroskopisi, SEM–EDX) ait temsili bir görüntü, görsel amaçlı olarak Şekil 3'te sunulmuştur.

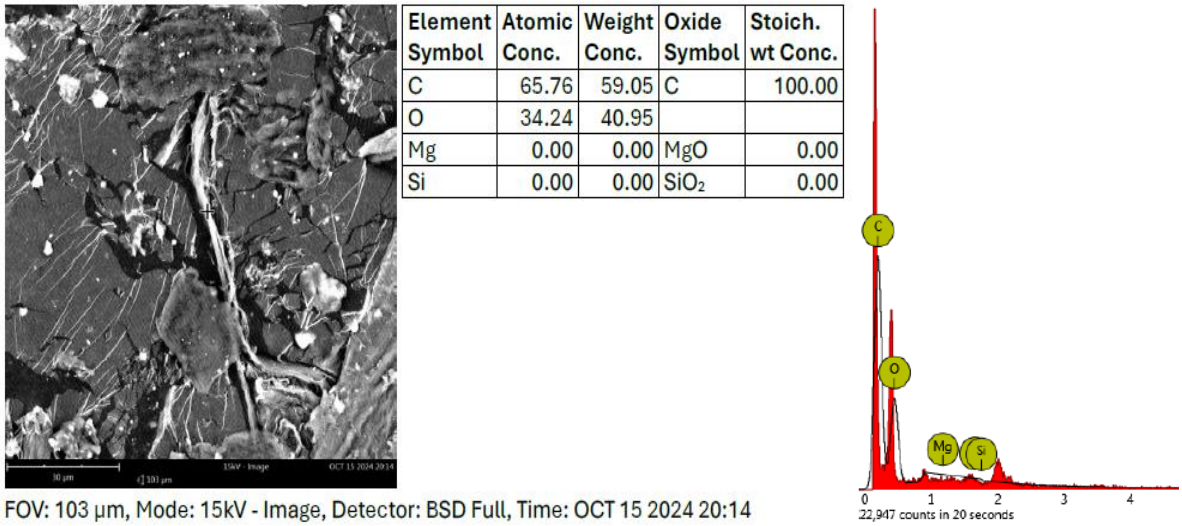
Tablo 2. Yerinde ölçüm ve analiz sonuçları

Parametre	Su Kalitesi Standardı	Örnekleme Tarihi	TRK1	TRK2	ELB1	ELB2	ADY1	ADY2	ADY3	ERK1	ERK2	ERK3	ISL1	ISL2
T (°C)	-	15.05.24	17.70	19.60	18.30	15.90	16.90	23.00	23.40	14.60	16.80	18.80	21.20	19.30
		02.10.24	16.53	17.30	19.20	18.87	18.57	25.40	22.50	14.43	13.64	-	21.20	20.25
EC (µS/cm)	<2500[1]	15.05.24	481	585	560	417	435	376	1515	634	438	684	336	475
		02.10.24	521	445	571	487	419	394	1050	847	402	-	338	398
pH	6.5<pH<9.5[1]	15.05.24	7.4	7.15	7.95	7.98	7.62	7.82	7.77	6.34	8.12	7.83	6.86	6.78
		02.10.24	7.8	7.39	7.61	8.58	8.05	7.82	8.23	8.65	8.28	-	6.74	6.79
Na (mg/L)	200[1]	15.05.24	4.36	6.61	29.7	27.62	3.21	2.61	104.1	13.51	6.89	10.15	9.88	7.7
		02.10.24	3.28	6.87	11.57	3.16	3.00	3.28	81.27	10.36	7.09	9.73	9.66	7.59
K (mg/L)	-	15.05.24	0.8	0.85	0.94	1.32	0.69	0.88	16.59	1.44	0.83	1.26	1.5	1.4
		02.10.24	0.55	0.66	2.91	0.60	0.54	0.46	11.47	0.98	0.86	0.87	1.49	1.17
Ca (mg/L)	-	15.05.24	74.81	65.48	67.63	85.73	88.94	59.27	246.56	83.05	66.92	81.4	45.41	52.36
		02.10.24	62.99	55.20	134.89	69.81	67.48	46.67	103.64	66.64	58.84	72.71	39.86	44.83
Mg (mg/L)	-	15.05.24	24.97	42.82	24.09	11.86	10.13	22.67	27.02	35.05	25.78	49.06	14.81	39.24
		02.10.24	25.43	43.74	17.30	10.48	10.45	21.63	23.30	27.51	25.67	29.72	16.11	26.80
CO_3 (mg/L)	-	15.05.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		02.10.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO_3 (mg/L)	-	15.05.24	290.0	339.7	240.2	205.1	274.9	203.3	172.0	263.6	275.8	385.7	184.5	185.1
		02.10.24	287.3	336.9	347.4	190.1	227.8	160.9	218.6	251.9	248.5	345.6	161.3	244.7
Cl (mg/L)	250[1]	15.05.24	<10.00	13.12	31.17	<10.00	<10.00	19.69	70.69	22.55	10.98	15.72	<10.00	14.56
		02.10.24	7.20	14.29	45.90	11.14	6.20	23.20	119.46	19.89	19.76	10.63	16.76	11.43
SO_4 (mg/L)	250[1]	15.05.24	17.02	23.05	23.72	44.38	11.3	10.37	619.81	87.83	15.26	22.52	8.52	11.15
		02.10.24	14.27	22.04	42.87	44.59	9.18	7.20	187.46	52.09	14.53	16.67	11.41	7.81
NH_4 (mg/L)	0.5[1]	15.05.24	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025
		02.10.24	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18
NO_2 (mg/L)	0.5[1]	15.05.24	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025
		02.10.24	0.31	0.17	<0.05	<0.05	0.10	0.27	<0.05	3.94	0.18	0.29	<0.05	<0.05
NO_3 (mg/L)	50[1]	15.05.24	14.67	17.53	34.46	10.27	16.04	17.37	26.34	17.98	25.53	39.51	18.38	25.12
		02.10.24	2.52	3.88	11.84	1.90	3.65	3.30	1.53	17.44	6.13	2.82	5.73	4.10
o-PO_4 (mg/L)	-	15.05.24	<0.300	0.318	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	0.339	<0.300
		02.10.24	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17
Pb (µg/L)	10[1]	15.05.24	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	-	4.28	<0.56
		02.10.24	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	15.84	<0.56
Cr (µg/L)	50[1]	15.05.24	3.09	6.26	2.9	0.56	1.98	17.37	2.63	3.06	5.07	5.52	5.92	10.42
		02.10.24	3.82	8.58	1.5	0.65	1.88	18.19	4.55	3.35	5.04	3.02	12.83	3.58
Mn (µg/L)	50[1]	15.05.24	0.87	<0.76	1.65	<0.76	<0.76	<0.76	139.52	<0.76	<0.76	<0.76	<0.76	<0.76
		02.10.24	<0.76	<0.76	22.63	<0.76	<0.76	1.45	157.71	0.97	<0.76	1.31	127.27	<0.76
Fe (µg/L)	200[1]	15.05.24	77.89	5.45	19.25	4.11	4.55	7.61	59.86	9.15	8.06	<1.55	6.01	11.11
		02.10.24	19.67	10.82	264.71	8.25	8.48	22.56	550.63	72.46	7.78	26.55	2552.93	13.55
Cu (µg/L)	2000[1]	15.05.24	2	0.6	0.64	<0.59	<0.59	2.8	0.85	<0.59	<0.59	<0.59	<0.59	1.51
		02.10.24	0.7	<0.59	1.96	<0.59	1.47	1.26	1.6	0.67	<0.59	<0.59	3.6	0.91
Cd (µg/L)	5[1]	15.05.24	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
		02.10.24	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Ni (µg/L)	20[1]	15.05.24	1.01	2.93	2.1	<0.54	0.73	1.05	17.05	0.7	<0.54	1.02	4.64	2.54
		02.10.24	1.36	3.46	3.48	<0.54	1.12	1.33	21.62	0.89	0.68	1.01	43.47	3.06
Al (µg/L)	200[1]	15.05.24	8.55	<2.06	18.76	2.82	3.11	2.77	44.08	4.86	5.87	<2.06	3.38	<2.06
		02.10.24	7.88	4.94	221.17	3.92	3.98	6.3	508.13	6.3	3.4	8.22	1562.8	2.83
Hg (µg/L)	1[1]	15.05.24	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	0.07	<0.07	<0.07	0.87	0.09	<0.07
		02.10.24	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07
As (µg/L)	10[1]	15.05.24	0.64	0.53	0.8	1.59	<0.24	<0.24	1.83	0.32	0.31	0.47	0.34	0.28
		02.10.24	0.75	0.63	0.43	1.6	<0.24	<0.24	1.85	0.35	0.32	0.32	0.53	0.26
Sb (µg/L)	-	15.05.24	0.41	0.33	2.18	3.25	5.87	3.14	2.92	0.33	5.5	0.22	7.39	4.65
		02.10.24	11.2	11.03	9.07	9.78	10.66	10.95	9.62	10.18	9.94	9.85	4.55	10.46
Se (µg/L)	10[1]	15.05.24	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	1.02	3.19	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67
		02.10.24	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	0.94	2.96	0.79	<0.67	3.06	<0.67
B (mg/L)	1[1]	15.05.24	0.009	0.022	0.072	0.011	0.008	0.008	0.074	0.032	0.018	0.028	0.01	0.008
		02.10.24	0.01	0.023	0.025	0.012	0.01	0.009	0.11	0.025	0.021	0.026	0.009	0.008
Asbest (MFL)	7[2]	15.05.24	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		02.10.24	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

[1]İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik
[2]EPA- İçme Sularında Asbest Kriterleri (10 mikrometreden büyük asbest lifleri için)

Mikroskopi, asbestin lifsi morfolojisini doğrulayabilen tek yöntem olduğundan, bu çalışmada mikroskobik yöntemlerden yararlanılmıştır. Ancak, asbestin suda çözünmemesi nedeniyle liflerin süspansiyon hâlinde kalması ve su içerisinde homojen dağılmaması, analiz açısından güçlük oluşturmaktadır. Bu nedenle, asbest su ortamında bulunmasına rağmen numune alma sırasında numuneye geçmeyebilir ve laboratuvar analizlerinde tespit edilemeyebilir. Analitik tespit sınırlamalarına ek olarak, yeraltısuyunda

asbest liflerinin taşınımı, yeraltındaki tutunma ve taşınım mekanizmalarının karmaşıklığı nedeniyle de güçlük arz etmektedir. Asbest lifleri, özellikle ince taneli ve düşük geçirgenlikli ortamlarda mekanik filtrasyon, gözeneklerde tutulma ve toprak mineralleriyle etkileşimler sonucunda doygun olmayan zonda tutulabilmekte ve akifere geçişleri sınırlanabilmektedir [4]; [5]. Uygun hidrojeokimyasal koşullarda taşınım mümkün olmakla birlikte, düşük konsantrasyonlar nedeniyle bu sürecin ve taşınım yollarının güvenilir şekilde ortaya konulması güçtür [6]. Ayrıca, düşük lif miktarı ve matriks etkileri, yeraltısuyunda kullanılan analiz yöntemlerinin duyarlılığını sınırlamaktadır. Bununla birlikte, yüksek çözünmüş organik madde gibi belirli jeokimyasal koşullar liflerin hareketliliğini artırabilmektedir [7-8].



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
C	65.76	59.05	C	100.00
O	34.24	40.95		
Mg	0.00	0.00	MgO	0.00
Si	0.00	0.00	SiO_2	0.00

Şekil 3. Erkenez-3 numunesinde Taramalı Elektron Mikroskopisi ve Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi (SEM/EDXA) ile gerçekleştirilen asbest tayini

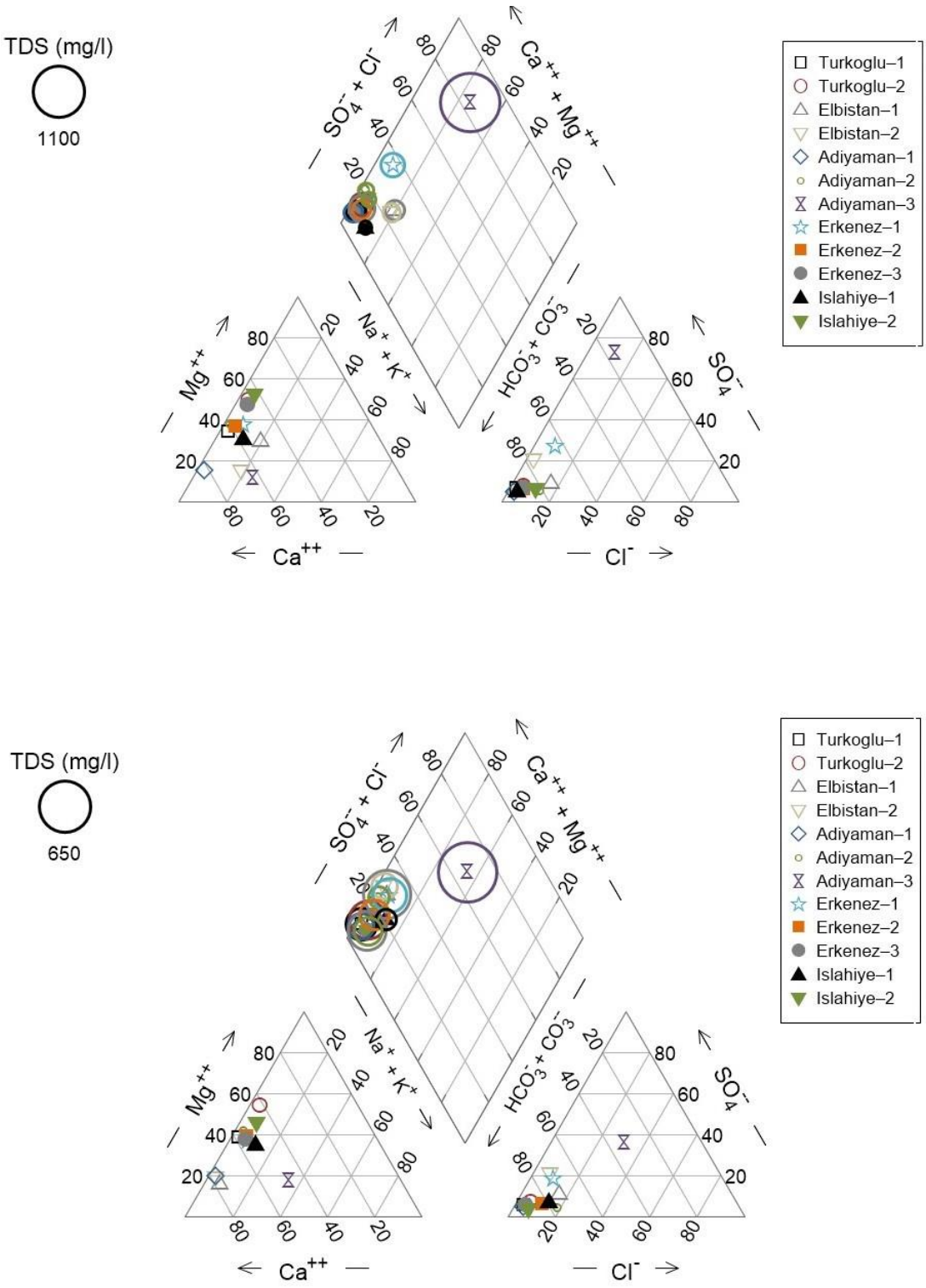
Analiz sonuçlarına göre (Tablo 2), örnekleme noktalarının tamamında Ca+Mg konsantrasyonları Na+K konsantrasyonlarından daha yüksek, 11 noktada ise HCO_3+CO_3 konsantrasyonları SO_4+Cl konsantrasyonlarından daha yüksektir. Piper diyagramına göre (Şekil 4) yeraltısularının baskın hidrojeokimyasal fasiyesi Ca–HCO_3 olup, Türkoğlu-2'de Mg–HCO_3, Adıyaman-3'te ise Ca–SO_4 fasiyesi belirlenmiştir. Genel olarak bu sonuçlar, yeraltısularının Ca–Mg–HCO_3 tipi olduğunu ve hidrojeokimyasal özelliklerin geçilen jeolojik birimlerin litolojisiyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Türkoğlu, Elbistan, Erkenez ve İslahiye'deki memba–mansap noktaları benzer hidrojeokimyasal özellikler göstermektedir. Buna karşılık Adıyaman'da membadaki Adıyaman-1 ve Adıyaman-2 noktaları Ca–HCO_3 tipi iken, mansaptaki Adıyaman-3 yüzey suyu örneği Ca–SO_4 tipi karışık su özelliğindedir. Adıyaman-3'te SO_4, Fe ve Mn konsantrasyonlarının yüksek olması ve noktanın enkaz depolama alanının hemen mansabında bulunması, bu farklılığın enkaz depolama alanından kaynaklanan antropojenik sülfat girdisiyle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Beton ve alçı esaslı malzemeler bu açıdan potansiyel kalsiyum sülfat kaynaklarıdır [9]; [10]. Sülfatın yüzey suyunda yüksek, yeraltısuyunda ise düşük olması; yüzeysel ve sığ akışın hızlı taşınımına karşın, doygun olmayan zonun yeraltısuyuna ulaşımı geciktiren bir bariyer oluşturmasıyla açıklanabilir [11].

2024 yılı kurak döneminde Adıyaman-3'te Mn, Fe, Ni ve Al konsantrasyonlarında da sınır değer aşımları belirlenmiş ve ağır metal konsantrasyonlarının yağışlı döneme göre genel olarak arttığı görülmüştür. Bu durum kurak dönemde azalan akış ve su seviyelerine bağlı olarak seyreltme etkisinin azalması ve su–metal etkileşimlerinin artmasıyla ilişkili olabilir [12]

Ortalama nitrat konsantrasyonu yağışlı dönemde 21,93 mg/L, kurak dönemde 5,40 mg/L olarak belirlenmiş ve 50 mg/L sınır değeri hiçbir noktada aşılmamıştır. Bununla birlikte, doğal arka plan düzeylerinin üzerindeki nitrat konsantrasyonları antropojenik etkilerle ilişkili olabilir. İslahiye'yi de kapsayan Asi Havzası Hidrojeolojik Etüt Projesi kapsamında 2022 yılı kurak döneminde ortalama nitrat

konsantrasyonu 23,56 mg/L iken, deprem sonrasında sırasıyla 32,17, 16,36 ve 25,66 mg/L değerleri ölçülmüştür. Deprem sonrası dönemsel artışlar, hidrojeolojik yapıdaki değişimlerin yüzey kaynaklı kirleticilerin doygun zona taşınmasını kolaylaştırmasıyla ilişkili olabilir [13]; [14]. TOK değerlerindeki dönemsel artışlar da benzer şekilde deprem sonrası değişen hidrojeokimyasal koşullar ve antropojenik baskılarla ilişkili değerlendirilebilir [3]. Zaman içerisinde gerçekleşen biyokimyasal süreçlerin etkisiyle nitrat ve TOK değerlerinin deprem öncesi seviyelere yaklaşması beklenmektedir.



Şekil 4. Piper diyagramları a) 2024 yağışlı dönem, (b) 2024 kurak dönem

İslahiye'de membadaki İslahiye-2 noktasında risk oluşturabilecek bir ağır metal sonucu belirlenmezken, enkaz depolama alanının mansabında ve yakınında bulunan İslahiye-1'de ağır metal sınır değer aşımları tespit edilmiştir. 2022 yılı deprem öncesi izlemelerinde aynı jeolojik birimde ağır metal aşımı bulunmaması nedeniyle, 2024 kurak döneminde belirlenen Fe, Pb, Mn, Ni ve Al artışlarının enkaz depolama alanından kaynaklanan kirleticilerin sızmasıyla ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Yağışlı dönemdeki daha düşük konsantrasyonlar ise seyreltme etkisiyle açıklanabilir. Bununla birlikte, volkanik kayaçların doğal olarak metal içerebilmesi nedeniyle kaynağın kesin olarak belirlenmesi için daha kapsamlı izleme gerekmektedir.

Hiçbir örnekleme noktasında asbest tespit edilmemiştir. Bu durum, deprem enkazlarında asbest içeren malzemeler bulunabilmesine rağmen, liflerin mekanik filtrasyon ve sınırlı düşey hareketlilik nedeniyle doygun olmayan zon ve sedimanlarda tutulması ve yeraltısuyuna geçişlerinin sınırlanmasıyla ilişkili olabilir. Adıyaman'da karstik beslenim alanında kirletici tespit edilmemesi doğal koruma koşullarının etkili olduğunu düşündürürken, mansaptaki yüzey suyunda yüksek sülfat ve ağır metal konsantrasyonlarının bulunması kirleticilerin öncelikle yüzeysel ve sığ akışlarla taşındığını göstermektedir. İslahiye'de çatlaklı bazalt ve piroklastik birimler sığ sızma ve kirletici taşınımını kolaylaştırabilirken, Erkenez ve Türkoğlu gibi alüvyal alanlarda heterojen geçirgenlik ve seyreltme etkileri kirletici konsantrasyonlarını azaltabilir. Genel olarak bulgular, kirletici davranışının antropojenik kaynak yükü ile jeolojik ve hidrojeolojik koşulların ortak etkisiyle kontrol edildiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmanın bulgularının da ortaya koyduğu üzere, depremler yeraltısuyu kalitesini hem fiziksel hem de kimyasal açıdan uzun vadede etkileyebilmektedir. Yeraltısuyu akım sistemlerinin yeniden şekillenmesi, mineral çözünmesi ve mikrobiyal aktivitedeki değişimler önemli rol oynarken, deprem sonrasında uygun olmayan şekilde depolanan enkazlardan ve hasar gören altyapı sistemlerinden kaynaklanan çeşitli kirleticiler de su kaynaklarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle, söz konusu etkilerin izlenmesi ve kontrol altında tutulması, yeraltısuyu kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Gelecekteki araştırmalar, genişletilmiş ve uzun süreli bir izleme programı aracılığıyla deprem sonrası yeraltısuyu davranışının daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasına odaklanacaktır. Bu kapsamda öncelikli olarak, besin elementleri ve ağır metal konsantrasyonlarının ilave izleme dönemlerinde ölçülmeye devam edilmesi ve zamansal değişimlerin daha yüksek çözünürlükle belirlenmesi hedeflenmektedir. Sürekli eğilim analizi, öngörülen doğal zayıflama hızlarının doğrulanması ve hidrojeokimyasal koşulların deprem öncesi referans değerlere dönmesinin ne kadar zaman alacağının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Kirleticilerin taşınım yollarının daha kapsamlı değerlendirilmesi amacıyla izleme programının, yeni ortaya çıkan kirletici maddeleri de kapsayacak şekilde genişletilmesi önem taşımaktadır.

5. Kaynaklar

[1] DSI (2015). CEYHAN HAVZASI MASTER PLANI.

[2] DSI (2016). FIRAT-DİCLE HAVZASI MASTER PLANI.

[3] DSI (2025). ASİ HAVZASI HİDROJEOLOJİK ETÜT PROJESİ.

[4] Bradford, S. A., Yates, S. R., Bettahar, M., & Simunek, J. (2002). Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media. Water Resources Research, 38(12), 63–1. https://doi.org/10.1029/2002WR001340

[5] Ryan, J. N., & Elimelech, M. (1996). Colloid mobilization and transport in groundwater. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 107, 1–56. https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03384-X

[6] Schreier, H. . (1989). Asbestos in the natural environment. 159.

[7] Avataneo, C., Capella, S., Luiso, M., Marangoni, G., Lasagna, M., De Luca, D. A., Bergamini, M., Belluso, E., & Turci, F. (2023). Waterborne asbestos: Good practices for surface waters analyses. Frontiers in Chemistry, 11, 1104569. https://doi.org/10.3389/FCHEM.2023.1104569/BIBTEX

[8] Mohanty, S. K., Salamatipour, A., & Willenbring, J. K. (2021). Mobility of asbestos fibers below ground is enhanced by dissolved organic matter from soil amendments. Journal of Hazardous Materials Letters, 2, 100015. https://doi.org/10.1016/J.HAZL.2021.100015

[9] Jang, Y. C., & Townsend, T. (2001). Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines. Advances in Environmental Research, 5(3), 203–217. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00056-30191(00)00056-3

[10] Kijjanapanich, P., Annachhatre, A. P., Esposito, G., van Hullebusch, E. D., & Lens, P. N. L. (2013). Biological sulfate removal from gypsum contaminated construction and demolition debris. Journal of Environmental Management, 131, 82–91. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2013.09.025

[11] Dahan, O. (2020). Vadose Zone Monitoring as a Key to Groundwater Protection. Frontiers in Water, 2, 599569. https://doi.org/10.3389/FRWA.2020.599569

[12] Olías, M., Nieto, J. M., Sarmiento, A. M., Cerón, J. C., & Cánovas, C. R. (2004). Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (South West Spain). Science of The Total Environment, 333(1–3), 267–281.

[13] Nakagawa, K., Shimada, J., Yu, Z. Q., Ide, K., & Berndtsson, R. (2021). Effects of the Japanese 2016 kumamoto earthquake on nitrate content in groundwater supply. Minerals, 11(1), 1–17. https://doi.org/10.3390/MIN11010043

[14] Hosono, T., Yamada, C., Manga, M., Wang, C. Y., & Tanimizu, M. (2020). Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains. Nature Communications 2020 11:1, 11(1), 2776-. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16604-y

Konya Acıgöl Krater Gölünün Kıyı Kenar Çizgisinin Belirlenmesine Hidrojeolojik Yaklaşım

Nami ERDOĞAN
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı

Şükran AÇIKEL
Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidrojeoloji Programı

Mehmet EKMEKÇİ
Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidrojeoloji Programı

İsmail SEVİM
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı

Anahtar Kelimeler: Acıgöl, kıyı kenar çizgisi, hidrojeoloji, yeraltısuyu-göl etkileşimi, göl seviyesi

1. Amaç

Konya ili Karapınar ilçesinde Angut kuşlarının yumurtlama alanı olan Acıgöl, ülkemizin önemli ekosistem ve jeolojik miras varlıklarındandır. Acıgöl, Karacadağ volkanik kompleksi içerisinde gelişmiş, kapalı havza koşullarında bulunan ve yüksek mineralizasyon (elektriksel iletkenlik 90.000 µS/cm) içeren, yaklaşık 1.0 km^2 göl alanına sahip yüzeysel çıkışı bulunmayan volkanik bir krater gölüdür. Acıgöl'ün içerisinde bulunduğu yaklaşık 5.500 km^2'lik bölgede, önemli göl ve sulak alan sistemlerinden 1000 m kotundaki Hotamış Sazlığı, 998 m kotundaki Akgöl ile 981 m kotundaki Meke Gölü büyük ölçüde kurumuşken, Acıgöl'ün su seviyesi ise 2026 yılında 969 m kotuna kadar düşmesine rağmen varlığını sürdürmeye devam etmektedir.

Acıgöl çevresinin 2024 yılı itibarıyla peyzaj alanı olarak kullanılmaya başlanmasıyla birlikte gölün kıyı kenar çizgisinin belirlenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Kıyı çizgisi, taşkın durumları dışında suyun karaya değdiği noktaların oluşturduğu doğal çizgi; kıyı kenar çizgisi ise kıyı hareketlerinin oluşturduğu jeomorfolojik alanların kara yönündeki doğal sınırı olarak yönetmelikte tanımlanırken, tabii ve suni göllerde DSİ tarafından belirlenen maksimum su kotunun kıyı çizgisi olarak esas alınacağı belirtilmektedir [1]. Yönetmelikte yer alan "taşkın durumları dışında" ifadesinde nicel bir hidrolojik ölçütün açıkça tanımlanmaması ve maksimum su kotunun belirlenmesinde göl–yeraltısuyu etkileşiminin nasıl dikkate alınacağının belirtilmemesi, yeraltısuyu ile etkileşim gösteren göllerde kıyı çizgisine esas alınacak su seviyesinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Yeraltısuyu ve yüzey sularının birbirinden bağımsız sistemler olarak değerlendirilmesi yerine, aynı hidrolojik sistemin birbiriyle ilişkili bileşenleri olarak ele alınması gerekmektedir [2]. Acıgöl'de belirgin ve sürekli yüzeysel beslenim sağlayan bir akarsu ile yüzeysel çıkışın bulunmaması, göl seviyesindeki değişimlerin yalnızca yüzeysel hidrolojik süreçlerle açıklanmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle göl seviyesinin mevsimsel ve yıllar arası değişimi ile yağış, buharlaşma, çevredeki yeraltısuyu hidrolik yükleri ve olası göl–akifer etkileşiminin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca Acıgöl'ün volkanik maar morfolojisi nedeniyle, göl seviyesindeki değişim ile kıyının jeomorfolojik yapısının birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, 4/4/1990 tarih ve 3621 sayılı Kıyı Kanununun Uygulanmasına Dair yönetmelikte tanımlanan kıyı çizgisi ve kıyı kenar çizgisi ölçütlerini Acıgöl'ün hidrolojik, hidrojeolojik ve jeomorfolojik özellikleri çerçevesinde değerlendirmek; göl seviyesi değişimleri, yeraltısuyu hidrolik yükleri, göl–akifer ilişkisi ve göl çanağı morfolojisinin kıyı sınırının belirlenmesindeki önemini ortaya koymak ve mevcut verilerin yeterliliği ile ilave hidrojeolojik gözlem gereksinimlerini belirlemektir.

2. Materyal ve Yöntem

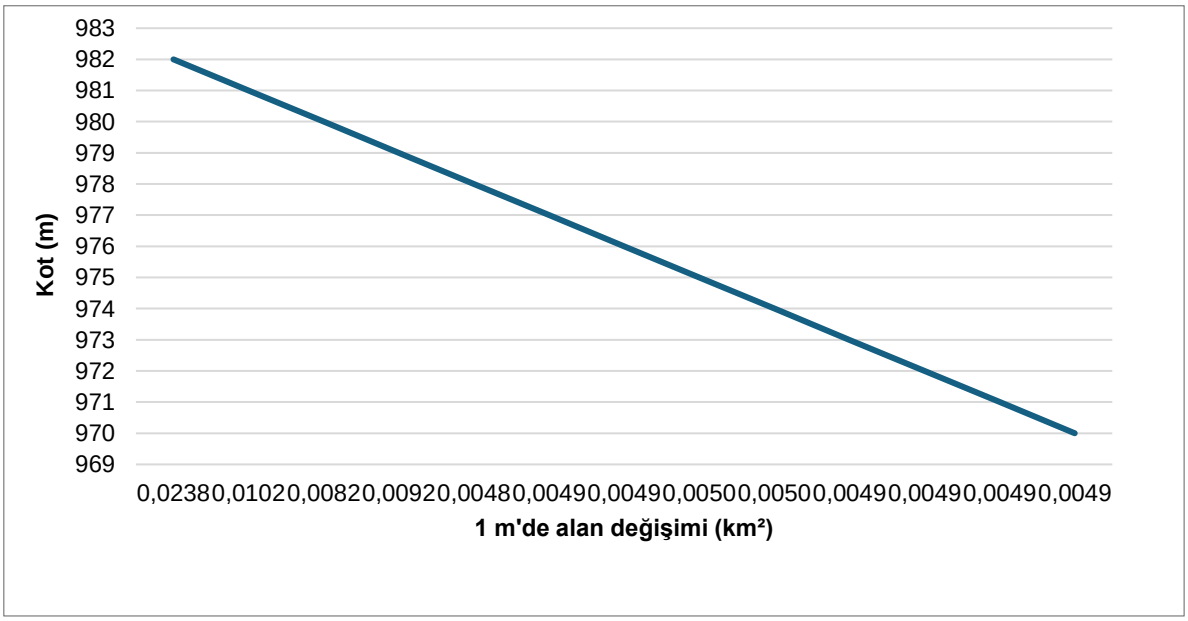
Çalışmada, yönetmelikte tanımlanan kıyı çizgisi ve kıyı kenar çizgisi ölçütlerinin Acıgöl özelinde değerlendirilmesi amacıyla hidrolojik, hidrojeolojik ve morfometrik veriler birlikte kullanılmıştır. Bu kapsamda göl seviyesinin zamansal değişimi (Ekim 1999–Eylül 2016) ve meteorolojik değişkenlerle

ilişkisi istatistiksel olarak incelenmiştir. 10.07.2024 tarihli arazi çalışmasında elde edilen yeraltısuyu seviye ölçümleri ve hidrojeokimyasal veriler göl–akifer ilişkisinin değerlendirilmesinde, batimetrik veriler ise göl seviyesindeki değişimlerin kıyı konumu üzerindeki etkisinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

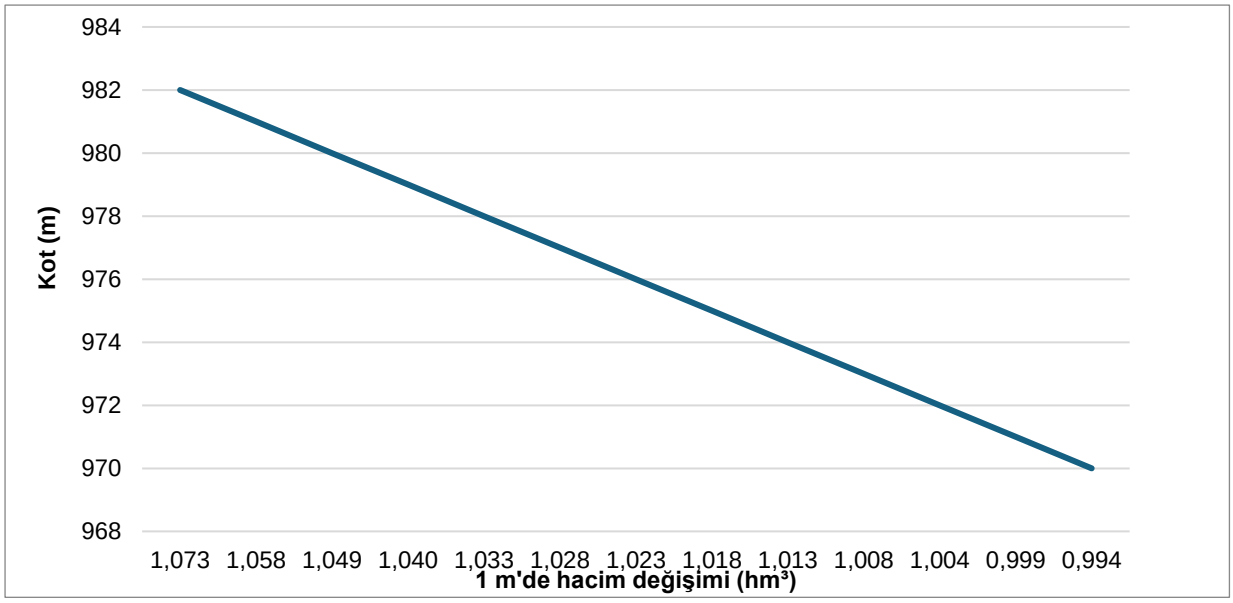
Acıgöl göl seviyesi ile yağış arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde, her iki veri serisinin ortak olduğu Ekim 1999–Eylül 2016 dönemine ait 204 aylık gözlem kullanılmıştır. Mevsimselliğin etkisini azaltmak amacıyla, her takvim ayına ait yağış ve göl kotu değerleri ilgili ayın uzun dönem ortalamasından çıkarılarak yağış ve göl kot anomalileri hesaplanmıştır. Yağış anomalileri ile göl kot anomalileri arasındaki olası gecikmeli ilişki Pearson ve Spearman korelasyon analizleri kullanılarak 0–24 aylık gecikmeler için incelenmiştir. Ayrıca uzun dönemli yağış davranışının göl seviyesiyle ilişkisini değerlendirmek amacıyla aylık yağış anomalilerinin ardışık toplamından elde edilen eklenik yağış sapması ile göl kot anomalisi, kısa dönemli göl tepkisini değerlendirmek amacıyla ise aylık yağış anomalisi ile bir önceki aya göre göl kotu değişimi (Δh) arasındaki Pearson korelasyonu hesaplanmıştır. Korelasyonların istatistiksel anlamlılığı $p<0,05$ düzeyinde değerlendirilmiştir.

Hidrojeolojik değerlendirmede, DSİ gözlem kuyularından elde edilen yeraltısuyu seviye kotları göl seviyesiyle karşılaştırılarak göl çevresindeki hidrolik yük dağılımı, olası göl–akifer ilişkisi için incelenmiştir. Jeoloji ve kuyu logu verileri, bu ilişkinin hidrostratigrafik denetiminin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Hidrojeokimyasal veriler ise göl ve çevre akiferler arasındaki olası hidrolik ilişkilerin destekleyici göstergesi olarak değerlendirilmiştir; çünkü yeraltısuyunun kimyasal bileşimi, akış yolu boyunca etkileştiği sistemler hakkında bilgi sağlamaktadır [3].

Göl çanağının morfometrik özelliklerinin seviye değişimlerine bağlı kıyı hareketi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla batimetrik verilerden kot–alan ve kot–hacim ilişkileri oluşturulmuştur. Ardışık kotlar arasındaki su yüzey alanı (ΔA) ve hacim (ΔV) değişimleri hesaplanarak birim göl seviyesi değişimine (Δh) karşılık gelen alan ve hacim değişimleri belirlenmiştir. Böylece göl çanağının farklı yükselti aralıklarındaki morfometrik hassasiyeti değerlendirilmiş ve aynı büyüklükteki düşey seviye değişiminin farklı kotlarda kıyı ve su yüzey alanında farklı büyüklüklerde değişime neden olup olmadığı araştırılmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7).



Şekil 6. Göl seviyesindeki birim değişimin göl su yüzey alanı üzerindeki etkisi



Şekil 7. Göl seviyesindeki birim değişimin göl su hacmi üzerindeki etkisi

3. Değerlendirme

Acıgöl'ün Ekim 1999–Eylül 2016 dönemine ait aylık seviye kayıtları, göl seviyesinde belirgin bir mevsimsel salınımın yanı sıra yıllar arası değişkenliğin de bulunduğunu göstermektedir. İncelenen dönemde göl seviyesi 981,03–982,45 m kotları arasında değişmiş ve gözlenen toplam seviye aralığı 1,42 m olarak belirlenmiştir. Aylık uzun dönem ortalamalarına göre göl seviyesi Nisan ayında yaklaşık 981,90 m ile en yüksek, Eylül ayında ise yaklaşık 981,56 m ile en düşük düzeye ulaşmakta olup, ortalama mevsimsel salınım yaklaşık 0,34 m'dir. Bu durum göl seviyesinin yıl içerisinde düzenli bir yükselme–alçalma döngüsü sergilediğini, bunun üzerine yıllar arası ve uzun dönemli değişimlerin eklendiğini göstermektedir.

Yağış anomalileri ile göl kot anomalileri arasında 0–24 aylık gecikmelerde güçlü ve pozitif bir ilişki belirlenmemiş; en yüksek mutlak Pearson korelasyon katsayısı 22 aylık gecikmede dahi oldukça zayıf ve negatif kalmıştır ($r = -0,174$; $p = 0,019$). Benzer şekilde, eklenik yağış sapması ile göl kot anomalisi arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir ($r = -0,077$; $p = 0,272$). Aynı aya ait yağış anomalisi ile aylık göl kotu değişimi arasında ise pozitif ancak zayıf bir ilişki saptanmıştır ($r = 0,148$; $p = 0,035$). Gecikmeli analizlerde güçlü ve pozitif bir ilişkinin ortaya çıkmaması, Acıgöl seviyesindeki değişimlerin aylık yağış değişimleriyle tek başına açıklanamadığını göstermektedir. Bu durum yağış istasyonunun temsil kabiliyeti, buharlaşma ve sistemdeki depolanma etkilerinin yanı sıra, göl seviyesinin bölgesel yeraltısuyu sistemiyle ilişkisinin de değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Göl seviye kayıtları (1999–2016) ile yeraltısuyu seviye kayıtlarının (2015–günümüz) yeterli süre boyunca eş zamanlı olmaması nedeniyle, göl ve yeraltısuyu seviyeleri arasındaki uzun dönemli zamansal ilişki doğrudan korelasyon analiziyle değerlendirilememiştir. Bununla birlikte, göl seviyesinin 2024 yılında yaklaşık 971 m, 2026 yılında ise yaklaşık 969 m kotunda ölçülmesi, gölde belirgin bir seviye azalmasına işaret etmektedir. DSİ'nin 62555, 62506 ve 62566 numaralı gözlem kuyularında 2015–2026 döneminde gözlenen yeraltısuyu seviye düşüşleri de bölgesel yeraltısuyu sisteminde önemli değişimlerin gerçekleştiğini göstermektedir.

Temmuz 2024 arazi ölçümleri, göl ile çevresindeki yeraltısuyu sistemi arasındaki olası hidrolik ilişkiye ilişkin daha doğrudan bir gösterge sunmaktadır. Acıgöl su seviyesi yaklaşık 971 m kotunda iken, gölün 2,5 km batısında yeraltısuyu seviye kotu yaklaşık 975,0 m, 1,1 km güneyindeki 56650 numaralı kuyuda 981,2 m ve 3,2 km güneydoğusundaki 62555 numaralı kuyuda 982,7 m olarak ölçülmüştür. Bu hidrolik yük dağılımı, mevcut gözlem noktaları ile göl arasında göle yönelimli yeraltısuyu akımını destekleyebilecek bir hidrolik gradyanın bulunabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, kuyu sayısının ve mekânsal dağılımının sınırlı olması nedeniyle bu ölçümlerden bölgesel yeraltısuyu akım

yönünün kesin olarak belirlenmesi veya yeraltısuyundan göle gerçekleşen akım miktarının hesaplanması mümkün değildir.

Hidrojeokimyasal bulgular da göl çevresindeki yeraltısularında hidrojeokimyasal farklılaşma bulunduğunu göstermektedir. Önceki bir çalışmada Na–Cl–HCO_3 tipi olarak sınıflandırılan Acıgöl suyu [4], bu çalışma kapsamında yaklaşık 89.000 µS/cm elektriksel iletkenliğe sahip Na–Cl tipi su olarak belirlenmiştir. Gölün doğusundaki yeraltısuları yaklaşık 1.000 µS/cm elektriksel iletkenlik ve Ca–HCO_3 su tipiyle karakterize edilirken, batısındaki yeraltısularında elektriksel iletkenliğin 4.000 µS/cm'nin üzerine çıktığı ve mineralizasyonun arttığı belirlenmiştir. Gölün doğusu ve batısında gözlenen bu hidrojeokimyasal farklılaşma, Acıgöl'ün tek ve homojen bir yeraltısuyu sistemi içerisinde değerlendirilmesinin yeterli olmayabileceğini ve göl çevresinde farklı hidrojeolojik özelliklere sahip yeraltısuyu dolaşım bileşenlerinin bulunabileceğini düşündürmektedir.

Volkanik göllerde göl seviyesi, beslenim ve boşalım bileşenleri arasındaki su bütçesi tarafından kontrol edilmekte; buharlaşma ve yeraltısuyu alışverişi göl seviyesinin değişiminde önemli rol oynamaktadır [5] [6]. Acıgöl'ün yaklaşık 3,2 km²'lik drenaj alanı, belirgin ve sürekli bir yüzeysel akarsu girdisinin bulunmaması, yağış–göl seviyesi ilişkisinin zayıf olması ve Temmuz 2024'te çevrede ölçülen yeraltısuyu hidrolik yüklerinin göl seviyesinden yüksek olması birlikte değerlendirildiğinde, yeraltısuyu alışverişinin göl su bütçesinde araştırılması gereken önemli bir bileşen olduğu ortaya çıkmaktadır. Ancak mevcut bulgular, yeraltısuyu katkısının miktarını veya gölün bölgesel yeraltısuyu dolaşım sistemi içerisindeki kesin hidrojeolojik konumunu belirlemek için yeterli değildir.

Bu bulgular Acıgöl ile çevresindeki yeraltısuyu sistemi arasında olası bir hidrolik bağlantıya işaret etmekle birlikte, göl çevresindeki hidrolik yük dağılımının daha ayrıntılı belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla gölün doğu, batı, kuzey ve güneyinde farklı hidrostratigrafik birimleri temsil eden gözlem kuyularının oluşturulması, bu kuyularda göl seviyesiyle eş zamanlı ve uzun süreli yeraltısuyu seviye izlemesinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Böyle bir gözlem ağı ile eşpotansiyel haritalarının oluşturulması, göl–akifer arasındaki hidrolik gradyanların belirlenmesi ve yeraltısuyunun gölü besleyen veya belirli dönemlerde gölden beslenen bir bileşen olup olmadığının nicel olarak değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Acıgöl'ün 2016 yılı batimetrik verilerinden oluşturulan kot–alan–hacim ilişkileri, göl çanağının seviye değişimlerine verdiği morfometrik tepkinin yükseltiye bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Göl yüzey alanı 969 m kotunda 0,991 km² ve hacmi 49,10 hm³ iken, 982 m kotunda yüzey alanı 1,087 km²'ye, hacmi ise 62,44 hm³'e ulaşmaktadır. Buna göre 969–982 m arasındaki 13 m'lik kot farkında göl hacmi yaklaşık 13,34 hm³ (%27,2) değişirken, göl yüzey alanındaki değişim yaklaşık 0,096 km² (%9,7) düzeyindedir. Bu farklılık, göl seviyesindeki düşey değişimin kıyı konumuna etkisinin çanağın farklı kotlarında aynı olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, 969–978 m kotları arasında her 1 m'lik göl seviyesi değişimine karşılık su yüzey alanındaki değişim ortalama yaklaşık 0,0049 km² (0,49 ha) düzeyindeyken, 981–982 m arasında 1 m'lik seviye değişimi yaklaşık 0,0238 km² (2,38 ha) yüzey alanı değişimine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla Acıgöl çanağının düşük kotlardaki görece dik geometrisi, önemli düşey seviye değişimlerine karşın yüzey alanı ve kıyı konumundaki değişimin görece sınırlı kalmasına neden olurken, üst kotlarda çanağın genişlemesi aynı büyüklükteki seviye değişiminin daha geniş bir alana yansımasına neden olmaktadır. Bu nedenle Acıgöl'de kıyı çizgisine esas alınacak su kotunun değerlendirilmesinde, yalnızca kot değerinin değil, bu kotun göl çanağında karşılık geldiği morfometrik ve jeomorfolojik koşulların da dikkate alınması önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Acıgöl'ün Ekim 1999–Eylül 2016 dönemi kayıtlarında yağış ile göl seviyesi arasında güçlü ve pozitif bir ilişki belirlenmemesi, göl seviyesindeki değişimlerin yalnızca doğrudan yağış girdisiyle açıklanamadığını göstermektedir.

Bununla birlikte, Temmuz 2024'te göl çevresinde ölçülen yeraltısuyu hidrolik yüklerinin göl seviyesinden yüksek olması, göl–yeraltısuyu etkileşiminin dikkate alınması gereken bir hidrojeolojik bileşen olduğunu göstermektedir. Ancak mevcut gözlem ağı, bu ilişkinin yönünün ve büyüklüğünün bölgesel ölçekte nicel olarak belirlenmesi için yeterli değildir.

Batimetrik veriler, göl seviyesindeki aynı büyüklükteki düşey değişimin kıyı üzerindeki etkisinin göl çanağının farklı kotlarında değiştiğini göstermektedir. Bu farklılık, Acıgöl'de kıyı çizgisinin seviye değişimlerine verdiği mekânsal tepkinin yalnızca su kotuna değil, ilgili kot aralığındaki çanak geometrisine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Mevcut mevzuat yaklaşımında tabii göllerde kıyı çizgisine esas alınan maksimum su seviyesinin Acıgöl açısından değerlendirilmesinde, bu kotun hangi gözlem dönemini ve hangi hidrolojik–hidrojeolojik koşulları temsil ettiğinin ortaya konulması önem taşımaktadır. Gözlenen 1,42 m'lik seviye aralığı, mevsimsel değişimler, çevredeki yeraltısuyu hidrolik yükleri ve göl çanağının yükseltiye bağlı değişen morfometrik özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, yalnızca belirli bir tarihte gözlenen su sınırının veya hidrolojik temsil gücü ortaya konulmamış bir maksimum kotun Acıgöl'ün doğal seviye değişim rejimini açıklamak için yeterli olmayabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle Acıgöl'de kıyı çizgisi ve buna bağlı kıyı kenar çizgisinin değerlendirilmesinde, maksimum su kotunun yanı sıra bu kotu oluşturan hidrolojik ve hidrojeolojik süreçler ile kıyının jeomorfolojik özelliklerinin birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Bu bütünleşik yaklaşım, Acıgöl'de kıyı çizgisine esas alınacak su seviyesinin hidrolojik ve hidrojeolojik temsil gücünün değerlendirilmesine ve buna bağlı kıyı kenar çizgisi çalışmalarına bilimsel altlık sağlayacaktır.

Mevcut veri eksikliklerinin giderilmesi göl seviyesindeki değişimlerin meteorolojik ve hidrojeolojik bileşenlerinin daha güvenilir biçimde ayrıştırılmasına ve kıyı çizgisine esas alınacak su seviyesinin hidrolojik temsil gücünün daha sağlam bir bilimsel altlık üzerinden değerlendirilmesini mümkün kılacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Kıyı Kanununun Uygulanmasına Dair 4/4/1990 tarih ve 3621 sayılı Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân BakanlığıTürkiye: 1990.

[2] Winter TC. Ground water and surface water : a single resource. US Geological Survey; 1999.

[3] Mazor E. Chemical and isotopic groundwater hydrology. ; 2004.

[4] Akar AU, Sisman S, Ulku H, Yel E, Yalpir S. Evaluating lake water quality with a GIS-based MCDA integrated approach: a case in Konya/Karapınar. Environmental Science and Pollution Research 2024;31:19478–99. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32184-6.

[5] Rouwet D, Christenson B, Tassi F, Vandemeulebrouck J. Volcanic lakes. Springer Berlin Heidelberg; 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2.

[6] Chikita KA, Nishi M, Fukuyama R, Hamahara K. Hydrological and chemical budgets in a volcanic caldera lake: Lake Kussharo, Hokkaido, Japan. J Hydrol (Amst) 2004;291:91–114. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.014.

Bartın Yeraltısuyu Alt Havzası'nda Yeraltısuyu Bilançosunun Belirlenmesi: Farklı Yöntemlerin Karşılaştırmalı Analizi

Mercan UYAR
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
muyar@alter.com.tr

Elçim Gülbahar ERİN
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
eerin@alter.com.tr

Osman DÜĞENCİ
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
odugenci@alter.com.tr

İhsan TAŞKIN
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
taskinihsan@gmail.com

Nezih Burak AKAR
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
nezihburakakar@dsi.gov.tr

Sermin KOÇER
DSİ Genel Müdürlüğü, Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 06530 Ankara
sozsayin@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: Bartın YAS Alt Havzası, yeraltısuyu bilançosu, beslenim, hidrojeolojik kavramsal model

1. Amaç

Batı Karadeniz Havzası içerisinde yaklaşık 2.194 km² alan kaplayan Bartın Yeraltısuyu (YAS) Alt Havzası, sedimanter ve volkanik kayaçlar ile Kuvaterner yaşlı alüvyonların birlikte bulunduğu heterojen bir jeolojik yapıya sahiptir. Akarsu vadileri boyunca gelişen alüvyonlar taneli akiferleri, Yemişliçay Formasyonunun volkanik seviyeleri kırıklı-çatlaklı akiferleri, İnaltı ve Akveren formasyonları ile Sunduk Kireçtaşı Üyesinin karbonatlı seviyeleri ise karstik ve karbonatlı akiferleri oluşturmaktadır. Karbonatlı birimlerde karstlaşma derecesi ve düşük geçirimli ara seviyeler; volkanik birimlerde kırık-çatlak gelişimi; alüvyonlarda ise tane boyu dağılımı ve kalınlık değişimleri akifer özelliklerini belirlemektedir. Karstik alanlardaki yoğunlaşmış beslenim, kaynak boşalımları ve kütleler arası yeraltısuyu geçişleri, bilanço hesaplarının jeolojik ve hidrojeolojik kavramsal modelle birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. [1]
Bu çalışmada, Bartın YAS Alt Havzası'nda yeraltısuyu bilançosu ve bileşenlerinin belirlenmesinde kullanılan yedi yaklaşımın uygulamaları ve sonuçları sunulmakta, bu yaklaşımların alt havzanın jeolojik ve hidrojeolojik koşullarına uygunluğu değerlendirilmektedir. Amaç, farklı yöntemlerle hesaplanan beslenim, boşalım ve rezerv değişimlerini akifer özellikleriyle birlikte ele alarak yöntem seçimini etkileyen unsurları ortaya koymaktır. Bu kapsamda, havza ölçeğindeki su bütçesi hesapları ile karstik kütlelere özgü analizlerin birlikte değerlendirilmesinin yeraltısuyu potansiyelinin belirlenmesine katkısı incelenmiştir.

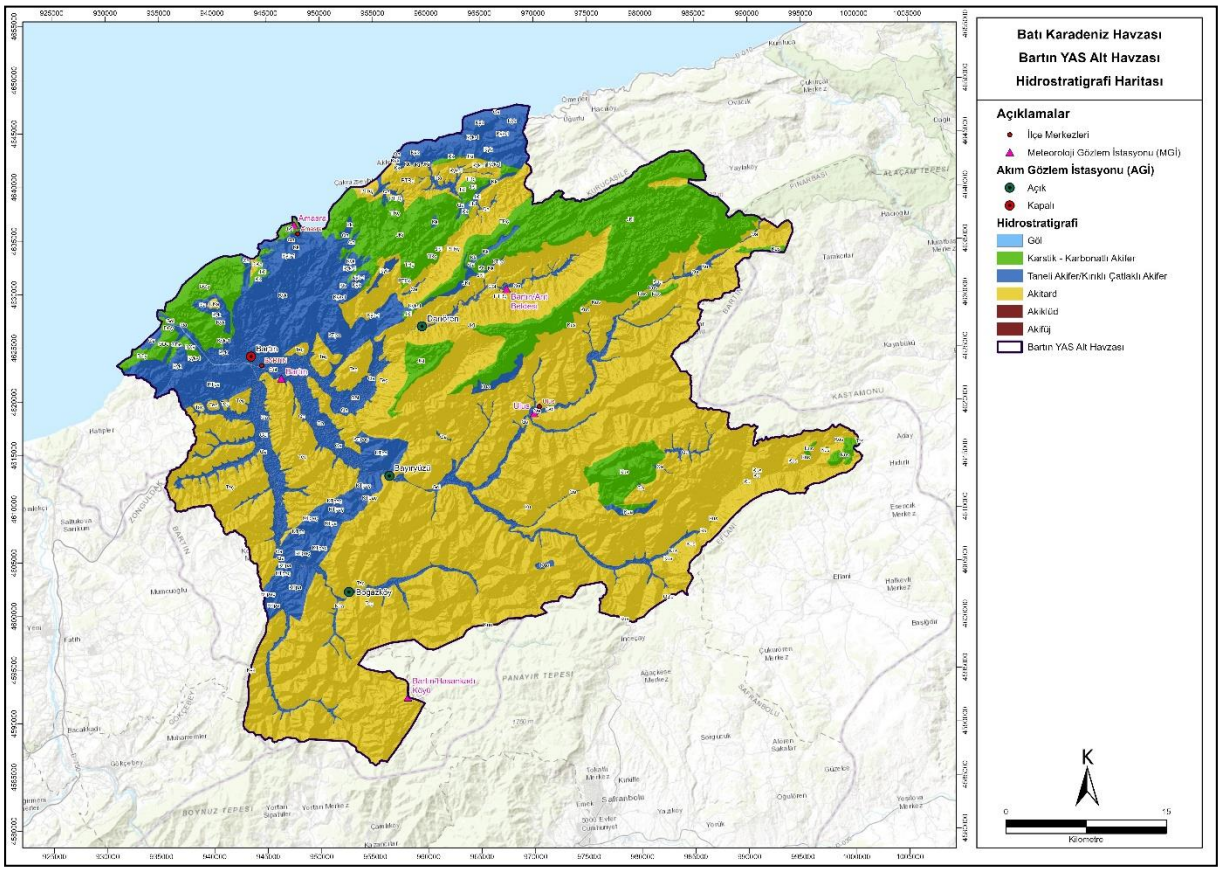
2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada jeoloji ve hidrostratigrafi haritaları, jeolojik birimlerin yüzey alanları ve litolojik özellikleri, yeraltısuyu kütle sınırları, topografik veriler, eğim, arazi kullanımı ve hidrolojik toprak gruplarına ilişkin veriler kullanılmıştır. Meteoroloji gözlem istasyonlarına ait yağış ve sıcaklık kayıtları ile buharlaşma-terleme hesapları, su bütçesinin iklimsel bileşenlerini oluşturmuştur. Kaynak debileri, akım gözlem istasyonu kayıtları, yeraltısuyu seviye ölçümleri, kuyu tahsis bilgileri ve yeraltısuyu kimyasal analizleri ise beslenim–boşalım ilişkilerinin ve akifer davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır [1].

Alt havza içerisinde 5 MGİ ve 4 AGİ (3 açık, 1 kapalı) bulunmaktadır. Yağışın alansal dağılımında temsil edici veri sunan 12 MGİ değerlendirilmiş; Hesaplamalarda çevre istasyonlar da kullanılmıştır. Havzada yağış–yeraltısuyu seviyesi ilişkisini incelemeye elverişli uzun dönemli kuyu kaydı bulunmadığından bu ilişki nicel olarak değerlendirilmemiştir [1].

Akım serilerinde 2014–2019 ölçümleri doğallaştırılıp korelasyonla uzatılmış; ölçümü bulunmayan 2020 akımı, yağış–akış ilişkisine göre 0,98 katsayısıyla korele edilmiştir. MGİ kayıtlarının başlangıçları farklı olduğundan tüm yöntemler özdeş ham veri aralığına sahip değildir: ana hidrolojik bütçe için 2014–2020 yıllık ortalamaları kullanılırken, Maillet hesabı seçili 2015–2019 çekilme dönemlerine dayanır [1].

Meteorolojik verilerin alansal dağılımı Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında değerlendirilmiş; jeolojik birimler, toprak ve arazi kullanımı özellikleri ile birlikte su bütçesi hesaplarına aktarılmıştır. Karstik kütlelerde kireçtaşı yayılımı, eğim ve kapalı drenaj alanları dikkate alınmış; kaynak rasatları çekilme dönemlerinin ve boşalım davranışının belirlenmesinde kullanılmıştır. Klorür kütle dengesi hesabında yeraltısuyu örneklerinin klorür derişimleri esas alınmış; çalışma alanına ait yağış kimyası ölçümleri bulunmadığından, yağmur ve kar suyu klorür değerleri yakın çevredeki Sarma Deresi Havzası için yayımlanmış çalışmadan alınmıştır [1, 3].



Şekil 1. Bartın YAS Alt Havzası topoğrafyası, hidrostratigrafik birimleri ile MGİ ve AGİ konumları [1]

Tablo 1. Çalışmada kullanılan gözlem verilerinin kapsamı, dönemi ve zamansal çözünürlüğü

Veri grubu	Gözlem noktası	Dönem	Zamansal çözünürlük
Meteoroloji	12 istasyon	2014–2020	Aylık
Akım	E13A031 Kocaırmak–Bartın	2014–2019	Günlük
Kaynak debisi	9 kaynak	2014–2020	Aylık
Yeraltısuyu seviyesi	7 gözlem kuyusu	Ekim 2020–Ağustos 2022	Üç aylık; 8 dönem

Yeraltısuyu bilançosu ve bileşenleri; yağıştan süzülme, Thornthwaite–Mather su dengesi, klorür kütle dengesi, SCS-CN eğri numarası, yıllık yeraltısuyu beslenim katsayısı (AGRC), Maillet kaynak çekilme eğrileri ve baz akım analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Yağıştan süzülme yönteminde jeolojik birimlerin alanları, yağış miktarları ve süzülme katsayıları; Thornthwaite–Mather yönteminde meteorolojik verilerle oluşturulan su dengesi; klorür kütle dengesinde ise yağış ve yeraltısuyu klorür derişimleri kullanılmıştır. SCS-CN tabanlı hesaplamada toprak ve arazi kullanımı verileriyle belirlenen yüzeysel akış, yağış ve gerçek buharlaşma-terleme bileşenleriyle birlikte değerlendirilerek beslenim hesaplanmıştır [1, 2–4].

SCS-CN uygulamasında gerçek buharlaşma–terleme, CN denklemiyle doğrudan hesaplanmamış; MGİ yağış ve sıcaklık verilerinden Thornthwaite–Mather aylık su dengesiyle bulunan değerler girdi olarak kullanılmıştır. Bu hesapta sıcaklık ve enlem düzeltmesiyle aylık potansiyel ET belirlenir; yeterli su olduğunda gerçek ET potansiyel ET'ye eşit alınır, yetersiz yağışta mevcut toprak nemi de dikkate alınır. Rapordaki Thornthwaite–Mather havza toplamı 1108,29 hm³/yıl gerçek ET'dir. Bu değer SCS için bağımsız bir ET ölçümü değildir. Proje kapsamında tava buharlaşması için aynı döneme ait ayrı bir sayısal seri bulunmadığından gerçek ET ile tava buharlaşmasının nicel karşılaştırması yapılamamıştır [1, 2].

Karstik akiferlerde AGRC yaklaşımıyla eğim, kapalı alanlar ve iklimsel bileşenler üzerinden yıllık beslenim hesaplanmış; Maillet kaynak çekilme eğrileriyle kaynakların boşalım katsayıları ve dinamik rezerv değişimleri değerlendirilmiştir. Akarsuya yeraltısuyu katkısı, BFI programında yerel minimum aralık yaklaşımıyla yapılan baz akım analiziyle belirlenmiştir. Bilanço hesabında yağıştan beslenimin yanı sıra komşu havzadan gelen beslenim, kaynak boşalımları ve kuyu tahsisleri de dikkate alınmıştır. Kayıt dışı kuyu kullanımını temsil etmek üzere tahsis miktarlarına havzadaki kullanıma göre belirlenen %10 ilave edilmiştir [1, 4]. Yöntemlerin uygunluğu; akifer türü, uygulama ölçeği, kullanılan veriler ve temel kabuller çerçevesinde karşılaştırılmış; beslenim, boşalım ve rezerv değişimini ifade eden sonuçların farklı bilanço bileşenlerini temsil ettiği gözetilmiştir.

3. Değerlendirme

Havzada Alansal Yağış Hesabı, İzohiyet, Ters Ağırlıklı Mesafe İnterpolasyon (IDW) Yöntemi ve Thiessen Poligonları yöntemleri kullanılarak yağış değerleri hesaplanmıştır. Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kapsamında hesaplanan yağış değerleri

Alan (km^2)	Toplam Yağış (mm)				
	Alansal Yağış Dağılımı	İzohiyet	Jeoistatistiksel Yöntem (IDW)		Thiessen Poligonları
2194,06	-	-	En Düşük	618,87	-
			En Yüksek	1252,5	
	825,31	957,43	Ortalama	871,39	991,48

Havzada gerçek buharlaşma-terleme hesaplamalarında Turc, Thornthwaite ve Yağış-Akış Ölçümleri yöntemleri kullanılmıştır. Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmada kapsamında hesaplanan gerçek buharlaşma değerleri

Gerçek Buharlaşma (Et_r)		
Thornthwaite (hm^3/yıl)	Turc (hm^3/yıl)	Yağış-Akış Ölçümleri Yöntemi (hm^3/yıl)
1108,76	1263,24	894,9

Havza ölçeğinde yıllık beslenim;

- Yağıştan süzülme yöntemiyle 234,57 hm³,
- Thornthwaite–Mather yöntemiyle 217,06 hm³,
- Klorür kütle dengesiyle 298,25 hm³,

- SCS-CN tabanlı su bütçesiyle 507,26 hm³
- Baz akım analiziyle 398,21 hm³ olarak hesaplanmıştır [1].

Sonuçlar arasındaki belirgin farklılık, yöntemlerin hidrolojik süreçleri farklı kabullerle temsil ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu değerler tek başına bir doğruluk sıralaması oluşturmaz; daha yüksek veya daha düşük bir beslenim tahmini, yöntemin sahaya daha uygun olduğunu kanıtlamaz.

Yağıştan süzülme yaklaşımı, litolojik birimlerin farklı geçirimlilik özelliklerini hesaplara yansıtması bakımından yararlıdır. Ancak bir formasyonun tamamına atanan katsayı, aynı birim içerisindeki karstlaşma, kırık-çatlak yoğunluğu ve örtü özelliklerinin değişimini sınırlı ölçüde temsil edebilir. Özellikle alüvyonlarda tane boyu ve kalınlık değişimleri ile akarsu-akifer ilişkisi; karbonatlı birimlerde ise yoğunlaşmış beslenme alanları, katsayıların değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdır.
Thornthwaite–Mather yaklaşımı mevsimsel su dengesinin değerlendirilmesine olanak sağlamakla birlikte, su fazlasının yüzeysel akış ve yeraltısuyu beslenimi arasında nasıl paylaştırıldığına duyarlıdır. Karstik alanlarda hızlı süzülme ve yanal yeraltısuyu geçişleri, iklimsel su dengesiyle birlikte ayrıca ele alınmalıdır.

Klorür kütle dengesi yaklaşımında ise yerel yağış kimyası ölçümleri yerine yakın bir havzadan alınan yağmur ve kar suyu klorür değerlerinin kullanılması, mekânsal temsil açısından belirsizlik oluşturmaktadır. Yeraltısuyundaki klorürün yalnızca yağıştan kaynaklandığı varsayımının geçerliliği de yöntemin uygunluğunu belirleyen temel koşullardan biridir [1].

SCS-CN tabanlı su bütçesi, toprak ve arazi kullanımı farklılıklarının mekânsal olarak değerlendirilmesini sağlamış ve havza geneli için esas alınmıştır. Ancak yüzeysel akışın temsil edilmesi, derin yeraltısuyu dolaşımının ve karstik bağlantıların aynı ayrıntıyla açıklandığı anlamına gelmemektedir. Bu nedenle 507,26 hm³/yıl beslenim tahmininin değerlendirilmesinde, karbonatlı birimlerdeki yoğunlaşmış beslenim ve havza sınırlarını aşan yeraltısuyu hareketi de dikkate alınmalıdır.

SCS-CN yaklaşımıyla belirlenen 507,26 hm³/yıl yağıştan beslenime, Karabük YAS Alt Havzası'ndan gelen 28,87 hm³/yıl beslenim eklenerek toplam beslenim 536,13 hm³/yıl olarak hesaplanmıştır. Kaynak boşalımları ve kuyu tahsisleriyle temsil edilen çıkışlar dikkate alındığında bilanço farkı 377,08 hm³/yıl olarak belirlenmiştir [1]. Bu fark, hesapta kullanılan bileşenler ve kabuller çerçevesindeki yıllık dengeyi ifade etmekte olup akiferlerin kullanılabilir verimi değerlendirilirken hidrojeolojik koşullarla birlikte ele alınmalıdır.

Karstik yeraltısuyu kütleleri ölçeğinde yıllık beslenim;

- AGRC yaklaşımı ile Bahçecik Yeraltısuyu Kütlesi için 53,56 hm³/yıl
- Maillet kaynak çekilme analizi ile Karaköyşeyhler Yeraltısuyu Kütlesi için 35,53 hm³/yıl

olarak hesaplanmıştır.

Karstik kütlelerde AGRC yaklaşımı eğim ve kapalı drenaj alanlarını dikkate alması, Maillet kaynak çekilme analizi ise depolama ve boşalım davranışını kaynak debileri üzerinden değerlendirmesi bakımından tamamlayıcıdır. Bununla birlikte, topografik veya tanımlanmış kütle sınırları kaynakların gerçek beslenme alanlarıyla çakışmayabilir. Karaköyşeyhler kütlesinde hesaplanan beslenimin boşalımdan düşük olması, Batı Küre Dağları kütlesinden kırık-çatlak ve fay sistemleri boyunca gerçekleşebilecek beslenimle ilişkilendirilmiştir [1]. Bu durum, negatif bilanço farklarının yorumlanmasında olası dış beslenimin ve sınır tanımının incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bartın YAS Alt Havzası'nda taneli, kırıklı-çatlaklı ve karstik akiferlerin birlikte bulunması, yeraltısuyu bilançosunun tek bir yöntemle bütün hidrojeolojik süreçleri kapsayacak biçimde temsil edilmesini güçleştirmektedir. Yöntem uygunluğu; akifer türü, beslenme alanı sınırları ve jeolojik unsurlarla belirlenen yeraltısuyu akımı birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir. Bu nedenle yöntem seçiminin,

hesaplanan beslenim miktarının büyüklüğünden önce hidrojeolojik kavramsal modelle tutarlılığına dayanması gerekmektedir.

Havza genelinde SCS-CN tabanlı su bütçesi, mekânsal farklılıkların değerlendirilmesi için bir hesaplama çerçevesi sunarken, yağıştan süzülme, Thornthwaite–Mather ve klorür kütle dengesi sonuçları farklı kabullerin etkisini ortaya koyan karşılaştırma araçları olarak kullanılabilir. Bu yaklaşımların birlikte değerlendirilmesi, tek bir değerin kesin beslenim miktarı olarak yorumlanması yerine, sonuçları etkileyen belirsizliklerin ve bunların kaynaklarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Kullanılan verilerin dönem ve alan bakımından uyumlu olması, bu karşılaştırmanın anlamlı yapılabilmesi açısından önemlidir.

Karstik kütlelerde güvenilir bilanço değerlendirmesinin öncelikli koşulu, kaynakların gerçek beslenme alanları ile kütleler arası hidrolik bağlantıların açıklanmasıdır. AGRC ve Maillet kaynak çekilme analizleri bu kapsamda birbirini tamamlayabilir; ancak her iki yaklaşımın sonuçları da kütle sınırları ve dış beslenim olasılıklarıyla birlikte yorumlanmalıdır. Beslenim ile boşalım arasındaki uyumsuzluklar, yalnızca yöntem yetersizliği veya rezerv azalması olarak değerlendirilmeden önce, komşu sistemlerden gelen akımlar ve hesaplara dahil edilmeyen bileşenler bakımından incelenmelidir.

Baz akım, kaynak boşalımı, beslenim ve depolama değişiminin birbirinden ayrılması, bilanço sonuçlarının doğru yorumlanması için gereklidir. Özellikle akarsuya ulaşan kaynak sularının baz akım içerisinde de temsil edilebilmesi, bileşenlerin birlikte kullanımında mükerrer hesap riskini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca pozitif bir bilanço farkı, tek başına aynı miktarda yeraltısuyunun sürekli çekilebileceği anlamına gelmez; su teminine yönelik değerlendirmelerde kaynak ve akarsu akımlarının devamlılığı ile akiferin çekime vereceği tepki de dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, Bartın YAS Alt Havzası için havza ölçeğindeki su bütçesinin, akifer türüne özgü analizler ve jeolojik-hidrojeolojik kavramsal model çerçevesinde birlikte değerlendirilmesi uygun görülmektedir. Yerel yağış kimyasının belirlenmesi, kaynak debisi kayıtlarının sürekliliğinin sağlanması ve karstik beslenme alanlarının ayrıntılandırılması, yöntemlerin uygulanabilirliğini geliştirecek öncelikli çalışmalardır. Bu yaklaşım, bilanço belirsizliklerinin azaltılmasına ve yeraltısuyu kaynaklarının hidrojeolojik koşullarla uyumlu biçimde planlanmasına katkı sağlayacaktır.

5. Kaynaklar

[1] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). Batı Karadeniz Havzası Yeraltısuyu Planlama (Hidrojeolojik Etüt) Raporu Yapılması ve Yaptırılması İşi: 13-07 Bartın Yeraltısuyu Alt Havzası Hidrojeolojik Etüt Raporu. Bölüm 4, 6 ve 7.

[2] Thornthwaite, C. W. ve Mather, J. R. (1955). The Water Balance. Publications in Climatology, 8(1), 1–104.

[3] Pehlivan, R. (2016). Sarma Deresi Havzasındaki Yağışın Ayrışma ve Su Kalitesine Etkisi, Düzce, Türkiye. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 40(1), 103–121. https://doi.org/10.24232/jeoloji-muhendisligi-dergisi.295415

[4] Allocca, V., Manna, F. ve De Vita, P. (2014). Estimating annual groundwater recharge coefficient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy). Hydrology and Earth System Sciences, 18, 803–817. https://doi.org/10.5194/hess-18-803-2014.

Yeraltısuyu Sistemi Bütçelerinin Değerlendirilmesi: Kızılırmak Havzası Örneği

Nesrin TÜFEKÇİ AVŞAR*
Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti.,
Çukurambar Mah., 1480 Sokak Besa Kule İş Merkezi 2A Blok Kat :4 No: 11, 06530, Çankaya, Ankara
Orcid no: 0000-0002-6585-8572
n.tufekci@fugro.com

Mehmet EKMEKÇİ
Hacettepe Üniv., Uluslararası Karst Su Kayn. Uyg. ve Araş. Merkezi., 06800, Beytepe, Ankara
Orcid no: 0000-0002-6729-7457
ekmekci@hacettepe.edu.tr

Ayça AYDIN SÜREL
Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti.,
Çukurambar Mah., 1480 Sokak Besa Kule İş Merkezi 2A Blok Kat :4 No: 11, 06530, Çankaya, Ankara
a.aydin@fugro.com

Çidem ARGUNHAN ATALAY
Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti.,
Çukurambar Mah., 1480 Sokak Besa Kule İş Merkezi 2A Blok Kat :4 No: 11, 06530, Çankaya, Ankara
Orcid no: 0009-0004-6056-5051
c.atalay@fugro.com

Merve İŞLEK
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
merveislek@dsi.gov.tr

Nezih Burak AKAR
DSİ Genel Müdürlüğü, Planlama, Projelendirme ve Tahsis Şube Müdürlüğü
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
nezihburakakar@dsi.gov.tr

Sermin KOÇER
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
sozsayin@dsi.gov.tr

İsmail SEVIM
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
ismailsevim@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler: baz akım, HYSEP, yeraltısuyu-yüzey suyu etkileşimi, kavramsal hidrojeolojik model, Kızılırmak Havzası

1. Amaç

Yeraltısuyu-yüzey suyu etkileşiminin önemli bileşenlerinden biri olan baz akım, genel olarak yeraltısuyunun akarsu sistemine gecikmeli katkısı ile ilişkilidir. Akım hidrograflarının baz akım ve yüzeysel akış bileşenlerine ayrılması bu katkının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bununla birlikte baz akım doğrudan ölçülen bir büyüklük olmayıp, hidrograf ayrımı farklı akım yollarının katkısını tek tek ayırt etmemektedir [2]. Bu nedenle hidrograf ayrımı sonuçlarının havzanın hidrojeolojik yapısı ve kavramsal hidrojeolojik modeli ile birlikte değerlendirilmesi, sistemin hidrodinamik yapısının anlaşılması açısından önemli bilgiler sağlamaktadır.

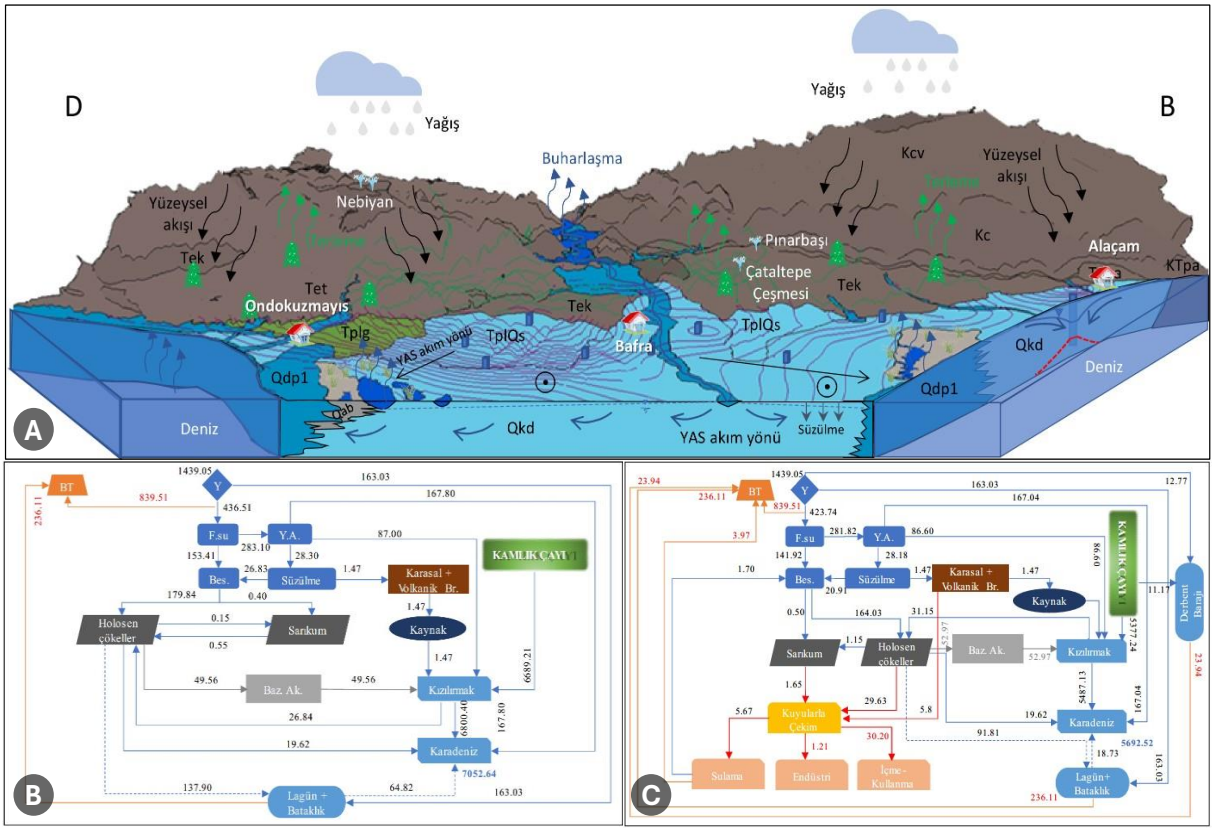
Bu çalışmanın amacı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı (DSİ) adına yürütülen Kızılırmak Havzası Hidrojeolojik Etüt Projesi çalışmaları kapsamında tanımlanan yeraltısuyu (YAS) sistemlerinin kavramsal modellerinde hesaplanan akifer-akarsu boşalım bileşenlerini membadan mansaba kümülatif olarak değerlendirerek, uygun konumdaki akım gözlem istasyonlarında (AGİ) HYSEP [1] ile hesaplanan baz akımlarla karşılaştırmaktır. YAS sistemlerinde hesaplanan baz akım ile akarsuya ulaşan kaynak boşalımlarını da içeren toplam YAS-akarsu katkısı işletme öncesi (doğal koşullar) ve işletme sonrası koşullar için ayrı değerlendirilmiş olup iki yaklaşım arasındaki hidrolojik tutarlılığın hidrolojik havza alanı ölçeğine bağlı değişimi de ayrıca incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Yeraltısuyu Sistemlerinin Kavramsal Modelleri ve Su Bütçeleri

Kızılırmak Havzası hidrojeolojik etüt çalışmaları kapsamında hidrolojik özellikler, AGİ'lerin konumu ve uzun dönem akım gözlemleri dikkate alınarak 27 yüzey suyu alt havzasına ayrılmıştır. Bu alt havzalar içerisinde akifer yayılımı, yeraltısuyu akım yönleri, hidrolojik ve hidrojeolojik sınırlar, yüzey suyu–yeraltısuyu ilişkileri, su yapıları ve yeraltısuyu kullanımları birlikte değerlendirilerek YAS sistemleri tanımlanmış, beslenim-boşalım ilişkileri işletme öncesi ve işletme sonrası koşullar için ayrı kavramsallaştırılmıştır (Şekil 1). Sistemler arasındaki ilişkiler havza genelinde membadan mansaba doğru değerlendirilmiştir.

Aylık yağış ve sıcaklık verilerinden hidrolojik bütçenin buharlaşma-terleme ve fazla su bileşenlerinin hesaplanmasında Thornthwaite tabanlı USGS aylık su bütçesi modeli kullanılmıştır [3]. Modelde toplam akış ve doğrudan yüzeysel akış bileşenleri hesaplanmaktadır. Uygun AGİ verisinin bulunduğu alt havzalarda model parametreleri, hesaplanan toplam akışın AGİ'de gözlenen toplam akımla ve hesaplanan doğrudan yüzeysel akışın HYSEP [1] ile hidrograf ayrımı sonucunda elde edilen yüzeysel akış bileşeniyle uyumu dikkate alınarak kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon, proje kapsamında fazla suyun yüzeysel akış ve YAS beslenimine katkı sağlayan bileşenlere ayrımının belirlenmesine temel oluşturmuştur.



Şekil 1. A) Alt havza genel kavramsal model örneği (Bafra Alt Havzası), B) işletme öncesi YAS sistemi kavramsal modeli, C) işletme sonrası YAS sistemi kavramsal modeli (Bafra YAS sistemi).

YAS sistemlerinin kavramsal modellerindeki bütçe bileşenlerinin sayısallaştırılmasında DSİ kayıtları ve arazi çalışmalarından elde edilen kuyu ve kaynak verileri, yeraltısuyu seviyeleri, pompa testleri, tahsis ve kullanım bilgileri ile baraj ve gölet verileri kullanılmıştır. Akiferler arası geçişler hidrolik yük ve mevcut akifer parametreleri kullanılarak değerlendirilmiş; ölçüm bulunmayan durumlarda ilgili hidrojeolojik birimi temsil eden değerlerden yararlanılmıştır. İşletme sonrası bütçelerde yeraltısuyu çekimleri, sulama kullanımları ve geri dönüşleri ile veri bulunan su yapılarının işletme etkileri dikkate alınmıştır. YAS sistemlerinin kavramsal modellerindeki baz akım, bilinen beslenim ve boşalım bileşenleri sonrasında sistem bütçesinin dengelenmesini sağlayan YAS-akarsu boşalımı olarak değerlendirilmiştir.

2.2. Hidrograf Ayrımı ve Akım Gözlem İstasyonlarının Seçimi

HYSEP (Hydrograph Separation Program), USGS tarafından geliştirilen ve günlük akım hidrograflarını baz akım ve yüzeysel akış bileşenlerine ayıran ampirik bir hidrograf ayrım programıdır [1]. Program sabit aralık, kayan aralık ve lokal minimum olmak üzere üç farklı hidrograf ayrım yöntemi içermektedir. Bu çalışmada kullanılan lokal minimum yöntemi, drenaj alanına bağlı bir zaman aralığı içerisinde belirlenen yerel minimum akımları doğrusal olarak birleştirerek baz akım hidrografını oluşturmakta; toplam akım ile hesaplanan baz akım arasındaki fark yüzeysel akış bileşeni olarak elde edilmektedir [1]. Proje kapsamında DSİ'den temin edilen 300 AGİ'nin günlük akımları değerlendirilerek hidrograflar baz akım ve yüzeysel akış bileşenlerine ayrılmıştır.

Bu istasyonların tamamı YAS sistemleri için kurulan kavramsal modellerdeki hidrolojik bütçelerle karşılaştırmaya uygun olmadığından AGİ'ler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında akarsu konumu, drenaj alanı ve YAS sistemi çıkışı bakımından değerlendirilmiştir. Ana akarsu kollarında bulunan ve mümkün olduğunca bir YAS sisteminin veya birbirini izleyen sistemlerin çıkışını temsil eden istasyonlara öncelik verilmiştir. USGS aylık su bütçesi modelinde hesaplanan doğrudan yüzeysel akışın HYSEP ile hesaplanan yüzeysel akışa göre kalibrasyonunda kullanılan AGİ'ler ana analiz grubuna alınmamıştır. Ayrıca kısa dönem hidrolojik koşulların etkisini azaltmak amacıyla kullanılabilir akım kayıt süresi 10 yıldan uzun istasyonlar seçilmiştir [4]. Bu ölçütlerin birlikte uygulanmasıyla 18 AGİ ana değerlendirme grubuna alınmıştır.

Bir AGİ'nin birden fazla YAS sisteminin mansabında bulunması durumunda membadaki sistemlerden akarsuya gerçekleşen yerel baz akım katkıları kümülatif olarak toplanmıştır. Bu yaklaşım, yerel baz akım katkılarının membadan taşınan katkılarla birleşerek mansaptaki toplam baz akımı oluşturması yaklaşımıyla uyumludur [5]. Kümülatif hesaplamada yerel YAS-akarsu katkısının mansaptaki kontrol noktasına taşındığı kabul edilmiş, kavramsal bütçelerde temsil edilmeyen kanal kayıpları, ilave yüzey suyu çekimleri ve rezervuar etkileri olası belirsizlik kaynakları olarak değerlendirilmiştir [5].

2.3. Karşılaştırma Yöntemi

Karşılaştırmalar hacimsel birimler üzerinden yapıldığından tüm akımlar hm^3/yıl birimine dönüştürülmüştür. HYSEP ile elde edilen uzun dönem baz akım; (i) doğal koşulları temsil eden işletme öncesi baz akım, (ii) işletme sonrası baz akım, (iii) işletme öncesi baz akım + akarsuya ulaşan kaynak boşalımı ve (iv) işletme sonrası baz akım + kaynak boşalımı ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

İşletme öncesi ve işletme sonrası bütçe bileşenleri ve değerleri belirli gözlem dönemlerini değil, sırasıyla doğal koşulları ve mevcut kullanımların dikkate alındığı kavramsal durumları temsil etmektedir. HYSEP değerleri ise AGİ'lere göre farklı dönemleri kapsayan uzun dönem gözlemlerinden elde edilmiştir. Bu nedenle HYSEP değerleri belirli bir işletme durumunun doğrudan gözlemsel karşılığı olarak kabul edilmemiştir.

HYSEP baz akımları ile YAS sistemi su bütçelerinden hesaplanan baz akım + akarsuya ulaşan kaynak boşalımı arasındaki ilişki doğrusal regresyon ile değerlendirilmiştir. Regresyon katsayılarının %95 güven aralıkları, değişen hata varyansının etkisini dikkate almak amacıyla HC3 heteroskedastisite-tutarlı kovaryans tahmin edicisi kullanılarak hesaplanmıştır [6, 7].

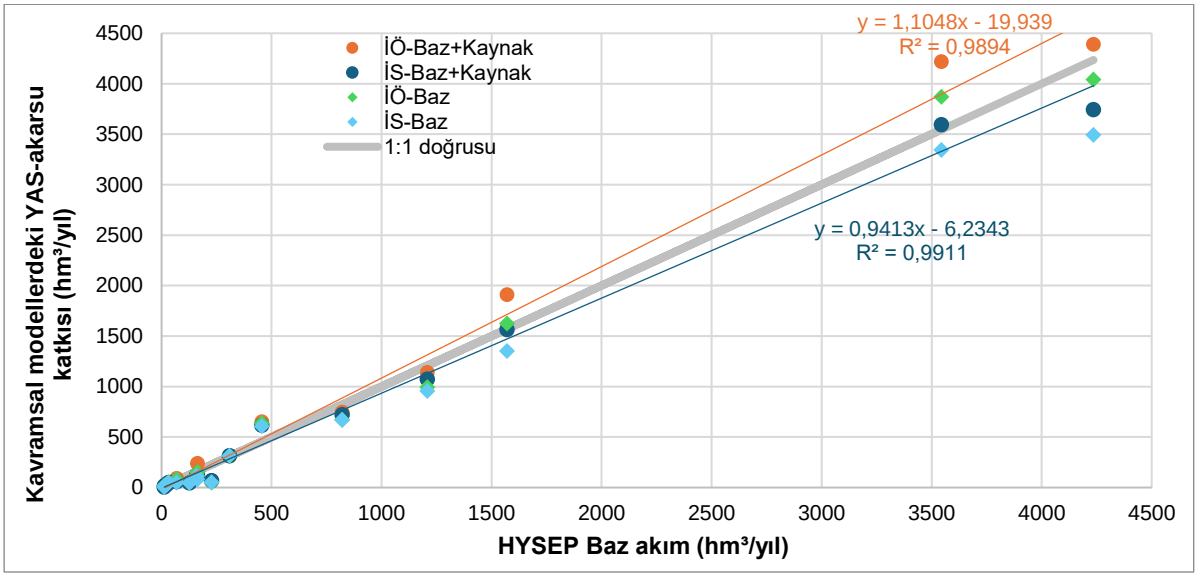
Kavramsal ve HYSEP baz akımları arasındaki fark ise Mutlak Bağıl Fark (MBF) ile değerlendirilmiştir (Denklem 1):

$$MBF(\%) = 100\frac{|Q_{kavramsal} - Q_{HYSEP}|}{Q_{HYSEP}} \quad (1)$$

Drenaj alanı ile MBF arasındaki monoton ilişkinin değerlendirilmesinde Spearman korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Baz akım özelliklerinin alt havzaların birleşik davranışından ve drenaj alanı ölçeğinden etkilenebildiği literatürde daha önce gösterilmiştir [8-9].

3. Değerlendirme

Mekansal konum, kalibrasyon durumu ve kayıt süresi ölçütlerini sağlayan 18 AGİ için HYSEP yöntemiyle hesaplanan uzun dönem ortalama baz akımlar, YAS sistemi su bütçelerinden elde edilen işletme öncesi ve işletme sonrası YAS-akarsu boşalımları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, modelden hesaplanan YAS–akarsu katkıları ile HYSEP baz akımları arasında belirgin bir doğrusal ilişki elde edilmiştir. Baz akım ile akarsuya ulaşan kaynak boşalımlarının birlikte değerlendirildiği durumda işletme öncesi ve işletme sonrası regresyonların R^2 değerleri sırasıyla 0,989 ve 0,991, eğimleri ise 1,105 ve 0,941'dir. HC3'e göre eğimin %95 güven aralığı işletme öncesi durumda 0,903–1,306, işletme sonrası durumda 0,768–1,115 olup her iki aralık da 1 değerini içermektedir. Sabit terimlerin %95 güven aralıkları da (İÖ:[-96,9; 57,0], İS: [-71,0; 58,5]) her iki durumda 0 değerini içermiştir. Bu sonuçlar, YAS sistemi su bütçelerinden elde edilen YAS–akarsu katkıları ile HYSEP baz akımlarının 1:1 ilişkiyle uyumlu olabileceğini ve havza genelinde hidrolojik tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. HYSEP baz akımları ile işletme öncesi ve işletme sonrası YAS sistemi su bütçelerindeki baz akım + akarsuya ulaşan kaynak boşalımı değerlerinin karşılaştırılması

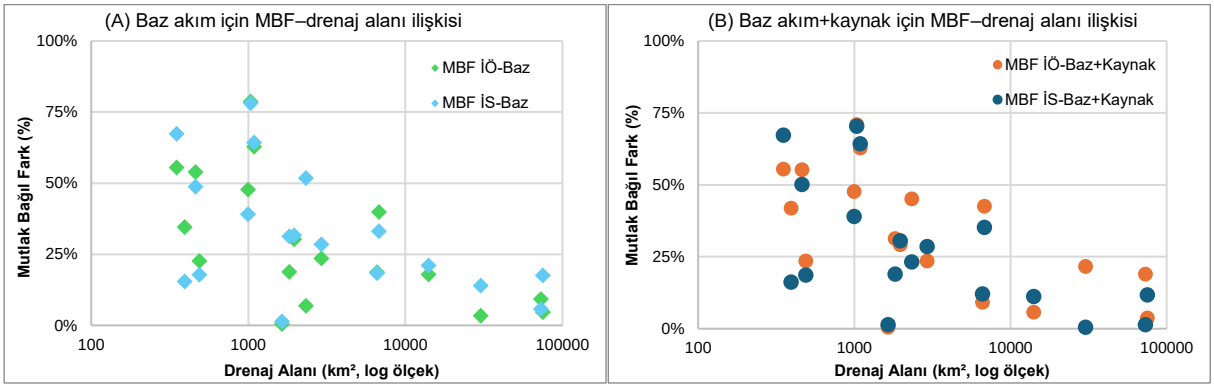
İşletme öncesi regresyonun 1:1 doğrusunun üzerinde, işletme sonrası regresyonun ise altında bulunmasının, AGİ kayıt dönemleri ile kavramsal işletme durumları arasındaki zamansal farklılıklarla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. AGİ değerleri farklı zaman aralıklarının uzun dönem ortalamalarını temsil ederken, kavramsal modeller doğal koşulları ve proje kapsamında tanımlanan mevcut işletme koşullarını temsil etmektedir. Bu dönemler içerisinde yeraltısuyu kullanımları ve su yapılarının değişmiş olabileceği dikkate alındığında HYSEP değerlerinin tek bir kavramsal durumla birebir örtüşmesi beklenmemektedir.

İstasyon bazındaki farklılıkların büyüklüğü ise MBF ile değerlendirilmiştir. Seçilen istasyonlarda medyan MBF değerleri %23,1–30,3 arasında değişmektedir (Tablo 1).

Drenaj alanı ile MBF arasında dört karşılaştırmanın üçünde anlamlı negatif ilişki belirlenmiş; yalnız işletme sonrası baz akım karşılaştırmasında ilişki istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Küçük ve orta büyüklükteki drenaj alanlarında MBF daha geniş bir aralıkta değişirken, daha büyük drenaj alanlarında farkların genel olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 3).

Tablo 1. Modelden hesaplanan YAS–akarsu katkıları ile HYSEP baz akımları arasındaki karşılaştırmanın özet sonuçları

Kavramsal durum	Medyan MBF (%)	Drenaj alanı–MBF ρ	p
İşletme öncesi baz akım	23,1	-0,66	0,003
İşletme sonrası baz akım	29,9	-0,45	0,063
İşletme öncesi baz akım + kaynak	30,3	-0,63	0,005
İşletme sonrası baz akım + kaynak	21,1	-0,60	0,009



Şekil 3. Seçilen 18 AGİ'de drenaj alanı ile modelden hesaplanan YAS–akarsu katkıları ve HYSEP baz akımları arasındaki Mutlak Bağıl Fark (MBF) ilişkisi: A) baz akım, B) baz akım ile akarsuya ulaşan kaynak boşalımlarının toplamı (İÖ: işletme öncesi; İS: işletme sonrası)

Bu çalışmada belirlenen ölçek etkisi, büyük havzalardaki baz akımın farklı hidrojeolojik özelliklere sahip alt sistemlerin birleşik davranışını yansıtabileceğini gösteren çalışmalarla uyumludur [8], [9]. Mansaptaki son havza olan Bafra alt havzasının membasında bulunan ve Kızılırmak Havzası'nın ölçeğine yaklaşan E15A033 istasyonu bu duruma iyi bir örnek oluşturmaktadır. İstasyonda HYSEP baz akımı 4235,66 hm³/yıl iken, membadaki YAS sistemlerinden hesaplanan işletme öncesi baz akım 4041,89 hm³/yıl (MBF=%4,6), kaynak boşalımları dahil toplam YAS-akarsu katkısı ise 4389,58 hm³/yıl (MBF=%3,6) olarak hesaplanmıştır. İşletme sonrası karşılıkları sırasıyla 3491,55 hm³/yıl (MBF=%17,6) ve 3741,90 hm³/yıldır (MBF=%11,7). Bu istasyonda HYSEP baz akımının işletme öncesi ve işletme sonrası kavramsal tahminlerle yakın olması, havza ölçeğinde iki yaklaşım arasındaki hidrolojik tutarlılığı desteklemektedir.

Büyük havzalarda akarsuya katılan baz akımın mansaba iletimi sırasında su kullanımları, buharlaşma-terleme ve diğer akarsu içi kayıpların önemli olabileceği de gösterilmiştir [5]. Bu nedenle Kızılırmak Havzası'nda elde edilen sonuçlar bir model doğrulaması olarak değil, YAS sistemi bütçeleri ile hidrograf ayrımı sonuçları arasındaki ölçekler arası hidrolojik tutarlılığın değerlendirilmesi olarak ele alınmıştır.

4. Sonuçlar

Seçilen 18 AGİ'de HYSEP baz akımları ile YAS sistemi su bütçelerinden hesaplanan YAS-akarsu katkıları arasında havza genelinde güçlü bir doğrusal tutarlılık belirlenmiştir. Baz akım ve akarsuya ulaşan kaynak boşalımlarının birlikte değerlendirildiği durumda regresyonların R^2 değerleri 0,989–0,991, eğimleri ise 0,941–1,105 aralığındadır. Eğimlere ait HC3-tabanlı %95 güven aralıklarının 1 değerini, sabit terimlere ait güven aralıklarının ise 0 değerini içermesi regresyon sonuçlarının 1:1 ilişkiyle uyumlu olduğunu göstermiştir. İstasyon bazındaki göreli farkların özellikle küçük hidrolojik havza alanlarında arttığı, alan büyüdükçe ise dört karşılaştırmanın üçünde MBF'nin anlamlı biçimde azaldığı belirlenmiştir.

Sonuçlar, zamansal ve hidrojeolojik belirsizlikler dikkate alındığında, YAS sistemi ölçeğinde oluşturulan kavramsal bütçelerin membadan mansaba kümülatif değerlendirilmesinin büyük havzalarda gözlemsel baz akım davranışıyla tutarlı sonuçlar verebildiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, sistem çıkışlarında

uzun dönem akım gözleminin bulunmadığı büyük havzalarda kavramsal bütçelerin hidrolojik tutarlılığının değerlendirilmesinde tamamlayıcı bir araç olarak kullanılabilir.

5. Kaynaklar

[1] R. A. Sloto and M. Y. Crouse, “HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis,” US Geological Survey, 1996. doi: 10.3133/wri964040.

[2] A. Pelletier and V. Andréassian, “Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method,” Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 24, no. 3, pp. 1171–1187, Mar. 2020, doi: 10.5194/hess-24-1171-2020.

[3] G. J. McCabe and S. L. Markstrom, “A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface,” USGS, Open-File Report 2007–1088, 2007. doi: https://doi.org/10.3133/ofr20071088.

[4] H. E. Beck et al., “Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments: Global Patterns in Base Flow Characteristics,” Water Resour. Res., vol. 49, no. 12, pp. 7843–7863, Dec. 2013, doi: 10.1002/2013WR013918.

[5] M. P. Miller, S. G. Buto, D. D. Susong, and C. A. Rumsey, “The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin,” Water Resour. Res., vol. 52, no. 5, pp. 3547–3562, May 2016, doi: 10.1002/2015wr017963.

[6] J. G. MacKinnon and H. White, “Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties,” J. Econom., vol. 29, no. 3, pp. 305–325, Sep. 1985, doi: 10.1016/0304-4076(85)90158-7.

[7] J. S. Long and L. H. Ervin, “Using Heteroscedasticity Consistent Standard Errors in the Linear Regression Model,” Am. Stat., vol. 54, no. 3, pp. 217–224, Aug. 2000, doi: 10.1080/00031305.2000.10474549.

[8] M. Di Dato et al., “Baseflow Statistics in Aggregated Catchments,” Water Resour. Res., vol. 59, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.1029/2023wr035894.

[9] Y. Asano et al., “An Increase in Specific Discharge With Catchment Area Implies That Bedrock Infiltration Feeds Large Rather Than Small Mountain Headwater Streams,” Water Resour. Res., vol. 56, no. 9, Aug. 2020, doi: 10.1029/2019wr025658.

Trabzon Yeraltısuyu Alt Havzası'nda Yeraltısuyu Kalitesinin ve Kirlilik Baskılarının Hidrojeolojik Kavramsal Model İle Değerlendirilmesi

Sude Funda SARIMEHMET*
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
fsarimehmet@alter.com.tr

Elçim Gülbahar ERİN
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
eerin@alter.com.tr

Osman DÜĞENCİ
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
odugenci@alter.com.tr

İhsan TAŞKIN
Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik Hiz. A.Ş., Ankara
taskinihsan@gmail.com

Sermin KOÇER
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
sozsayin@dsi.gov.tr

Merve İŞLEK
DSİ Genel Müdürlüğü Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı
Mustafa Kemal Mahallesi, Anadolu Bulvarı, No:9, 06530, Çankaya, Ankara
merveislek@dsi.gov.tr

Anahtar Kelimeler*:* Trabzon YAS Alt Havzası, yeraltısuyu kalitesi, hidrojeokimya, kirlilik baskıları, ağır metaller

1. Amaç

Yeraltısuları, içme-kullanma ve tarımsal sulama amacıyla yararlanılan önemli doğal kaynaklar arasında yer almakta olup miktar ve kalite açısından sürdürülebilir biçimde yönetilmeleri gerekmektedir. Yeraltısuyu kalitesinin değerlendirilmesinde ölçülen parametrelerin yalnızca sınır veya eşik değerlerle karşılaştırılması yeterli değildir. Bulguların; akiferin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, beslenim-boşalım koşulları, su-kayaç etkileşimi ve çalışma alanındaki antropojenik baskılarla birlikte ele alınması gerekmektedir.

Trabzon ve yakın çevresinde gerçekleştirilen önceki çalışmalar, bölgedeki yeraltı ve yüzey sularının kimyasal özellikleri üzerinde hem doğal hidrojeokimyasal süreçlerin hem de yerleşim, tarım ve sanayi faaliyetlerinin etkili olabildiğini göstermektedir. Celep (2009), Trabzon'daki yeraltısularının elektriksel iletkenlik değerlerinin 205-521 µS/cm arasında değiştiğini; bazı alanlarda mangan, nikel ve kurşun bakımından standartlara uygunluk sorunları bulunduğunu ve ana iyonlar ile demir, alüminyum ve mangan konsantrasyonlarının genel yeraltısuyu akım yönünde kıyıya doğru artabildiğini belirtmiştir. Gültekin ve Hatipoğlu Temizel (2020) ise Doğu Karadeniz kıyı akiferlerinin büyük ölçüde akarsulardan beslendiğini, yeraltısuyu akımının genel olarak güneyden kuzeye geliştiğini ve kentsel faaliyetlerin akifer alanları, beslenim koşulları ve su kalitesi üzerinde baskı oluşturabildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, Trabzon Yeraltısuyu (YAS) Alt Havzası'ndaki güncel izleme verilerinin hidrojeolojik yapı ve mevcut baskı unsurlarıyla birlikte değerlendirilmesinin gerekliliğini göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, Doğu Karadeniz Havzası içerisinde yer alan yaklaşık 2.676 km² büyüklüğündeki Trabzon YAS Alt Havzası'nda, dört dönemde izlenen 23 su noktasından elde edilen veriler doğrultusunda yeraltısuyu kalitesini değerlendirmektir. Bu kapsamda eşik veya kriter değerleri aşan parametrelerin belirlenmesi, gözlenen kalite değişimlerinin hidrojeolojik kavramsal model ile

ilişkilendirilmesi ve söz konusu değişimlerin olası jeojenik süreçler ile potansiyel antropojenik baskılar açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Doğu Karadeniz Havzası Yeraltısuyu Planlama (Hidrojeolojik Etüt) Projesi kapsamında Trabzon YAS Alt Havzası'nda gerçekleştirilen hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal çalışmalar kapsamında YAS kütlelerini temsil edecek şekilde belirlenen 23 su noktasının 18'i kuyu, 5'i kaynak olmak üzere dört farklı dönemde su örnekleri alınarak laboratuvar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalite izleme çalışmaları Kasım 2020, Mayıs 2021, Kasım 2021 ve Mayıs 2022 dönemlerinde gerçekleştirilmiştir. İzleme noktaları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kalite izlemesi yapılan su noktaları

YAS Kütle No	YAS Kütle Adı	Arazi No/Adı	Koordinat (ED50)		Numune Kodu	Numune Türü
			X	Y		
TR22.14.014	Yanbolu Çayı	185	583788	4528370	KU014-024	Kuyu
TR22.15.015	Yomra Deresi	Yomraspor	572948	4532923	KU015-025	Kuyu
TR22.16.016	İkisu Deresi / Yomra-Şana	Sütaş Trabzon	570587	4534378	KU016-026	Kuyu
TR22.17.017	Maçka Çayı (Değirmendere)	Aşkale	563367	4539211	KU017-027	Kuyu
TR22.17.017	Maçka Çayı (Değirmendere)	Tüv Türk Kuyu	563066	4537919	KU017-028	Kuyu
TR22.17.017	Maçka Çayı (Değirmendere)	93-A	562061	4533210	KU017-029	Kuyu
TR22.17.017	Maçka Çayı (Değirmendere)	94	561277	4531434	KU017-030	Kuyu
TR22.18.018	Söğütlü Deresi	89-A	549906	4540299	KU018-031	Kuyu
109	Zaferli	Zaferli	541245	4534907	KA018-205	Kaynak
TR22.19.019	İskefiye Deresi (Çarşıbaşı)	86-A	532201	4547595	KU019-032	Kuyu
TR22.19.019	İskefiye Deresi (Çarşıbaşı)	Akerko Kuyu	532723	4546733	KU019-033	Kuyu
TR22.20.020	Fol Deresi	85-A	523500	4543341	KU020-034	Kuyu
TR22.20.020	Fol Deresi	Şahıs-1	523511	4537894	KU020-035	Kuyu
TR22.17.063	Üçpınar	Sümela Su	566575	4515190	KA063-223	Kaynak
TR22.17.065	Güzelyayla	Zigana Su	542980	4500997	KA065-085	Kaynak
TR22.17.066	Gorden	Gorden	550505	4504106	KA066-225	Kaynak
TR22.18.069	Yeri Deresi	Yeri Deresi	540262	4517454	KA069-087	Kaynak
TR22.18.068	Ancuma ve Karanlıkdere	Kemik	561026	4538612	KU068-086	Kuyu
TR22.18.067	Beyaz Kaynak Suları	Akça	552003	4529829	KU067-226	Kuyu
TR22.18.070	Aktepe	709-A	545810	4543716	KU070-088	Kuyu
TR22.18.070	Aktepe	709-B	546065	4542192	KU070-089	Kuyu
TR22.18.047	Yıldızlı Dere	Sera-1	552820	4539325	KU047-074	Kuyu
KD		Yeşilce	579330	4532500	KUKD-252	Kuyu

Yerinde ölçümlerde elektriksel iletkenlik (EC), pH, çözünmüş oksijen, redoks potansiyeli ve tuzluluk parametreleri değerlendirilmiştir. Laboratuvar analizlerinde ise temel anyon-katyonlar, ağır metaller, azot ve fosfor bileşikleri, aldehitler, uçucu bileşikler, diğer organikler, ftalatlar, poliaromatik hidrokarbonlar, pestisitler ile farklı iz elementler incelenmiştir. Operasyonel izleme kapsamında arsenik, kurşun, cıva, demir, mangan, alüminyum, bakır, çinko, nikel, krom (+6), bromür, nitrat, nitrit, amonyum ve toplam fosfor gibi parametreler de değerlendirilmiştir.

Doğu Karadeniz Havzası'nda eşik değerlerin belirlenmesi amacıyla analiz edilen 191 parametre değerlendirilmiş olup her izleme noktasında parametrelere ait ortalama konsantrasyonlar LOQ değerleriyle karşılaştırılmış; ortalama değeri üçten fazla noktada LOQ'yu aşan parametreler risk taşıyan ve eşik değer belirlenmesi gereken parametreler olarak kabul edilmiştir.

Doğal arka plan seviyelerinin belirlenmesinden önce BRIDGE Projesi'nde önerilen kriterlere göre veri ön elemesi yapılmıştır. Bu kapsamda elektronötralite hatası %10'dan yüksek, EC değeri 1.000 µS/cm'den, nitrat konsantrasyonu 10 mg/L'den ve sodyum veya klorür konsantrasyonu 1.000 mg/L'den fazla olan noktalar ile çözünmüş oksijen değeri 1 mg/L'nin altında bulunan anaerobik sular değerlendirme dışında bırakılmıştır. Böylece 151 izleme noktasından uygun bulunan 113'üne ait veriler kullanılarak doğal arka plan seviyeleri belirlenmiştir.

Kriter değerlerin belirlenmesinde içme suyu, sulama suyu ve çevresel kalite standartları karşılaştırılarak en düşük değer esas alınmıştır. Yeraltısuyu–yüzey suyu ilişkisi bulunan kütlelerde çevresel kalite standartları da değerlendirmeye dâhil edilmiştir. Kriter değeri bulunmayan parametreler için AB Teknik Kılavuz Belge 27 doğrultusunda uzun süreli etkileri temsil eden YO-ÇKS değerleri hesaplanmış; yeterli toksisite verisi bulunmayan durumlarda ise Dünya Sağlık Örgütü ve EPA içme suyu kriterlerinden yararlanılmıştır [7-9].

Kurak dönem, yağışlı dönem ve tüm dönem ortalamalarına ait konsantrasyon yüzeyleri GIS ortamında ters mesafe ağırlıklı (IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Bununla birlikte, izleme ağının 23 nokta ile sınırlı ve mekânsal dağılımının düzensiz olması nedeniyle, enterpolasyon sonuçları örneklenmeyen alanlardaki konsantrasyonların kesin bir göstergesi olarak değerlendirilmemiştir. Bu kapsamda, değerlendirmelerde doğrudan ölçüm sonuçlarını gösteren noktasal dağılım haritaları esas alınmış; IDW enterpolasyon haritaları ise konsantrasyonların genel mekânsal eğiliminin destekleyici görsel değerlendirmesi amacıyla kullanılmıştır.

İzleme noktalarının konumları; jeolojik ve hidrojeolojik özellikler, akifer sınırları, yeraltısuyu akım yönleri, akarsu sistemleri ve çevredeki antropojenik faaliyetlerle birlikte değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede, gözlenen kalite değişimleri ile olası baskı unsurları arasındaki mekânsal ilişkilerin ortaya konulması amaçlanmış olup doğrudan kaynak tayini yapılmamıştır. Özellikle Fe, Mn ve Al bakımından litoloji, mineral ayrışması, pH-redoks koşulları ve su-kayaç etkileşimi gibi jeojenik süreçler de değerlendirmeye alınmıştır.

3. Değerlendirme

Trabzon YAS Alt Havzası'nda iki kurak ve iki yağışlı dönemde gerçekleştirilen izleme çalışmaları sonucunda, dört dönem ortalama elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin 42,6–857,25 µS/cm arasında değiştiği belirlenmiştir. Belirlenen 700 µS/cm eşik değeri; Sütaş Trabzon, Aşkale, 93-A, 94, Zaferli, 709-A ve 709-B izleme noktalarında aşılmıştır. Maçka Çayı alüvyonlarında bulunan 93-A ve 94 numaralı kuyularda EC yüksekliğine mangan, demir, bakır, alüminyum ve bromür gibi bazı parametrelerdeki artışların da eşlik ettiği görülmüştür. Bu kuyuların asfalt şantiyesi, çimento fabrikası ve çeşitli sanayi tesislerinin bulunduğu alanlarda yer alması nedeniyle gözlenen artışların bölgedeki kentsel-endüstriyel ve madencilik faaliyetlerinden kaynaklanabilecek potansiyel baskılarla ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, mevcut bulguların doğrudan kaynak tayini için yeterli olmadığı dikkate alınmalıdır.

Aktepe Yeraltısuyu Kütlesinde bulunan 709-A ve 709-B kuyularındaki yüksek EC değerlerinin, yakın çevrede yer alan kum ocağı ve beton üretim tesisleriyle ilişkili olabilecek potansiyel antropojenik baskılardan etkilenmiş olabileceği belirlenmiştir. Zaferli kaynağındaki EC yüksekliğinin ise Yeşilce

Formasyonu (andezit, bazalt ve piroklastikleri ile çakıltaşı, kumtaşı, kireçtaşı) ile gerçekleşen su-kayaç etkileşimine bağlı jeojenik süreçlerden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir.

Dört dönem ortalama pH değerleri 6,41–8,58 arasında değişmiştir. Yeşilce izleme noktasında ölçülen 6,34 pH değeri, alt sınır olarak kabul edilen 6,50 değerinin bir miktar altında kalmıştır. Bu nedenle söz konusu noktadaki pH düşüklüğünün dönemsel değişimler, akiferin litolojik özellikleri ve yerel hidrojeokimyasal koşullar dikkate alınarak izlenmesi gerektiği değerlendirilmiştir.

Çözünmüş oksijen değerlerinin dört dönem ortalamaları 1,64–9,99 mg/L arasında değişmiş ve yalnızca 709-B izleme noktasında 2 mg/L'nin altında değer belirlenmiştir. Bu noktada özellikle kurak dönemlerde düşük çözünmüş oksijen değerlerinin gözlenmesi, akifer içerisinde oksijence fakir ve indirgen koşulların gelişmiş olabileceğine işaret etmektedir. Redoks potansiyelinin dönemlere göre −52,65 ile 325,35 mV arasında değişmesi de hidrojeokimyasal koşulların zamansal olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle 709-B noktasındaki çözünmüş oksijen ve redoks değişimlerinin izleyen dönemlerde birlikte takip edilmesi önem taşımaktadır.

Doğu Karadeniz Havzası Eşik Değerlerin Belirlenmesi Raporu'nda arsenik için eşik değer 10 µg/L olarak belirlenmiştir. Trabzon YAS Alt Havzası'ndaki dört dönem ortalama arsenik konsantrasyonları 0,50–3,40 µg/L arasında değişmiş ve izleme noktalarının hiçbirinde eşik değer aşımı tespit edilmemiştir.

Alüminyum için eşik değer, yeraltısuyu–yüzey suyu ilişkisinin bulunduğu kütlelerde 13,50 µg/L, bu ilişkinin bulunmadığı kütlelerde ise 200 µg/L olarak belirlenmiştir. Dört dönem ortalama alüminyum konsantrasyonu yalnızca Maçka Çayı–Değirmendere Yeraltısuyu Kütlesi'ndeki KU017-029 (93-A) izleme noktasında eşik değeri 408,98 µg/L değeri ile aşmıştır. Asfalt şantiyesi içerisinde bulunan bu noktada alüminyum yüksekliğine demir, mangan ve bakır konsantrasyonlarındaki artışların da eşlik ettiği görülmüştür. İzleme noktasının konumu, sanayi faaliyetlerinin potansiyel bir baskı oluşturabileceğini düşündürmekle birlikte; alüminyum, demir ve mangan konsantrasyonlarının akifer malzemesinin mineralojisi, mineral ayrışması ve pH-redoks koşulları gibi doğal hidrojeokimyasal süreçlerden de etkilenebileceği dikkate alınmalıdır.

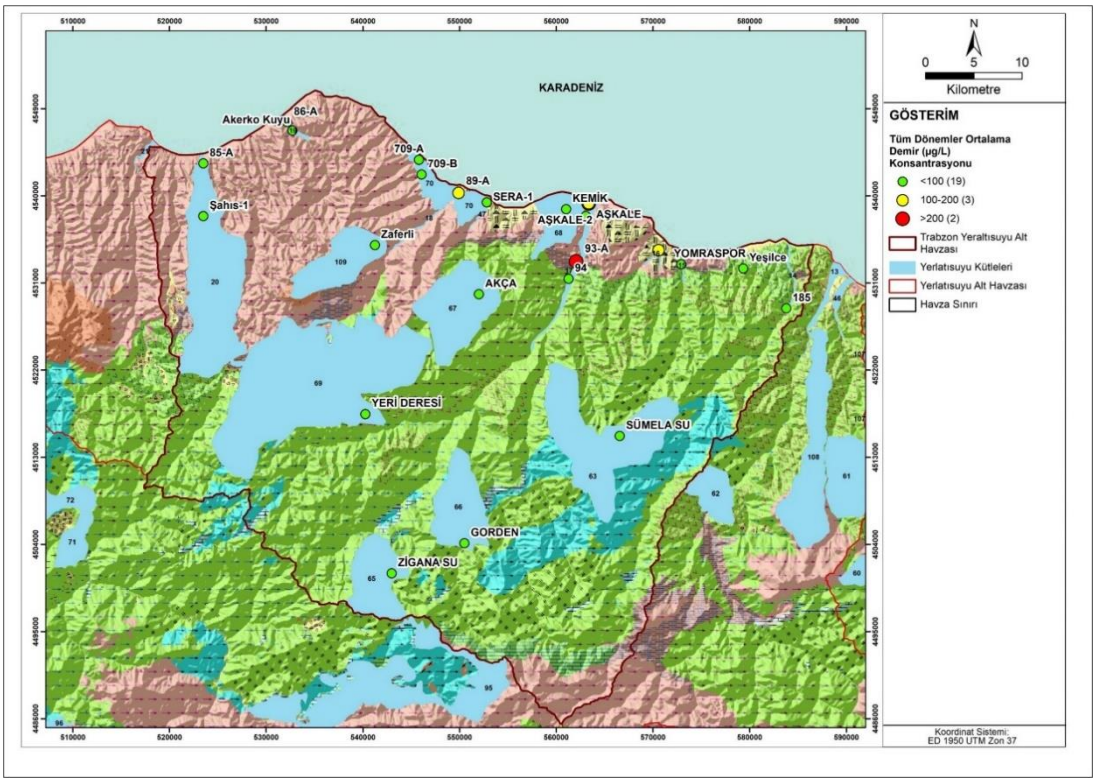
Cıva için belirlenen 1 µg/L eşik değerin, dört dönem ortalamasına göre yalnızca KA069-087 (Yeri Deresi) izleme noktasında aşıldığı belirlenmiştir. Aşımın tek bir noktada gözlenmesi, cıva yüksekliğinin alt havza genelinde yaygın olmadığını ve Yeri Deresi çevresiyle sınırlı lokal bir durum olabileceğini göstermektedir. Ancak cıvanın olası kaynağının belirlenebilmesi için izleme noktasının çevresindeki jeolojik yapı ile madencilik, tarım ve diğer antropojenik faaliyetlerin birlikte incelenmesi gerekmektedir.

Bakır için eşik değer, yeraltısuyu–yüzey suyu ilişkisinin bulunmadığı noktalarda 200 µg/L, bu ilişkinin bulunduğu noktalarda ise 6,68 µg/L olarak belirlenmiştir. Dört dönem ortalama bakır konsantrasyonları KU014-024 (185) (12,49 µg/L), KU017-029 (93-A) (6,69 µg/L) ve KU017-030 (94) (10,62 µg/L) izleme noktalarında eşik değeri aşmıştır. Maçka Çayı–Değirmendere alüvyonlarında bulunan 93-A ve 94 numaralı kuyuların sırasıyla asfalt şantiyesi ve çimento fabrikası sahasında yer alması ve memba kesimlerinde sanayi tesisleri ile madencilik faaliyetlerinin bulunması, bakır yüksekliği açısından potansiyel antropojenik baskılara işaret etmektedir. Yanbolu Çayı alüvyonlarında açılmış KU014-024 (185) numaralı kuyudaki bakır artışının da çevredeki kentsel ve endüstriyel faaliyetlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, bu ilişkiler mekânsal yakınlığa dayalı olup doğrudan kaynak tayini niteliğinde değildir.

Çinko için eşik değer, yeraltısuyu–yüzey suyu ilişkisi bulunan kütlelerde 37,50 µg/L, bu ilişkinin bulunmadığı kütlelerde ise 2.000 µg/L olarak belirlenmiştir. Eşik değer aşımı yalnızca Maçka Çayı–Değirmendere Yeraltısuyu Kütlesi'ndeki KU017-028 (Tüv Türk Kuyu) izleme noktasında 392,79 µg/L olarak tespit edilmiştir. Söz konusu kuyunun Değirmendere sanayi bölgesinde ve araç muayene istasyonu sahasında bulunması nedeniyle çinko yüksekliğinin çevredeki sanayi faaliyetlerinden kaynaklanabilecek potansiyel girdilerle ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir.

Demir için belirlenen 71,5–200 µg/L aralığındaki eşik değerler, KU017-027 (Aşkale) (200,00 µg/L) ve KU017-029 (93-A) (203,25 µg/L) izleme noktalarında aşılmıştır. Her iki noktanın da Maçka Çayı–

Değirmendere Yeraltısuyu Kütlesi'nde; çimento fabrikası, liman, sanayi sitesi ve asfalt şantiyesi gibi faaliyetlerin bulunduğu alanlarda yer alması nedeniyle endüstriyel faaliyetlerin potansiyel baskı oluşturabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte demir konsantrasyonları, demir içeren minerallerin ayrışması ve indirgen koşullarda demirin çözünerek yeraltısuyuna geçmesi gibi jeojenik süreçlerden de etkilenebilmektedir. Bu nedenle gözlenen aşımın yalnızca endüstriyel faaliyetlerle ilişkilendirilmesi uygun olmayıp, litolojik ve hidrojeokimyasal koşulların da dikkate alınması gerekmektedir.

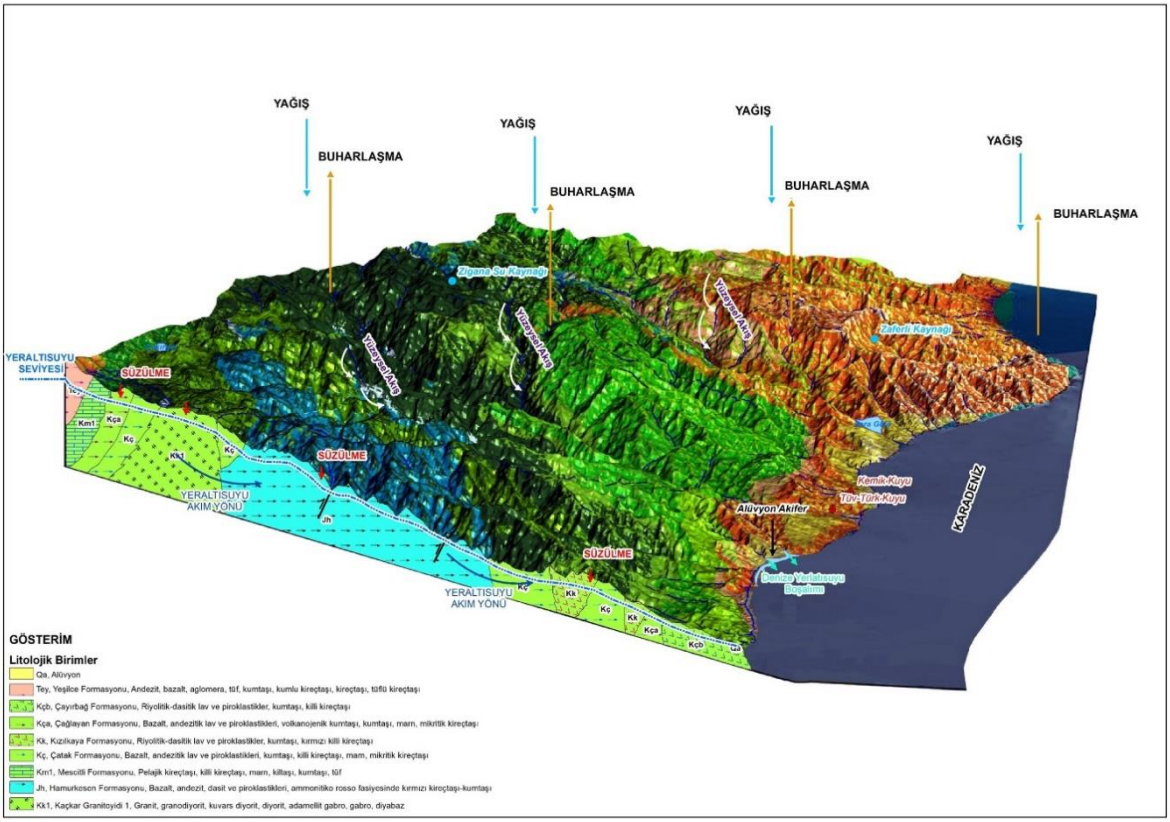


Şekil 1. Trabzon YAS Alt Havzası tüm dönemler ortalama demir konsantrasyonu noktasal dağılım haritası

Mangan için belirlenen 50 µg/L eşik değer; KU016-026 (Sütaş Trabzon) (207,25 µg/L), KU017-028 (Tüv Türk Kuyu) (136,46 µg/L), KU017-029 (93-A) (98,75 µg/L), KU020-034 (85-A) (78,73 µg/L) ve KU020-035 (Şahıs-1) (120,03 µg/L) izleme noktalarında aşılmıştır. Sütaş Trabzon, Tüv Türk Kuyu ve 93-A noktalarının kentsel ve endüstriyel faaliyetlerin bulunduğu veya bu faaliyetlere yakın alanlarda yer alması, mangan yüksekliğinin potansiyel antropojenik baskılarla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte manganın çözünürlüğü akiferdeki çözünmüş oksijen ve redoks koşullarına bağlı olarak değişebilmekte; indirgen koşullarda mangan içeren minerallerden yeraltısuyuna geçiş artabilmektedir. Bu nedenle özellikle mangan aşımı belirlenen noktalarda çözünmüş oksijen, redoks potansiyeli, demir ve mangan sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Azot ve fosfor bileşikleri de yeraltısuyu kalitesi açısından önem taşımaktadır. Nitrit, nitrat ve amonyak konsantrasyonlarındaki yükselmelerin temel olarak evsel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan azot bileşiklerinin infiltrasyon yoluyla yeraltısuyuna ulaşabilmesi ve yerleşim alanlarından kaynaklanan evsel atıkların süzülme yoluyla akifer sistemine taşınabilmesi, özellikle yüzeye yakın ve geçirgen alüvyon akiferler açısından önemli bir baskı oluşturmaktadır.

Kirliliğin hidrojeolojik sistem içerisindeki davranışının değerlendirilmesinde kavramsal model önemli bir araçtır. Trabzon YAS Alt Havzası'ndaki akifer sistemleri genel olarak taneli, kırıklı-çatlaklı ve karstik-karbonatlı akiferlerden oluşmaktadır. Alüvyon akiferlerde yeraltısuyu akımı genel olarak vadiler boyunca güneyden kuzeye, Karadeniz'e doğru gelişmektedir. Bu akiferler doğrudan yağıştan ve akarsulardan beslenmekte, boşalım ise ağırlıklı olarak denize ve akarsulara doğru gerçekleşmektedir (Şekil 2).



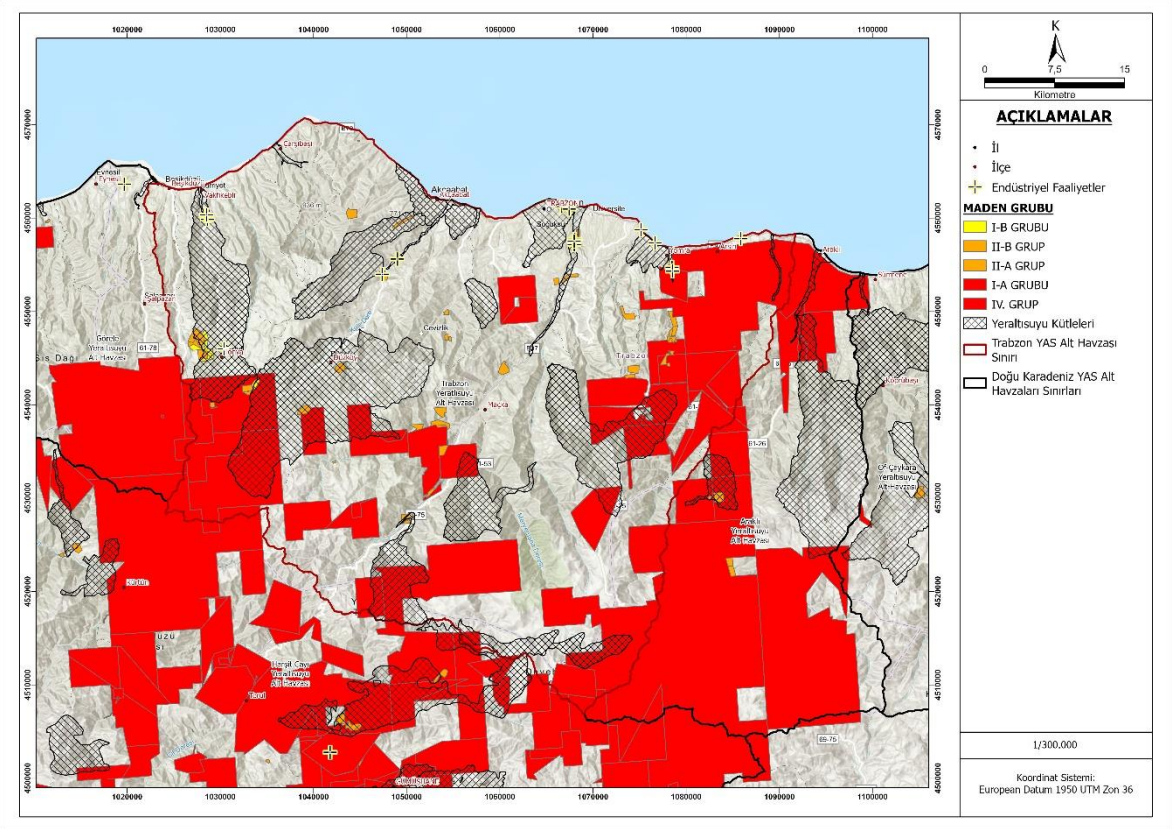
Şekil 2. Trabzon YAS Alt Havzası kavramsal modeli

Bu hidrojeolojik yapı, özellikle geçirgen alüvyon akiferlerin yüzeyde gerçekleşen antropojenik faaliyetlere karşı hassasiyetini artırmaktadır. Kentsel ve endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaştığı vadilerde akiferin yüzey suyu ve akarsu sistemiyle ilişkili olması, kirleticilerin yüzeyden süzülerek veya kirlenmiş akarsulardan beslenim yoluyla yeraltısuyuna ulaşmasına olanak sağlayabilmektedir.

Hidrojeokimyasal açıdan ise Trabzon YAS Alt Havzası yeraltısularının genelinde Ca ve HCO_3 iyonlarının baskın olduğu, suların çoğunlukla Ca-Mg-HCO_3 karakterinde bulunduğu belirlenmiştir. Piper ve Schoeller diyagramları, yeraltısularının genel olarak karbonat kayaçların çözünmesiyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, yeraltısuyu kimyasının yalnızca antropojenik baskılarla değil, aynı zamanda akiferin litolojik özellikleri ve su-kayaç etkileşimi ile de kontrol edildiğini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte bazı noktalarda gözlenen kimyasal değişimlerin doğal hidrojeokimyasal süreçlerden ziyade belirli antropojenik faaliyetlerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle 93-A ve 94 numaralı kuyuların bulunduğu Maçka Çayı–Değirmendere alüvyon akiferinde EC, bromür, bakır, demir, mangan ve alüminyum gibi birden fazla parametrenin birlikte yükselmesi, lokal antropojenik baskının göstergesi olarak öne çıkmaktadır. Benzer şekilde 709-A ve 709-B kuyularında yüksek EC değerleri ile birlikte düşük çözünmüş oksijen değerlerinin bulunması, yerel hidrojeokimyasal koşulların da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. 709-B noktasında çözünmüş oksijenin 2 mg/L'nin altında olması ve düşük redoks koşullarının gözlenmesi, akifer ortamında anaerobik koşulların varlığına işaret etmektedir.

Kıyı akiferleri açısından değerlendirildiğinde ise Trabzon YAS Alt Havzası'ndaki alüvyon akiferlerin genel olarak kıyı akiferi niteliğinde olduğu ve kıyı kesimlerinde yeraltısuyu kalitesini etkileyebilecek temel baskıların zirai ilaçlama, kentsel ve endüstriyel faaliyetler ile madencilik faaliyetleri (Şekil 3) olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte aşırı yeraltısuyu kullanımına bağlı belirgin bir tuzlu su girişimi problemi bulunmadığı değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Trabzon YAS Alt Havzası maden ve endüstriyel baskı unsurları haritası

4. Sonuçlar

Trabzon YAS Alt Havzası'nda iki kurak ve iki yağışlı dönemde izlenen 23 su noktasından elde edilen sonuçlar, eşik değer aşımlarının izleme ağı içerisinde belirli noktalarda yoğunlaştığını göstermiştir. Mevcut izleme ağı ve dönemleri kapsamında, alt havzanın tamamına yayılmış bir kalite bozulmasına işaret eden bir örüntü belirlenmemiş; buna karşılık bazı izleme noktalarında lokal kalite sorunları tespit edilmiştir. İzleme noktalarının mekânsal dağılımı dikkate alındığında bu sonuçların, alt havzanın örneklenmeyen kesimlerine doğrudan genellenmemesi gerekmektedir.

İzleme sonuçlarında EC, bromür, bakır, alüminyum, cıva, çinko, demir ve mangan parametrelerinde belirli noktalarda eşik değer aşımı gözlenmiştir. Azot bileşiklerindeki artışların evsel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanabilecek girdilerle; bazı metal artışlarının ise sanayi ve madencilik alanlarıyla mekânsal olarak örtüşen potansiyel antropojenik baskılarla ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, özellikle demir, mangan ve alüminyum konsantrasyonlarının litoloji, mineral ayrışması, su-kayaç etkileşimi ve pH-redoks koşulları gibi jeojenik süreçlerden de etkilenebileceği dikkate alınmıştır.

Birden fazla parametrede eşik değer aşımının gözlendiği Maçka Çayı-Değirmendere YAS kütlesindeki 93-A, 94 ve Tüv Türk Kuyu izleme noktaları, ayrıntılı izleme açısından öncelikli alanlar olarak değerlendirilmiştir. Bu noktaların sanayi faaliyetlerinin yoğunlaştığı alanlarda bulunması potansiyel antropojenik baskılara işaret etmekle birlikte, mevcut bulgular doğrudan kaynak tayini için yeterli değildir. Baskıların kaynağının ve etki düzeyinin belirlenebilmesi için memba-mansap yönünde ilave izleme noktalarının oluşturulması, yüzey suyu ve yeraltısuyunun eş zamanlı izlenmesi ve örnekleme sıklığının artırılması gerekmektedir.

Yeraltısuyu kalitesinin korunması amacıyla, kentsel ve endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaştığı alüvyon akiferlerdeki baskı unsurlarının kontrol edilmesi; tarımsal girdiler, atıksu ve depolama alanlarının düzenli olarak izlenmesi; eşik değer aşımı belirlenen noktaların izleme programında önceliklendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca izleme ağının mekânsal temsil gücünün artırılması, kırıklı-çatlaklı akiferlere ilişkin

veri eksikliklerinin giderilmesi ve jeojenik süreçler ile antropojenik baskıların katkısını ayırt etmeye yönelik çalışmaların yürütülmesi, gelecekte yapılacak değerlendirmelerin güvenilirliğini artıracaktır.

5. Kaynaklar

[1] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) (2015). Doğu Karadeniz Havzası Master Plan Çalışmaları İşi, Doğu Karadeniz Havzası Hidrojeoloji Raporu.

[2] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) (2019). Doğu Karadeniz Havzası Yeraltısuyu Kütlelerinin Belirlenmesi Raporu.

[3] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) (2022). Doğu Karadeniz Havzası Yeraltısuyu Planlama (Hidrojeolojik Etüt) Projesi, Trabzon Yeraltısuyu Alt Havzası Hidrojeolojik Etüt Raporu ve Eşik Değerlerin Belirlenmesi Nihai Raporu.

[4] Celep, S. (2009). Trabzon ili yer altı ve yer üstü sularının hidrojeolojik, hidrojeokimyasal incelemesi ve su kalitesinin izlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[5] Gültekin, F., Fırat Ersoy, A., Hatipoğlu, E. ve Celep, S. (2012). Trabzon İli Akarsularının Yağışlı Dönem Su Kalitesi Parametrelerinin Belirlenmesi. Ekoloji, 21(82), 77-88.

[6] Gültekin, F. ve Hatipoğlu Temizel, E. (2020). Kentsel Faaliyetlerin Kıyı Akiferlerine Etkileri: Doğu Karadeniz Havzası Örneği. Türkiye Jeoloji Bülteni, 63, 69-82.

[7] Hinsby, K., Condesso de Melo, M., & Dahl, M. (2008). European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. Science of the Total Environment, 5.

[8] Avrupa Parlamentosu ve Konseyi (2006). Yeraltısuyunun Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunmasına İlişkin 2006/118/EC sayılı Direktif.

[9] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2012). Yeraltısularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik. Resmî Gazete, 7 Nisan 2012, Sayı 28257.

[10] European Commission (2011). Technical Guidance for Deriving Environmental Quality Standards, Guidance Document No. 27.

Yeraltı Suyu Çekim Kararlarında Belirsizlik Tabanlı 3B Sayısal Modelleme: Kavramsal Nokta Tabanlı Sentetik Bir Akifer Uygulaması

Emrah DİRMİT*
Fontevia Danışmanlık ve Mühendislik Ltd. Şti., Ankara, 0000-0002-8755-1977
emrahdirmit@fontevia.com

Anahtar Kelimeler*:* yeraltısuyu modellemesi, MODFLOW 6, FloPy, PESTPP-IES, belirsizlik analizi.

1. Amaç

Yeraltısuyu kaynakları; içme-kullanma suyu temini, tarımsal sulama, endüstriyel kullanım ve madencilik faaliyetleri açısından stratejik öneme sahiptir. Buna karşın yeraltısuyu sistemleri çoğu zaman doğrudan gözlenemeyen, heterojen ve üç boyutlu hidrojeolojik ortamlardan oluşur. Bu nedenle sayısal yeraltısuyu modelleri, akifer davranışının anlaşılması ve farklı işletme senaryolarının değerlendirilmesi için temel araçlardan biri haline gelmiştir.

Türkiye'de ve dünyada yeraltısuyu modelleme çalışmalarında MODFLOW tabanlı yaklaşımlar uzun süredir kullanılmaktadır. MODFLOW 6, yeraltısuyu akımını farklı paketler aracılığıyla temsil edebilen modern ve modüler bir sayısal modelleme çerçevesidir [1]. FloPy ise MODFLOW modellerinin Python ortamında kurulması, çalıştırılması ve çıktılarının işlenmesi için kullanılan açık kaynaklı bir iş akışı aracıdır [2]. 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı'nda yer alan Şuhut Ovası yeraltısuyu modellemesi çalışması, üç boyutlu MODFLOW modelinin hidrojeolojik parametrelerin belirlenmesi, su bütçesi hesabı ve pompaj senaryolarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmasına örnek oluşturmaktadır [5]. Bununla birlikte klasik modelleme uygulamalarında kararlar çoğu zaman tek bir kalibre edilmiş model sonucu üzerinden verilmektedir. Tekil model yaklaşımı, gözlem verileri ile uyumlu görünen bir modelin karar noktalarında ne kadar güvenilir tahmin ürettiği sorusunu her zaman yanıtlamaz.

Bu çalışmanın amacı, sentetik bir 3B akifer modeli üzerinde belirsizlik tabanlı bir yeraltısuyu karar destek iş akışı geliştirmektir. Çalışmada MODFLOW 6, FloPy ve PESTPP-IES birlikte kullanılarak sentetik gerçek model, sentetik gözlemler, önsel parametre model topluluğu, gözlem verisiyle güncellenmiş sonsal model topluluğu ve karar noktası bazlı tahmin belirsizliği değerlendirmesi oluşturulmuştur. Çalışma belirli bir saha modelinin sonucu olarak değil, belirsizlik tabanlı modelleme iş akışının kontrollü koşullarda test edilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

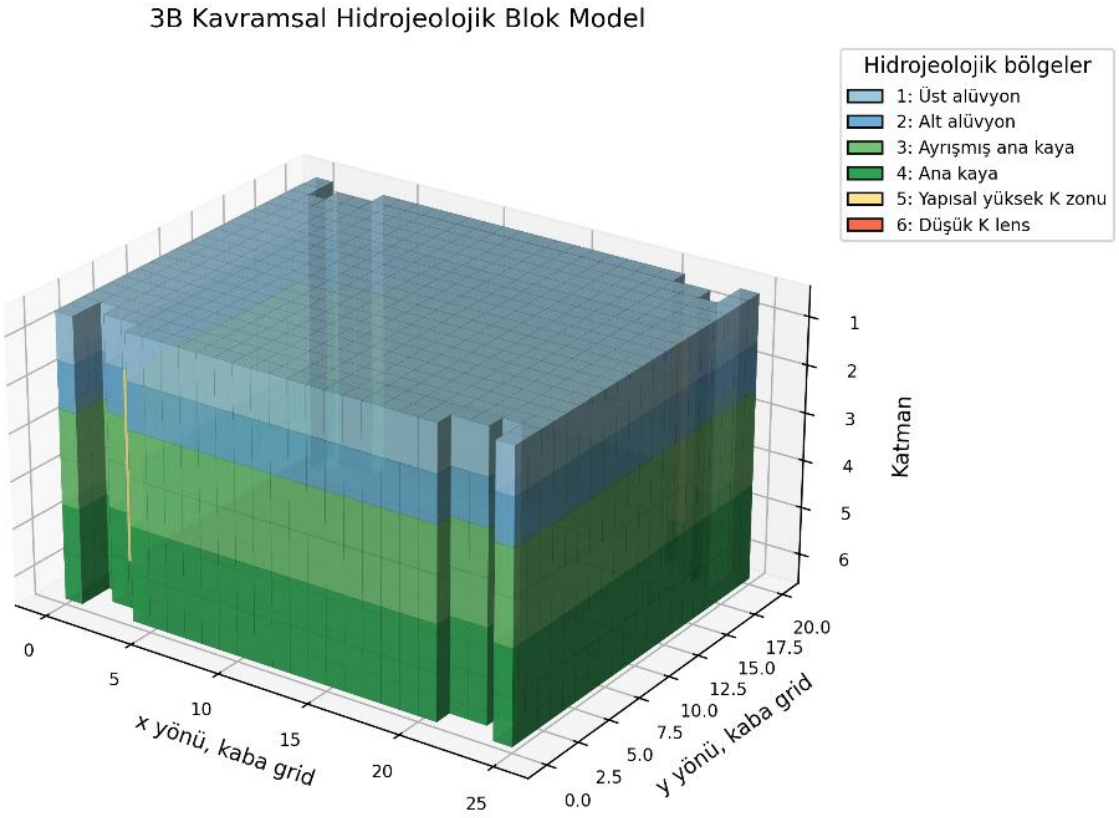
2. Materyal ve Yöntem

2.1 Sayısal Model Yaklaşımı

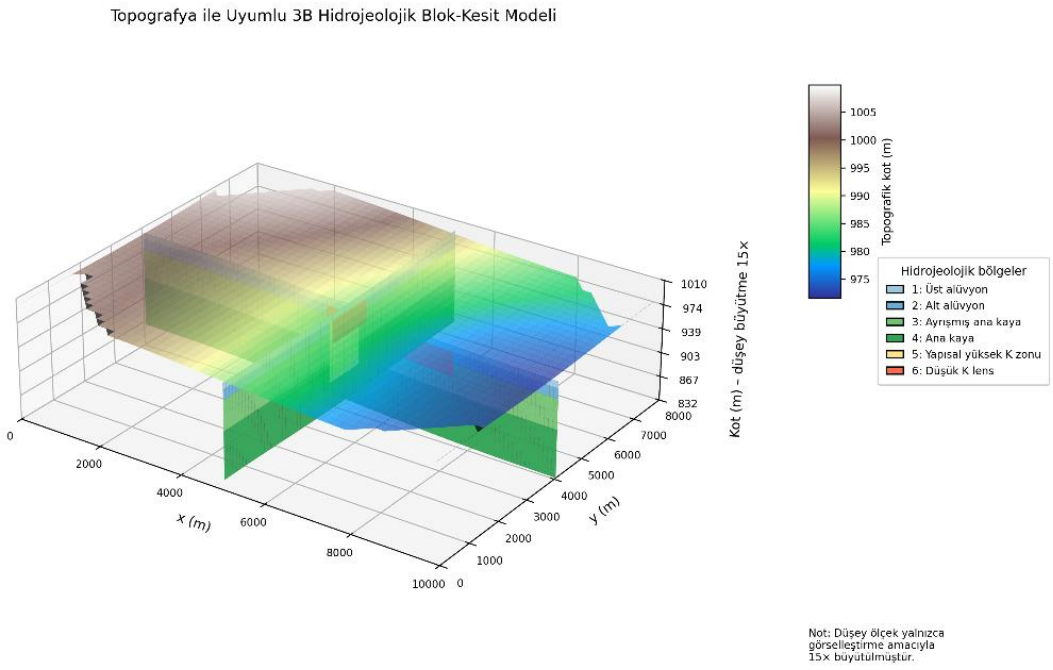
Bu çalışmada geliştirilen sentetik model, MODFLOW 6 yeraltısuyu akım modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Modelin kurulumu, veri üretimi, çalıştırılması ve sonuçların işlenmesi Python tabanlı FloPy kütüphanesi ile gerçekleştirilmiştir [1, 2]. Model alanı 10 km × 8 km boyutlarında, 100 m × 100 m hücre boyutuna sahip, 6 katmanlı yapılandırılmış bir grid olarak tanımlanmıştır. Sentetik hidrojeolojik yapı; üst alüvyon, alt alüvyon, ayrışmış ana kaya, ana kaya, yapısal yüksek geçirgenlik zonu ve düşük geçirgenlikli lens olmak üzere altı hidrojeolojik bölge ile temsil edilmiştir. İlk uygulama durağan rejime eşdeğer olacak şekilde kurulmuş; modelde sabit yük sınırları, alansal beslenim, drenaj/akarsu-sulak alan temsilcileri ve üretim kuyuları kullanılmıştır.

2.2. Sentetik Gerçek Model ve Sentetik Gözlemler

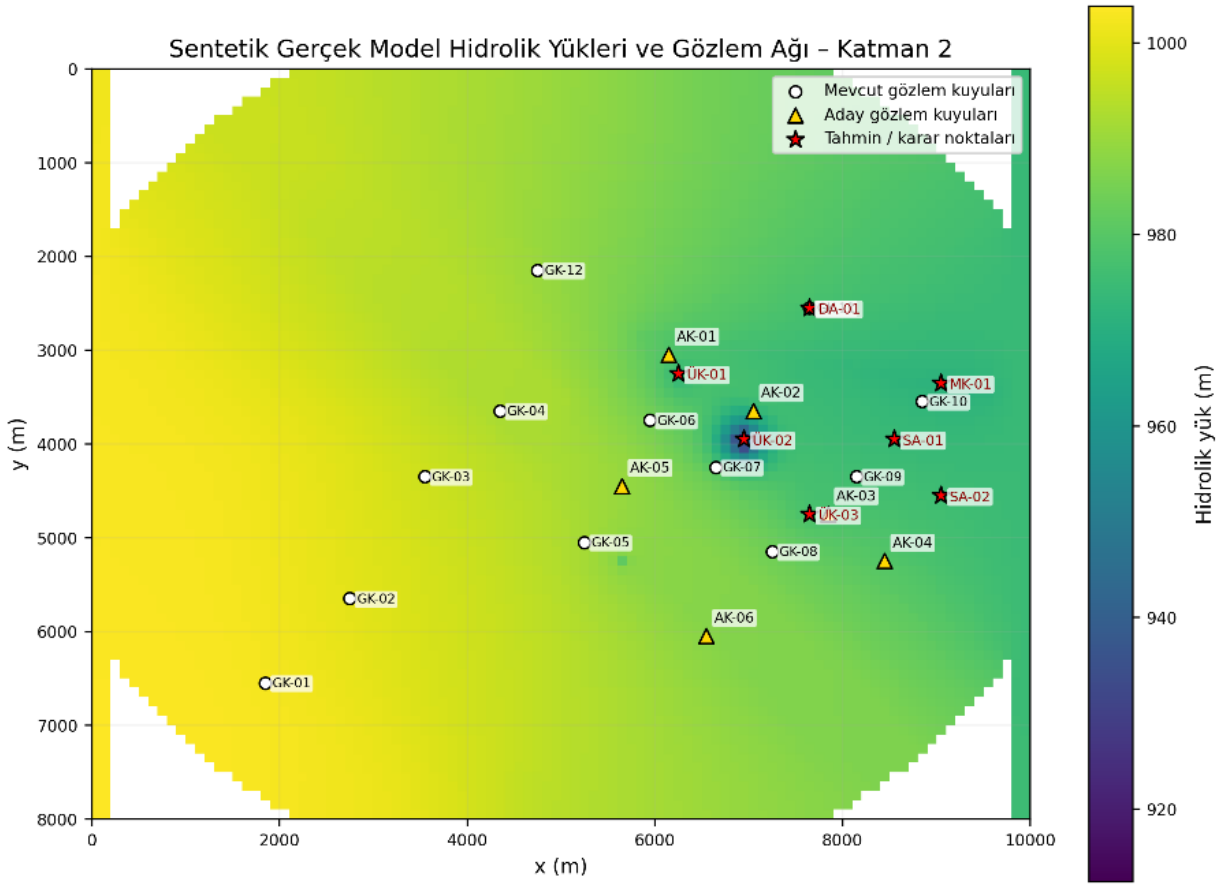
Çalışmada gerçek saha verisi yerine kontrollü bir sentetik modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Bu kapsamda önce sentetik gerçek model, diğer bir ifadeyle "sentetik gerçek model", oluşturulmuş; ardından bu modelden hidrolik yük değerleri okunarak sentetik gözlem veri seti hazırlanmıştır. Gözlem noktalarına ölçüm hatasını temsil eden rastgele gürültü eklenmiştir. Kalibrasyon veri seti 12 adet sentetik hidrolik yük gözleminden oluşmaktadır. Bu gözlemler bölgesel akım, merkezi havza, pompaj etkisi, yapısal zon, düşük geçirgenlikli lens ve mansap/sulak alan etkilerini temsil edecek şekilde dağıtılmıştır. Ayrıca üretim kuyuları, sulak alan/akarsu etkisi ve mansap kontrolü için tahmin/karar noktaları tanımlanmıştır.



Şekil 1. 3B kavramsal hidrojeolojik blok model
Not: Düşey ölçek yalnızca görselleştirme amacıyla büyütülmüştür



Şekil 2. Topografya ile uyumlu hidrojeolojik blok-kesit modeli



Şekil 3.Gerçek model hidrolik yükleri ve gözlem ağı

Not: GK mevcut gözlem kuyusunu, AK aday gözlem kuyusunu, ÜK üretim kuyusu karar noktasını, SA sulak alan karar noktasını, MK mansap kontrol noktasını ve DA derin akifer noktasını göstermektedir.

2.3. Parametreleştirme ve Önsel Model Topluluğu

İlk uygulamada hücre bazlı doğrudan kalibrasyon yerine, hidrojeolojik bölge ve katman esaslı düşük boyutlu bir parametreleştirme tercih edilmiştir. Bu kapsamda her hidrojeolojik bölge ve ilgili katman için log10 yatay hidrolik iletkenlik çarpanı ve log10 düşey hidrolik iletkenlik çarpanı tanımlanmıştır. Toplamda 24 adet ayarlanabilir parametre kullanılmıştır. Bu parametreleştirme, modelin hem hesaplama açısından yönetilebilir hem de hidrojeolojik olarak yorumlanabilir kalmasını sağlamıştır. Önsel model topluluğu gözlem verisiyle güncellenmeden önceki model gerçekleşimi topluluğunu ifade etmektedir. Bu model topluluğu, hidrojeolojik birimlere atanan beklenen hidrolik iletkenlik değerleri ve log-standart sapmalar üzerinden üretilmiştir. Böylece gözlem verisiyle güncelleme öncesindeki olası model davranış aralığı nicel olarak temsil edilmiştir.

2.4. PESTPP-IES ile Model Topluluğu Güncelleme

Parametre güncellemesi için PESTPP-IES kullanılmıştır. PEST++ Version 5 yazılım ailesi; yüksek boyutlu ters problem, duyarlılık, belirsizlik, yönetim optimizasyonu ve parametre kestirimi uygulamaları için geliştirilmiş modelden bağımsız araçlar içermektedir [3]. PESTPP-IES ise yüksek boyutlu problemlerde geçmişe uyum ve belirsizlik nicelendirmesi için kullanılan modelden bağımsız iteratif gerçekleşim topluluğu düzleştirme yaklaşımıdır [4].

Bu çalışmada PESTPP-IES, 12 sentetik hidrolik yük gözlemine karşı 24 bölge-katman parametresini güncellemek için kullanılmıştır. Güncelleme sonrasında elde edilen sonsal model topluluğu, gözlem verisiyle koşullandırılmış model gerçekleşimleri topluluğunu ifade etmektedir. Sonsal parametre model topluluğu tekrar MODFLOW 6 üzerinden çalıştırılarak karar noktalarındaki sonsal tahmin belirsizliği hesaplanmıştır.

PESTPP-IES kurulumu için kullanılan temel ayarlar Tablo 1'de verilmiştir. Bu ayarlar, yöntemin tekrarlanabilirliğini sağlamak ve model güncelleme sürecinin izlenebilir olmasını sağlamak amacıyla metne eklenmiştir.

Tablo 1. PESTPP-IES uygulamasında kullanılan temel ayarlar

Ayar / parametre	Kullanılan değer	Açıklama
Ayarlanabilir parametre sayısı	24	Bölge-katman bazlı log10 Kh ve log10 Kv çarpanları
Gözlem sayısı	12	Sentetik hidrolik yük gözlemleri
noptmax	6	Maksimum IES iterasyon sayısı
ies_num_reals	50	Başlangıçta hedeflenen gerçekleşim topluluğu gerçekleşim sayısı
ies_include_base	True	Baz gerçekleşim topluluğu içinde tutulması
ies_lambda_mults	0,1, 1,0, 10,0	Lambda çarpanları
ies_subset_size	10	Her güncellemede kullanılan alt gerçekleşim topluluğu boyutu
ies_bad_phi	1,0e20	Başarısız/uygunsuz koşular için phi eşiği
Sonsal tahmin koşuları	32	Başarıyla tamamlanan sonsal MODFLOW 6 koşuları

3. Değerlendirme

3.1. Sonsal Gözlem Uyumu

PESTPP-IES sonrası sonsal gözlem uyumu başarılı bulunmuştur. RMSE, yani hata kareleri ortalamasının karekökü, 0,302 m; MAE, yani mutlak ortalama hata, 0,231 m olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sentetik gözlem veri seti açısından modelin hidrolik yükleri iyi temsil ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte gözlem noktalarında düşük hata elde edilmesi, karar noktalarındaki tahmin belirsizliğinin tamamen ortadan kalktığı anlamına gelmez. Bu nedenle model performansı yalnızca gözlem uyumu ile değil, önsel ve sonsal tahmin belirsizliği karşılaştırması ile birlikte değerlendirilmiştir.

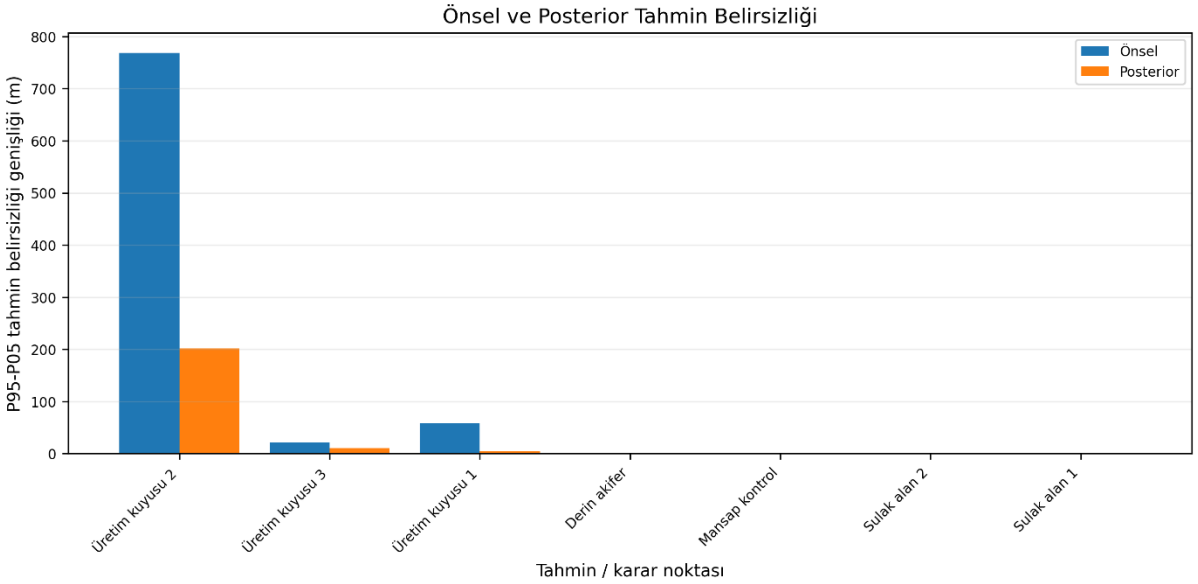
3.2. Parametre Belirsizliğindeki Değişimi

Bölge-katman bazlı parametrelerde önsel ve sonsal standart sapmalar karşılaştırılmıştır. Önsel, gözlem verisiyle güncellenmeden önceki parametre belirsizliğini; sonsal ise gözlem verisiyle güncellenmiş parametre belirsizliğini temsil etmektedir. PESTPP-IES güncellemesi sonrasında bazı parametrelerde belirgin standart sapma azalımı elde edilmiştir. Bu durum, 12 hidrolik yük gözleminin özellikle üst ve orta akifer birimlerindeki hidrolik iletkenlik davranışını kısmen kısıtlayabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, derin katmanlar ve üretim kuyusu çevresindeki lokal etkiler açısından belirsizlik tamamen ortadan kalkmamıştır. Bu sonuç, gözlem ağı yoğunluğu ve konumunun tahmin belirsizliği üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

3.3. Tahmin Belirsizliğindeki Değişim

Karar noktalarında önsel ve sonsal tahmin belirsizlikleri karşılaştırılmıştır. Sonsal aşamada 32 model gerçekleşim başarıyla çalıştırılmıştır. Karar noktalarında ortalama tahmin standart sapma azalımı %77,53 olarak hesaplanmıştır. Tahmin noktaları arasında belirsizlik azalımı %52,70 ile %91,99 arasında değişmiştir. Bu sonuç, sentetik gözlem ağının model tahminlerini önemli ölçüde kısıtladığını göstermektedir.

Belirsizlik azalımına rağmen üretim kuyusu çevresindeki bazı karar noktalarında yüksek kalan belirsizlik korunmuştur. Bu çalışmada ÜK-02, ikinci üretim kuyusu çevresindeki hidrolik yük/tahmin belirsizliği karar noktasını temsil etmektedir. Bu noktada sonsal P95-P05 aralığı, yani sonsal model topluluğu sonuçlarının %5 ve %95 yüzdelikleri arasındaki belirsizlik genişliği, 201,8 m olarak hesaplanmıştır. Bu değer, üretim kuyusu çevresindeki lokal hidrolik yük/tahmin noktasının sonsal model gerçekleşimleri arasında hâlen geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle ÜK-02 çevresi, pompaj etkisi ve yerel hidrojeolojik heterojenlik açısından karar belirsizliğinin yüksek kaldığı kritik bir alan olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Önsel ve sonsal tahmin belirsizliği karşılaştırması

3.4. İzleme Ağı Önceliklendirmesi

Sonsal tahmin belirsizliği sonuçları, izleme ağı tasarımına aktarılmıştır. Bu amaçla aday gözlem kuyuları; yerel sonsal belirsizlik, yüksek riskli tahmin/karar noktalarına yakınlık, hidrojeolojik bağlam ve alıcı ortam duyarlılığı dikkate alınarak önceliklendirilmiştir. Öncelik skoru, kesin bir hidrojeolojik gerçeklik değeri değil, karar destek amacıyla geliştirilmiş şeffaf ve izlenebilir bir göstergedir.

Aday gözlem kuyusu öncelik skoru, dört bileşenin ağırlıklı toplamı olarak hesaplanmıştır:

$$S_i = 0.35U_i + 0.30D_i + 0.20H_i + 0.15L_i \quad (1)$$

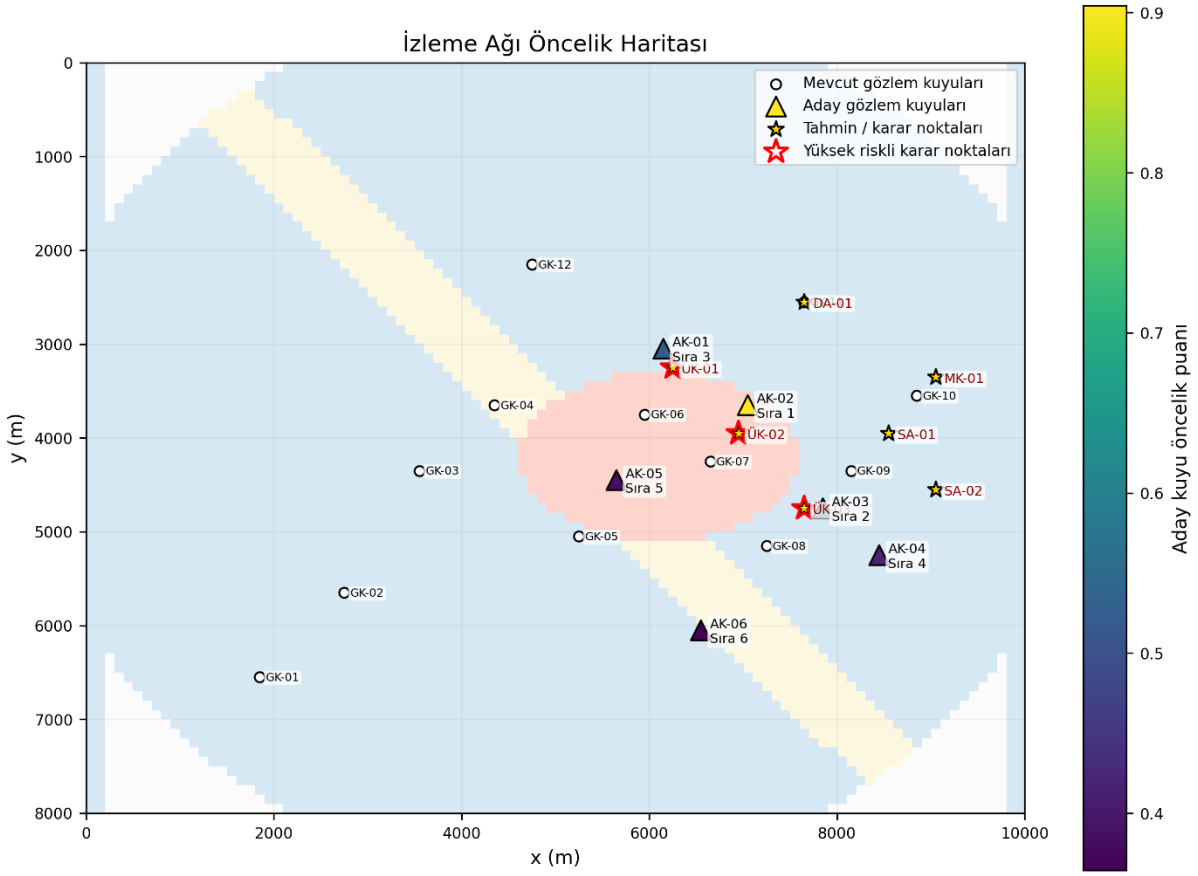
Burada (S_i) aday kuyu öncelik skorunu, (U_i) aday kuyudaki yerel sonsal belirsizlik skorunu, (D_i) en yakın yüksek riskli karar noktasına yakınlık skorunu, (H_i)hidrojeolojik/alıcı ortam önem skorunu ve (L_i) en yüksek kalan belirsizlik noktasına yakınlık skorunu ifade etmektedir. (U_i), aday kuyudaki sonsal P95-P05 hidrolik yük aralığının 0–1 arasında normalize edilmesiyle hesaplanmıştır. Yakınlık skorları mesafe arttıkça azalan üstel fonksiyonla tanımlanmıştır:

$$D_i = \exp(-d_i/1500), \quad L_i = \exp(-l_i/1500) \quad (2)$$

Burada (d_i) en yakın yüksek riskli karar noktasına, (l_i) ise en yüksek kalan belirsizlik noktasına olan mesafedir. (H_i) ise aday kuyunun üretim kuyusu çevresi, yapısal akım koridoru, düşük geçirgenlikli lens veya sulak alan/akarsu etkisi gibi hidrojeolojik bağlamına göre atanmıştır.

Bu formülde yerel belirsizlik skoru, aday kuyudaki sonsal P95-P05 hidrolik yük aralığının 0–1 arasında normalize edilmesiyle hesaplanmıştır. Yüksek riskli karar noktasına yakınlık skoru ve en yüksek kalan belirsizlik noktasına yakınlık skoru, mesafe arttıkça azalan üstel bir fonksiyonla değerlendirilmiştir. Hidrojeolojik/alıcı ortam önem skoru ise aday kuyunun temsil ettiği bağlama göre atanmıştır; üretim kuyusu çevresi, yapısal akım koridoru, düşük geçirgenlikli lens, mansap kontrolü ve sulak alan/akarsu etkisi gibi konumlar farklı önem katsayılarıyla değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, aday kuyuların yalnızca mekânsal dağılıma göre değil, karar belirsizliğine katkı potansiyeline göre de sıralanmasını sağlamıştır.

Sonuçlara göre en yüksek öncelikli aday gözlem kuyusu AK-02 olarak belirlenmiştir. Bu kuyu, ikinci aday gözlem kuyusunu temsil etmektedir ve en yüksek kalan belirsizlik noktası olan ÜK-02 karar noktasına yaklaşık 316 m mesafededir. Bu nedenle AK-02, pompaj etkisinin izlenmesi ve ilgili tahmin belirsizliğinin daha iyi kısıtlanması açısından ilk faz izleme ağına dahil edilmesi önerilen en kritik adaydır. İkinci sırada AK-03 yer almakta olup, yapısal akım koridoru bağlamında önemli bir adaydır. AK-01 ise üretim kuyusu çevresini temsil etmesine rağmen yerel sonsal belirsizlik genişliği daha düşük olduğu için üçüncü sırada değerlendirilmiştir.



Şekil 5. İzleme ağı öncelik haritası
(Not: GK mevcut gözlem kuyusunu, AK aday gözlem kuyusunu, ÜK üretim kuyusu karar noktasını, SA sulak alan karar noktasını, MK mansap kontrol noktasını ve DA derin akifer noktasını göstermektedir.)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada sentetik bir 3B akifer sistemi üzerinde belirsizlik tabanlı yeraltısuyu karar destek iş akışı geliştirilmiştir. MODFLOW 6 ve FloPy ile oluşturulan model, PESTPP-IES kullanılarak sentetik gözlemlerle güncellenmiş; sonsal parametre gerçekleşim topluluğu üzerinden karar noktalarındaki tahmin belirsizliği değerlendirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Sentetik 3B model, 10 km × 8 km alan, 100 m hücre boyutu ve 6 katmanlı hidrojeolojik yapı ile kurulmuştur. Modelde üst alüvyon, alt alüvyon, ayrışmış ana kaya, ana kaya, yapısal yüksek geçirgenlik zonu ve düşük geçirgenlikli lens birimleri temsil edilmiştir.
2. PESTPP-IES uygulamasında 24 adet bölge-katman bazlı log10 yatay hidrolik iletkenlik ve düşey hidrolik iletkenlik çarpanı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, hücre bazlı aşırı parametreleştirmeden kaçınarak modelin yorumlanabilir kalmasını sağlamıştır.
3. PESTPP-IES kurulumu için temel ayarlar metinde verilmiştir. Buna göre noptmax = 6, ies_num_reals = 50, ies_lambda_mults = 0,1, 1,0, 10,0 ve ies_subset_size = 10 olarak kullanılmıştır. Sonsal tahmin değerlendirmesi 32 başarılı MODFLOW 6 koşusu üzerinden gerçekleştirilmiştir.
4. Sonsal gözlem uyumu başarılı bulunmuş; RMSE 0,302 m ve MAE 0,231 m olarak hesaplanmıştır. Buna karşın gözlem uyumu tek başına karar noktalarındaki tahmin güvenilirliğini temsil etmediğinden, sonsal tahmin belirsizliği ayrıca değerlendirilmiştir.
5. Karar noktalarında ortalama tahmin standart sapma azalımı %77,53 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, sentetik gözlem verisinin tahmin belirsizliğini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

6. En yüksek kalan belirsizlik üretim kuyusu çevresindeki ÜK-02 karar noktasında hesaplanmıştır. Bu nokta için sonsal P95-P05 belirsizlik genişliği 201,8 m'dir. Bu durum, pompaj etkisi ve yerel hidrojeolojik heterojenliğin karar belirsizliği üzerinde belirgin rol oynadığını göstermektedir.
7. İzleme ağı önceliklendirmesinde AK-02 birinci sırada yer almıştır. Bu kuyu, en yüksek kalan belirsizlik noktasına yakınlığı ve pompaj etkisini temsil etmesi nedeniyle ilk faz izleme ağına dahil edilmesi önerilen en kritik adaydır.
8. Çalışma, yeraltısuyu modellemesinde tekil kalibrasyon sonucundan ziyade önsel – sonsal tahmin belirsizliği ve karar noktası bazlı izleme önceliği yaklaşımının daha güçlü bir karar destek çerçevesi sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışma gerçek saha verisi yerine sentetik bir gerçek model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sonuçlar belirli bir sahaya doğrudan aktarılmamalıdır. Ancak geliştirilen iş akışı; gerçek havza, sulama alanı, endüstriyel su temini veya madencilik hidrojeolojisi uygulamalarına uyarlanabilir niteliktedir. Gelecek aşamalarda modelin geçici rejim, sezonluk beslenim, farklı pompaj senaryoları, akarsu/sulak alan debi etkileri ve alansal çekim-düşüm olasılığı haritaları ile genişletilmesi önerilmektedir.

5. Kaynaklar

[1] Langevin, C. D., Hughes, J. D., Provost, A. M., Banta, E. R., Niswonger, R. G. ve Panday, S. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A55, 197 s. https://doi.org/10.3133/tm6A55

[2] Hughes, J. D., Larsen, J. D., Banta, E. R., Bedekar, V., Schmid, W., Dausman, A. M., Morway, E. D., Leaf, A. T. ve Fienen, M. N. (2024). FloPy Workflows for Creating Structured and Unstructured MODFLOW Models. Groundwater, 62(1), 124–139. https://doi.org/10.1111/gwat.13327

[3] White, J. T., Fienen, M. N. ve Doherty, J. E. (2020). Approaches to Highly Parameterized Inversion: PEST++ Version 5, a Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Analysis, Management Optimization and Sensitivity Analysis. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 7, Chapter C26, 52 s. https://doi.org/10.3133/tm7C26

[4] White, J. T. (2018). A model-independent iterative ensemble smoother for efficient history-matching and uncertainty quantification in very high dimensions. Environmental Modelling & Software, 109, 191–201. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.009

[5] Çakmak, S. ve Doğan, A. (2011). Afyonkarahisar Şuhut Ovası'nın Yeraltısuyu Modellemesi. 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 12–16 Eylül 2011, Orhantepe/İstanbul, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, s. 173–188.

Hidrolojik Çalışmaların Güncellenmesi Gerekliliği

Muhsin VANOLYA*
Vanolya Su Ekosistemleri, Ankara/Çankaya, 0000-0002-3519-1877
mvanolya@sueko.com.tr

Anahtar Kelimeler: hidrolojik modelleme, durağan olmayan hidroloji, akım doğallaştırma, taşkın hidrolojisi, iklim değişikliği

1. Amaç

Türkiye'de su kaynakları planlaması ve taşkın risk yönetiminde kullanılan hidrolojik çalışmalar; gözlem ağı, veri kalitesi, durağanlık varsayımı, model seçimi, kalibrasyon, iklim değişikliği ve işletme etkileri bakımından yeniden değerlendirilmelidir. Uzun dönemli meteoroloji ve akım serileri artık yalnız doğal iklim değişkenliğini değil; arazi kullanımı, kentleşme, barajlar, sulama, yeraltı suyu çekimleri ve dönüş sularının birleşik etkisini taşımaktadır. Bu koşullarda geçmiş örneklemin olasılık dağılımının gelecekte değişmeden kalacağı varsayımı, özellikle uzun ekonomik ömürlü su yapılarında karar riskini artırmaktadır [1].

Çalışmanın amacı, Türkiye'de aylık su kaynakları ve taşkın hidrolojisi çalışmalarının güncellenmesi için veri kaynağından mühendislik kararına kadar izlenebilir bir çerçeve önermektir. Öneri; (i) gözlem ve uzaktan algılama verilerinin kalite kontrollü bütünleştirilmesi, (ii) değişim noktası ve durağan olmayan frekans analizleri, (iii) gözlenmiş akımın doğallaştırılması, (iv) amaç ve ölçeğe uygun süreç tabanlı modelleme, (v) çok ölçütlü kalibrasyon–doğrulama, (vi) iklim ve işletme senaryoları ile (vii) belirsizliğin tasarım kararlarına aktarılması bileşenlerinden oluşmaktadır. Literatüre katkı, aylık su potansiyeli ile olay tabanlı taşkın hesabını aynı kalite güvence zinciri içinde ele alan uygulanabilir bir iş akışı sunmasıdır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Veri Envanteri ve Kalite Güvencesi

Su kaynakları çalışmalarında veri analizi; meteorolojik ve hidrolojik gözlemleri, kar ve buharlaşma verilerini, nehirlerin temel akım eğrilerini, toprak ve arazi örtüsü bilgilerini ve su kullanım kayıtlarını kapsar. Uygun durumlarda sulanan alan, kar örtüsü ve toprak nemine ilişkin uzaktan algılama ürünlerinden de yararlanılır. Bu veriler kullanılmadan önce ölçüm kalitesi ve istasyonların değişiklik geçmişi incelenmeli; fiziksel sınırlar, süreklilik, tutarlılık, aykırı değerler ve komşu istasyonlarla uyum açısından kontrol edilmelidir [2]. Eksik gözlemler uygun yöntemlerle tamamlanmalı, yöntemlerin başarısı çapraz doğrulamayla sınanmalı ve tahmin hataları ile belirsizlikler kayıt altına alınmalıdır. İstasyon seçiminde yalnızca uzaklık değil; topografya, yağış rejimi, kayıt dönemlerinin örtüşmesi, istasyonlar arası ilişki ve havzayı temsil etme düzeyi de dikkate alınmalıdır. Thiessen poligonları kullanıldığında poligon sınırlarının havza yağışı üzerindeki etkisi incelenmeli; sonuçlar, uygun veri koşullarında eş yağış eğrilerine dayalı mekânsal yöntemlerle karşılaştırılmalıdır. Yöntem ve istasyon seçimi, su potansiyeli ile havza ortalama maksimum yağış hesaplarını doğrudan etkileyebilir.

2.2 Durağan Olmayan Hidroloji ve Değişim Analizi

Türkiye'de yıllık maksimum yağış ve akım değerleri çoğunlukla durağan frekans analiziyle değerlendirilmektedir. Ancak serilerde istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim veya değişim noktası bulunması, durağanlık varsayımının yeniden incelenmesini gerektirir. Bu durum, insan müdahaleleri ve iklimsel değişkenlikten etkilenen akım serileri için özellikle önemlidir. Ön analizde yağış ve akım serilerine Mann–Kendall ve Spearman eğilim testleri, Pettitt veya benzeri değişim noktası testleri, hareketli ortalama ve varyans incelemeleri uygulanmalıdır. Veri tutarlılığı çift kütle eğrileriyle de değerlendirilmelidir. Akımın oluşumundaki değişimi daha iyi anlamak amacıyla, sürekli akım serilerinde taban akımı ve hızlı akım bileşenleri ayrılarak ayrıca incelenebilir. Saptanan değişimler; istasyon taşınması, ölçüm yöntemleri, baraj işletmesi, arazi örtüsü ve su kullanımı kayıtlarıyla karşılaştırılmadan doğrudan iklim değişikliğine bağlanmamalıdır. Durağanlık varsayımı uygun bulunmazsa frekans analizinde dağılım parametreleri zamanın veya gerekçelendirilmiş iklimsel açıklayıcı değişkenlerin fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Durağan olmayan frekans analizinde dağılım parametreleri zamanın veya açıklayıcı iklim değişkenlerinin fonksiyonu olarak tanımlanabilir:

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \; ; \quad ve \quad \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \tag{1}$$

Model karmaşıklığı, uygun seçim ölçütleri kullanılarak sınırlandırılmalı; frekans analizi sonuçları ise yapıların ekonomik ömrü ve proje süresince maruz kalacakları aşılma riskiyle birlikte değerlendirilmelidir.

2.3 Akımın Doğallaştırılması ve Hidrolojik Model Kullanılması

AGİ'lerde ölçülen debi, membadaki depolama ve kullanımlar nedeniyle doğal havza tepkisini göstermeyebilir. Aylık su potansiyeli değerlendirmesinde gözlenmiş akım, mevcut bilgi düzeyine göre aşağıdaki genel dengeyle doğallaştırılmalıdır:

$$Qnat = Qobs + Qtük + \Delta Srez + Qaktar,dış - Qaktar,iç - Qdönüş \tag{2}$$

Burada Q_{nat} doğal akımı, Q_{obs} gözlenen akımı, $Q_{tük}$ tüketici su kullanımını, ΔS_{rez} rezervuar depolama değişimini, Q_{aktar} havzalar arası transferleri ve $Q_{dönüş}$ geri dönen akımı ifade eder. İşaretler kontrol hacmi esasına göre açıkça tanımlanmalı; bilinmeyen bileşenler sıfır kabul edilmek yerine aralık veya senaryo olarak ele alınmalıdır. Doğallaştırılmış seri; havza su potansiyeli, çevresel akış ve geceleye göre referansı olmalıdır. Gerçekte, doğallaştırılmış akım ölçülen değil, türetilmiş bir seridir ve belirsizlik aralığıyla sunulmalıdır. Bu yöntem, su tüketimini sınırlı ölçüde ele almakta; yeraltı suyu depolamasındaki değişimleri ve son yıllarda gözlenen yeraltı suyu seviyesi düşüşlerinin etkilerini dikkate almamaktadır. Bu nedenle hidrolojik etütlerde, çalışmanın amacı ve alanın özelliklerine uygun bir hidrolojik modelin kurulması ve sonuçlarının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Model seçimi kademeli yapılmalıdır. Veri kısıtlı aylık planlama çalışmalarında az parametreli su dengesi modelleri; toprak nemi, kar, yeraltı suyu, arazi kullanımı ve su yönetimi süreçlerinin ayrı ayrı temsil edilmesi gereken çalışmalarda kavramsal veya yarı dağıtılmış modeller kullanılabilir. Taşkın analizlerinde ise kayıp, yağış–akış dönüşümü, taban akımı ve akım ötelemesi bileşenlerini içeren olay tabanlı modeller uygundur. Sürekli benzetim, taşkın öncesindeki toprak nemi koşullarının model içinde hesaplanmasını sağlar.

2.4 Kalibrasyon, Doğrulama ve Belirsizlik

Türkiye'de su kaynakları çalışmalarında akım gözlem istasyonu (AGİ) ölçümlerinin düzeltim yöntemiyle doğallaştırılması, çoğu zaman bir hidrolojik modelin kalibrasyonu yerine kullanılmaktadır. Ancak gözlenen akımın insan müdahalelerinden arındırılması, modelin yağış–akış süreçlerini doğru temsil ettiğini tek başına göstermez. Özellikle taşkın hesaplarında model parametrelerinin gözlenen olaylara göre kalibre edilmesi ve bağımsız olaylarla doğrulanması gerekir.

DSİ ve SYGM taşkın hidrolojisi çalışmalarında belirsizlik karşısında güvenli tarafta kalmak amacıyla yüksek parametre değerleri seçilebilmektedir. Bu yaklaşım taşkın debilerini ve tedbir maliyetlerini artırabilir; ancak belirsizliğin kaynağını veya hesapların doğruluğunu ortaya koymaz. Kalibrasyon yalnızca tepe debisini ya da tek bir başarı ölçütünü iyileştirmeye indirgenmemelidir. Aylık su kaynakları modellerinde toplam akış hacmi, düşük akımlar, mevsimsellik ve taban akımı; taşkın modellerinde ise pik debi, pik zamanı, hidrograf hacmi ile yükselme ve çekilme kolları birlikte değerlendirilmelidir. Nash–Sutcliffe etkinliği, Kling–Gupta etkinliği, yüzde yanlılık, RMSE ve olay bazlı pik debi ile zamanlama hataları bu değerlendirmede birbirini tamamlayan ölçütlerdir [4,5]. Örneğin NSE aşağıdaki biçimde hesaplanır:

$$NSE = 1 - \Sigma(Qobs,t - Qsim,t)^2 / \Sigma(Qobs,t - \bar{Q}obs)^2 \tag{3}$$

Kalibrasyon ve doğrulama bağımsız dönem veya olaylarda yapılmalı; kullanılan olayların büyüklük ve öncül nem koşulları hedef tasarım durumunu temsil etmelidir [6]. Parametre eşsonluluğu, veri hatası ve model yapısı belirsizliği; Monte Carlo/GLUE, çoklu parametre kümeleri veya çoklu model topluluklarıyla değerlendirilmelidir [7]. Sonuçların tek bir "en iyi" hidrograf yerine uygun davranışsal çözümler ve güven/olasılık aralıklarıyla raporlanması önerilmektedir.

Taşkın tasarım hesaplarında toplam yağış yüksekliğinin yanı sıra yağış süresi, en yüksek şiddetin gerçekleştiği zaman, yağışın zamansal dağılımı ve fırtına merkezinin hareketi PLV kayıtlarından incelenmelidir. Tasarım hiyetografı bölgesel gözlemlere göre oluşturulmalı; kritik yağış süresi, farklı sürelerin hidrolojik modelde sınanmasıyla belirlenmelidir. Eğri numarası, başlangıç kaybı, konsantrasyon veya gecikme süresi, birim hidrograf pik katsayısı ve taban akımı gibi parametreler

standart tablolardan doğrudan alınmak yerine gözlenen olaylarla kalibre edilmelidir. Ölçümsüz havzalarda fiziksel ve iklimsel benzerliğe dayalı bölgeselleştirme yapılmalı, parametre aktarımından kaynaklanan hata değerlendirilmelidir.

Taşkın öncesi taban akımı ve toprak nemi, mevsime ve önceki yağışlara bağlı olarak değişir. Sayısal filtreleme veya hidrograf ayrıştırmasıyla tahmin edilen taban akımı, olay başlangıç debisinin ve hidrografın çekilme davranışının temsilinde kullanılabilir.

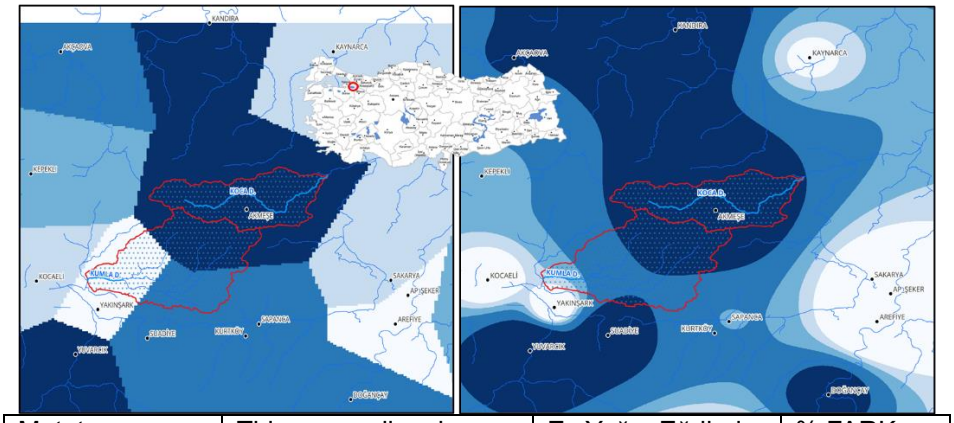
2.5 İklim Değişikliği ve Senaryo Tasarımı

İklim değişikliğinin etkileri taşkın hidrolojisi çalışmalarında sistematik olarak değerlendirilmelidir. Bu etki, geçmiş taşkın debilerine tek bir artış katsayısı uygulanarak temsil edilmemelidir. CMIP6 model topluluğundan seçilen veya Türkiye için üretilen iklim senaryolarının yağış ve sıcaklık serileri, referans dönem gözlemleriyle karşılaştırılarak uygun yöntemlerle yanlılık düzeltmesine tabi tutulmalıdır. Gelecekteki kısa süreli yağış şiddeti, yağışın zamansal dağılımı, potansiyel evapotranspirasyon (PET) ve öncül nem koşulları hidrolojik modelde birlikte değerlendirilmelidir. IPCC değerlendirmeleri, küresel ısınmayla birlikte su döngüsünün ve birçok bölgede şiddetli yağışların değiştiğini göstermektedir [8].

Yakın, orta ve uzak gelecek dönemleri için iklim modeli, emisyon senaryosu, hidrolojik model parametreleri ve yapı işletme alternatifleri ayrı deneyler olarak ele alınmalıdır. Ayrıntılı iklim–hidroloji modellemesinin mümkün olmadığı ön değerlendirmelerde, farklı tekerrür süreleri için kısa süreli yağışlara uygulanan bölgesel değişim katsayıları pratik bir seçenek olabilir. Bu katsayıların yağış süresine, tekerrür süresine ve bölgeye göre değişimi ile taşıdıkları belirsizlik açıkça belirtilmelidir.

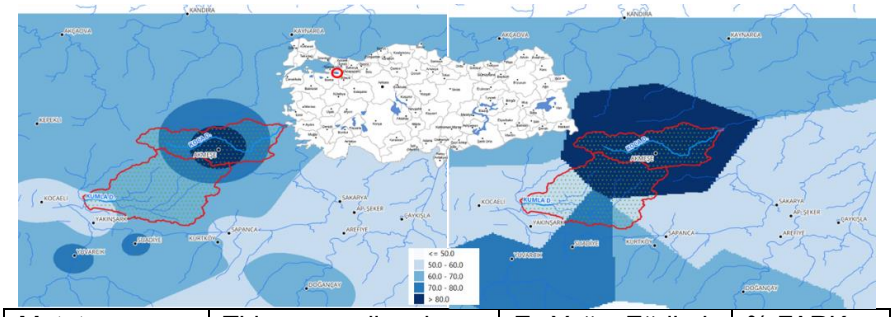
3. Değerlendirme

Hidrolojik etütler için önerilen çerçeve; veri kalite kontrolü, uygun frekans analizinin seçimi ve hidrolojik hesapların belgelenmiş varsayımlarla yürütülmesi aşamalarını kapsamaktadır. Böylece her sonuç, kaynak veriye, kullanılan yönteme ve varsayımlara kadar izlenebilir. Önerilen yaklaşımın uygulaması, Marmara ve Sakarya havzaları arasındaki bölgede yer alan Küçük Koca Dere üzerinden örneklendirilmektedir. Şekil 1 ve Şekil 2'de, Koca ve Kumlu dereleri için yıllık yağış ve yıllık maksimum yağışın Thiessen poligonları ile eş yağış eğrileri kullanılarak hesaplanan alansal değerleri karşılaştırılmaktadır. Küçük havzaların geniş bir Thiessen poligonu içinde kalması, tek bir istasyonun havza yağışı hesabında orantısız ağırlık kazanmasına neden olabilir. Bu nedenle istasyonların havzayı temsil etme düzeyi ve alansal yağış hesaplama yöntemi birlikte değerlendirilmelidir. Şekil 3'te çalışma alanındaki iki istasyonun durağan ve durağan olmayan frekans analizi sonuçları karşılaştırılmaktadır. Ayrıca taşkın hidrograflarının kalibrasyonuna yönelik bir örnek sunulmaktadır. Bu örnekte, yazar tarafından QGIS ortamında geliştirilen arayüzle havza sınırı, toprak tipi, arazi kullanımı ve eğim verileri kullanılarak eğri numarası belirlenmekte; yağışın zamansal dağılımı ve farklı tekerrür süreleri dikkate alınarak kalibrasyon süreci gösterilmektedir.



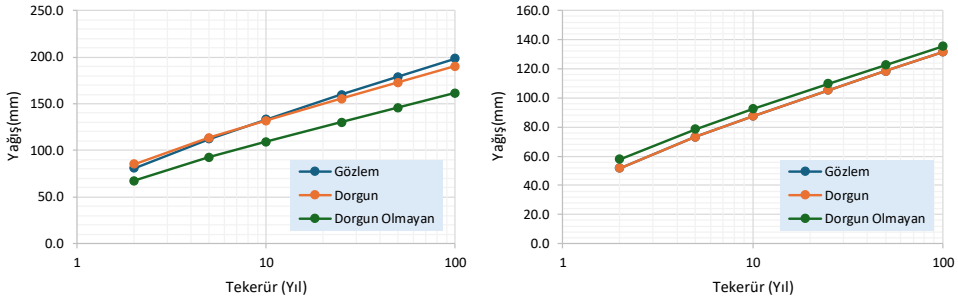
Metot	Thiessen poligonları	Eş Yağış Eğrileri	% FARK
Koca Deresi	1318.5	1146.4	-13.05
Kumla Deresi	1071.4	990.5	-7.55

Şekil 1. Uzun yıllar yağış Thiessen poligonları ve eş yağış eğrileri mukayesesi örneği



Metot	Thiessen poligonları	Eş Yağış Eğrileri	% FARK
Koca Deresi	90.6	78.1	-13.8
Kumla Deresi	72.3	66.3	-8.4

Şekil 2. Yıllık en maksimum günlük yağış Thiessen poligonları ve eş yağış eğrileri mukayesesi örneği



İstasyon	Tekerür (mm)						İstasyon	Tekerür (mm)					
	2	5	10	25	50	100		2	5	10	25	50	100
AKMEŞE	81.0	112.5	133.3	159.6	179.1	198.5	KOCAELİ	51.9	73.2	87.4	105.3	118.5	131.7
	85.4	113.5	132.0	155.5	172.9	190.2		51.9	73.2	87.4	105.3	118.5	131.7
	67.6	92.7	109.3	130.3	145.9	161.4		58.0	78.7	92.4	109.8	122.6	135.4

Şekil 3. Örnek yıllık yağış Thiessen poligonları ve eş yağış eğrileri mukayesesi



Şekil 4. Örnek havza kalibrasyon arayüzü

Bu çalışmada önerilen en önemli değişiklik, “tek doğru tasarım değeri” anlayışından, veri, yöntem, iklim ve işletme koşullarına ilişkin belirsizlikleri karar vericiye açıkça sunan risk temelli bir yaklaşıma geçiştirir. Hidrolojik modellerin daha yaygın kullanılması mühendislik muhakemesini azaltmaz; aksine model yapısının çalışma amacına uygunluğunun, parametrelerin fiziksel anlamının ve sonuçların hidrolik ile yapısal etkilerinin değerlendirilmesini zorunlu kılar.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye’de yürütülen hidrolojik etütlerin iyileştirilmesine yönelik öneriler geliştirilmiş ve Tablo 1’de özetlenmiştir. Hidrolojik sonuçların güvenilirliği, öncelikle ölçüm metaverisinin korunması, verilerin kalite kontrolünden geçirilmesi ve veri kökeninin kayıt altına alınmasıyla sağlanmalıdır. Akım gözlem istasyonu (AGİ) kayıtları; baraj işletmesi, su çekimi, havzalar arası transfer ve dönüş suyu etkileri değerlendirilmeden havzanın doğal su potansiyelini temsil eden veri olarak kullanılmamalıdır. Bu etkileri ve havzadaki hidrolojik süreçleri değerlendirmek için çalışma amacına uygun modeller kurulmalıdır. Durağan olmayan frekans analizleri ve iklim modeli toplulukları, tek bir artış katsayısına dayalı hesaplar yerine senaryoları ve belirsizlikleri görünür kılan kararlar üretmek için kullanılmalıdır. Model kalibrasyonu ve bağımsız doğrulama; toplam hacim, düşük akım, pik debi, pik zamanı ve mevsimsellik gibi birden fazla ölçüte dayanmalıdır. Ortak standartlar, yeniden üretilebilir iş akışları, bağımsız inceleme ve güncel hidroloji eğitimi, önerilen yöntemsel dönüşümün kurumsal temelini oluşturacaktır.

Tablo 1. Mevcut uygulamadan önerilen yaklaşıma geçiş tablosu

Konu veya Parametre	Mevcut Yaygın Kullanılan Yaklaşım	Önerilen yaklaşım
Havza Üzeri Yağış	Thiessen Poligonları	Çok ölçütlü temsil ve ağırlıklandırma
		Eş Yağış Eğrileri
Şiddetli Yağış’lar	Durağan tek dağılım	Değişim testi ve alternatif durağan olmayan model
	-	İklim Değişimi Katsayılar
Aylık Akım	Doğallaştırılmış seri	Bileşen belirsizliği ve Hidrolojik Modeli
Taşkın Hidrografi	Baz Akım	AGİ günlük Verilerinden
	CN Tahmini	AGİ ile Kalibrasyon
Karar	Tek sonuç	Olasılık aralığı, duyarlılık ve uyarlanabilirlik

5. Kaynaklar

[1] Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? Science, 319(5863), 573–574.

[2] World Meteorological Organization (2008). Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology—From Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168, 6th ed., Geneva.

[3] Hydrologic Engineering Center (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.

[4] Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I—A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282–290.

[5] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, 377, 80–91.

[6] Hydrologic Engineering Center (2026). HEC-HMS Technical Reference Manual: Summary of the Calibration Procedure. U.S. Army Corps of Engineers.

[7] Beven, K., Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 6(3), 279–298.

[8] IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

[9] Kundzewicz, Z. W., Robson, A. J. (Eds.) (2004). Change Detection in Hydrological Records—A Review of the Methodology. Hydrological Sciences Journal, 49(1), 7–19.

[10] Arnold, J. G., Allen, P. M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. Journal of the American Water Resources Association, 35(2), 411–424.

Samsun, Türkiye'de Ekstrem Yağış Analizi İçin GPM-IMERG ve CHIRPS Uydu Yağış Ürünlerinin Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Enes YILDIRIM*
Giresun Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Gaziler, Prof. Ahmet Taner Kışlalı Cd., 28200 Giresun Merkez/Giresun, 0000-0002-9043-769X
enes.yildirim@giresun.edu.tr

Babak MAHMOUDI
Giresun Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Gaziler, Prof. Ahmet Taner Kışlalı Cd., 28200 Giresun Merkez/Giresun, 0009-0002-3557-0903
babak.mahmoudi@giresun.edu.tr

Anahtar Kelimeler: uzaktan algılama, GPM-IMERG, CHIRPS, ekstrem yağış, frekans analizi

1. Amaç

Ekstrem yağışların doğru bir şekilde temsil edilmesi, taşkın savakları, kentsel drenaj sistemleri ve köprü menfezleri gibi hidrolik yapıların tasarımı ve işletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak Türkiye'nin Karadeniz bölgesi gibi karmaşık topografyaya sahip alanlarda yağış ölçüm istasyonlarının yoğunluğunun düşük olması, yağış ekstremlerinin güvenilir biçimde tahmin edilmesini güçleştirmektedir. Bu sınırlılık, araştırmacıları alansal ve zamansal olarak sürekli veri sağlayan uydu tabanlı yağış ürünlerine yöneltmiştir. Uydu tabanlı yağış tahmini, geçmişte bulut tepesi sıcaklığına dayalı dolaylı termal kızılötesi yöntemlerden, hidrometeorların fiziksel özelliklerini algılayabilen pasif mikrodalga algılayıcılara ve uzay tabanlı radarlara doğru önemli bir gelişim göstermiştir [1]. Bu gelişim sürecinde GPM-IMERG ürünü günlük ölçekte yer gözlemleriyle güçlü uyum göstermekte [2] ve ekstrem yağış sinyallerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [3]. Bu ürünün başarısı yalnızca algılayıcı teknolojisinden değil, çok sayıda uydu gözleminin gelişmiş birleştirme algoritmalarıyla harmanlanmasından da kaynaklanmaktadır [4]. CHIRPS ürünü ise uydu tahminlerini yer istasyonu verileriyle birleştirerek, özellikle veri açısından kısıtlı bölgelerde uzun dönemli yağış kayıtları oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır [5].

Bununla birlikte, dik kıyı dağlarının nemli hava kütlelerini yükselttiği Samsun gibi orografik etkinin güçlü olduğu bölgelerde, uydu algılama algoritmaları yerel ve kısa süreli yağış patlamalarını her zaman başarıyla yakalayamamaktadır [6]. Karmaşık topografyaya sahip bölgelerde yürütülen çok bölgeli değerlendirmeler, uydu yağış ürünlerinin performansının arazi ve iklim koşullarına göre belirgin biçimde değiştiğini ortaya koymuştur [7]. Benzer şekilde, GPM-IMERG tahminlerinin karmaşık dağlık arazilerde ayrıca doğrulanması gerektiği vurgulanmaktadır [8]. Bu bağlamda çalışmanın amacı, GPM-IMERG (Sürüm 07) ve CHIRPS uydu yağış ürünlerini, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) yer gözlemlerine karşı ekstrem yağış frekans analizi bağlamında değerlendirmek ve 2 ile 500 yıl arasındaki tekerrür süreleri için elde edilen tasarım yağış derinliklerini karşılaştırmaktır.

Çalışmanın literatüre katkısı, söz konusu iki uydu ürününün frekans analizinde birbirinin yerine kullanılıp kullanılamayacağını Karadeniz bölgesi özelinde ortaya koyması ve ürünlerin hidrolik tasarım ile taşkın riski çalışmalarında kullanılabilirliğine ilişkin mühendislik açısından değerlendirme sunmasıdır.

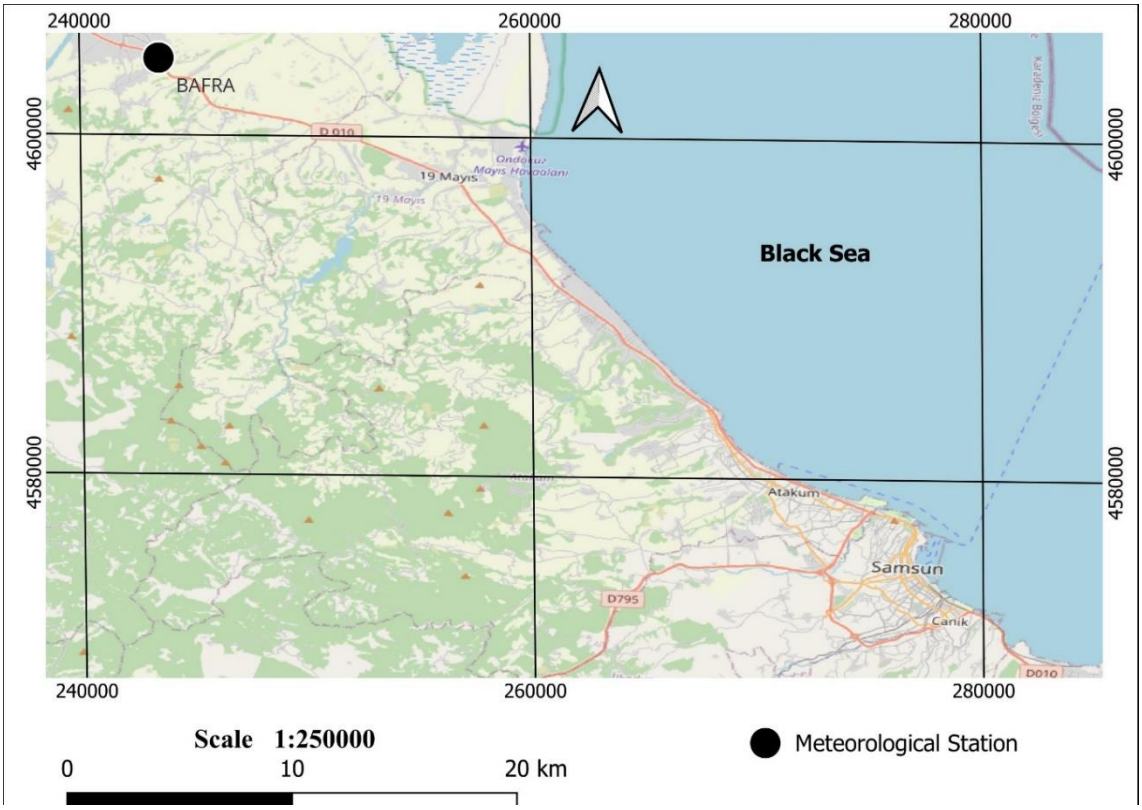
2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Samsun bölgesinde tasarım yağış derinliklerinin ve ekstrem yağış özelliklerinin tahmin edilmesinde yer tabanlı ve uydu tabanlı yağış veri setlerinin yetenekleri karşılaştırılmıştır.

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma, Türkiye'nin Orta Karadeniz kıyısında yer alan Samsun ilinde yürütülmüştür. Analizler, 41.5515° K enlemi ve 35.9247° D boylamında, deniz seviyesinden 103 m yükseklikte bulunan Bafra meteoroloji istasyonuna (İstasyon No. 17622) ait yağış kayıtlarına dayanmaktadır. Referans veri seti olarak 2005–2025 dönemini kapsayan 21 yıllık sürekli günlük yağış kaydı kullanılmıştır. Samsun, yıl boyunca yağış alınan nemli Karadeniz iklimiyle karakterize edilmekte; Karadeniz kaynaklı nemli hava kütleleri ile kuzey Türkiye'nin karmaşık topografyasının etkileşimi, orografik etkiler yoluyla yağışı sıklıkla artırmaktadır. Bu

iklimsel ve topografik koşullar, bölgeyi uydu yağış ürünlerinin ekstrem yağış özelliklerini temsil etme performansının değerlendirilmesi için uygun kılmaktadır.



Şekil 1. Bafra meteoroloji istasyonunun (İstasyon No. 17622) Samsun ilindeki konumu

2.2 Yağış Veri Setleri

2005–2025 gözlem dönemini kapsayan üç farklı yağış veri seti kullanılmıştır. Yer tabanlı referans ölçümler, MGM tarafından işletilen Bafra istasyonuna (İstasyon No. 17622) ait sürekli günlük yağış kayıtlarından elde edilmiştir. Uzaktan algılama yeteneklerini bu yer gözlemlerine karşı değerlendirmek amacıyla iki uydu ürünü kullanılmıştır. Bunlardan ilki, çok uydulu gözlemleri birleştirerek yaklaşık 0.1° alansal ve 30 dakikalık zamansal çözünürlükte yağış tahmini sunan GPM-IMERG (Sürüm 07) veri setidir [9]. İkinci ürün ise, kızılötesi uydu görüntülerini yer istasyonu verileriyle harmanlayarak günlük zamansal ve 0.05° alansal çözünürlükte yarı-küresel yağış tahminleri üreten CHIRPS veri setidir [10].

2.3 Veri Çıkarımı ve Yıllık Maksimum Seriler

Uydu yağış verileri, Bafra istasyonunun konumunda Google Earth Engine platformu kullanılarak çıkarılmıştır. Veri setleri arasında tutarlılığı sağlamak için yalnızca üç kaynakta da ortak olan gözlem dönemi dikkate alınmıştır. Her veri seti için, her yıl kaydedilen en yüksek günlük yağış değeri seçilerek Yıllık Maksimum Seriler (AMS) oluşturulmuş ve bu seriler frekans analizinin temelini oluşturmuştur.

2.4 Frekans Analizi

Yıllık maksimum serilere olasılık dağılımları uydurularak 2–500 yıl arasındaki tekerrür süreleri için tasarım yağış derinlikleri tahmin edilmiştir. Aday dağılımlar Akaike Bilgi Kriteri (AIC) ile değerlendirilmiş ve her veri seti için en düşük AIC değerine sahip dağılım seçilmiştir [11]. İstatistiksel analiz, MGM ve CHIRPS veri setleri için Gumbel dağılımının (Eşitlik 1), GPM-IMERG veri seti için ise Genelleştirilmiş Ekstrem Değer (GEV) dağılımının (Eşitlik 2) en iyi uyumu sağladığını göstermiştir:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right)\right] \quad (1)$$

Burada μ konum parametresini, β ise ölçek parametresini göstermektedir. GEV dağılımının birikimli dağılım fonksiyonu ise aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F(x) = \exp\left[-\left(1+\xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)^{-1/\xi}\right] \quad (2)$$

Burada μ, σ ve ξ sırasıyla konum, ölçek ve şekil parametrelerini temsil etmektedir. Uydu ürünlerinden elde edilen tasarım yağış derinliklerini referans yer gözlemleriyle karşılaştırmak için üç istatistiksel doğrulama ölçütü kullanılmıştır: bias (Eşitlik 3), karesel ortalama hatanın karekökü (RMSE, Eşitlik 4) ve korelasyon katsayısı (R, Eşitlik 5).

$$\text{Bias (yanlılık)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(P_{sat,i} - P_{obs,i}\right) \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(P_{sat,i} - P_{obs,i}\right)^2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_{sat,i} - \bar{P}_{sat}\right)\left(P_{obs,i} - \bar{P}_{obs}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(P_{sat,i} - \bar{P}_{sat}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(P_{obs,i} - \bar{P}_{obs}\right)^2}} \quad (5)$$

Bu eşitliklerde n örtüşen gözlem yıllarının sayısını, S_i uydu yağış tahminini, G_i MGM yer gözlemini ve üzeri çizgili terimler ilgili serinin ortalama değerini göstermektedir.

3. Değerlendirme

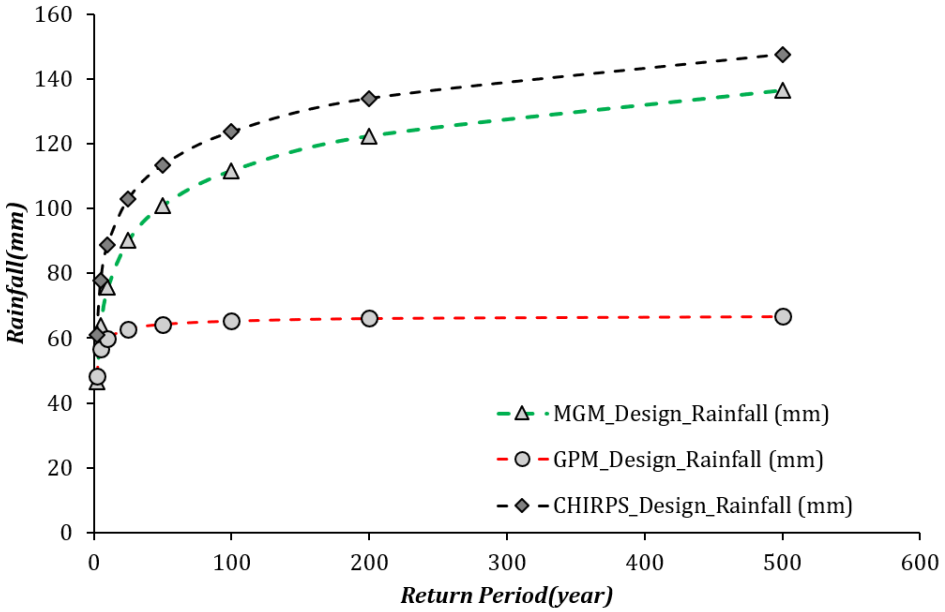
Teorik eğrilerden farklı tekerrür süreleri için elde edilen tasarım yağış derinlikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Yer gözlemleri (MGM), 2 yıllık tekerrür aralığındaki 46,6 mm değerinden 500 yıllık nadir bir olay için 136,5 mm değerine kadar tutarlı ve sürekli bir artış eğilimi göstermektedir.

Tablo 1. MGM, GPM-IMERG ve CHIRPS veri setlerinden türetilen tasarım yağış derinlikleri (mm)

Tekerrür Süresi (yıl)	MGM Tasarım Yağışı (mm)	GPM Tasarım Yağışı (mm)	CHIRPS Tasarım Yağışı (mm)
2	46,6	48,3	60,9
5	64,0	56,5	77,7
10	75,6	59,9	88,8
25	90,2	62,8	102,9
50	101,0	64,3	113,3
100	111,7	65,3	123,6
200	122,4	66,0	133,9
500	136,5	66,7	147,5

İstatistiksel karşılaştırma Tablo 2'de gösterilmektedir ve Şekil 3 üzerinde görsellenmiştir. GPM-IMERG, yer gözlemleriyle güçlü bir korelasyon (R = 0,93) göstermekle birlikte, belirgin bir negatif yanlılık (−34,51 mm) ve nispeten yüksek bir RMSE (39,68 mm) sergilemiştir. Buna karşılık CHIRPS, daha düşük bir RMSE (12,62 mm) ve ılımlı bir pozitif yanlılık (+13,45 mm) ile değerlendirilen tekerrür süreleri boyunca yağış-frekans özelliklerini daha yakın bir şekilde temsil etmiştir.

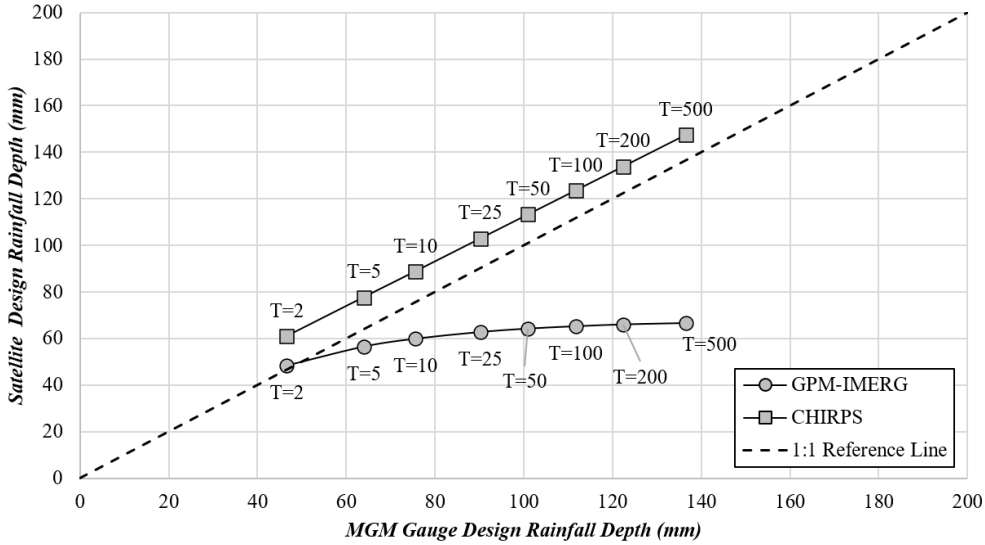
Sonuçlar, değerlendirilen veri setleri arasında ekstrem yağışın temsili bakımından önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. GPM-IMERG yer gözlemleriyle güçlü korelasyon göstermesine rağmen, yüksek tekerrür sürelerinde tutarlı biçimde daha düşük tasarım yağışı üretmiştir; bu sapma, olay nadirleştikçe artmış ve 500 yıllık tekerrür süresi için yer tabanlı tahmine göre yaklaşık 70 mm'lik bir farka ulaşmıştır. Bu durumun başlıca nedenleri; dağlık kıyı bölgelerinde yağış oluşumunun orografik süreçlerden güçlü biçimde etkilenmesi ve uydu ürünlerinin alansal ortalama değerler sunması nedeniyle noktasal yağış maksimumlarının grid hücreleri içinde yumuşatılmasıdır.



Şekil 2. MGM, GPM-IMERG ve CHIRPS veri setlerinden elde edilen tasarım yağış tahminlerinin 2–500 yıl tekerrür süreleri için karşılaştırılması

Tablo 2. GPM-IMERG ve CHIRPS veri setlerinin MGM yer gözlemlerine karşı istatistiksel performansı

Veri Seti	R	Yanlılık (mm)	RMSE (mm)
GPM-IMERG	0,93	−34,51	39,68
CHIRPS	1,00	+13,45	12,62



Şekil 3. GPM-IMERG ve CHIRPS veri setlerinin MGM verisi ile uyumu

Buna karşılık CHIRPS, düşük tekerrür sürelerinde yağışı bir miktar fazla tahmin etmekle birlikte, yüksek tekerrür sürelerindeki yağış artışını daha yakından yeniden üretmiştir. CHIRPS ile yer tabanlı frekans tahminleri arasındaki bu yakın uyum, veri setine istasyon gözlemlerinin dahil edilmesiyle ilişkilendirilebilir; bu durum uzun dönemli sistematik yanlılıkları azaltmakta ve bölgesel yağış iklimolojisinin temsilini iyileştirmektedir. Bu bulgular, iki uydu ürününün hidrolojik uygulamalar açısından farklı güçlü yönlere sahip olduğunu; GPM-IMERG'in yüksek zamansal çözünürlük gerektiren olay tabanlı analizlerde, CHIRPS'in ise nadir olaylara ilişkin uzun dönemli tasarım yağışı tahmininde daha uygun olduğunu göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, kuzey Türkiye'deki Samsun bölgesinde ekstrem yağış frekans analizi için GPM-IMERG ve CHIRPS uydu yağış ürünlerinin performansını değerlendirmiştir. Elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- İki uydu ürünü, nadir olaylara ilişkin tasarım yağışını tahmin ederken belirgin biçimde farklı davranışlar sergilemekte ve frekans analizi uygulamalarında birbirinin yerine kullanılamamaktadır.
- GPM-IMERG, gözlenen yağış değişkenliğiyle güçlü korelasyon göstermekle birlikte yüksek tekerrür sürelerinde yağış derinliklerini tutarlı biçimde düşük tahmin etmekte ve tasarımda güvenilir kullanım için bölgesel kalibrasyon gerektirmektedir.
- CHIRPS, ekstrem yağışın tekerrür süresiyle artışını daha yakın temsil ederek yer tabanlı tahminlere daha tutarlı tasarım yağışı değerleri sağlamakta ve nadir olayların uzun dönemli tasarım yağışı analizi için daha uygun görünmektedir.
- Mühendislik açısından, uydu yağış ürünleri hidrolik tasarım ve taşkın riski çalışmalarında kullanılmadan önce yerel doğrulama ve yanlılık değerlendirmesi yapılmalıdır. Gelecek çalışmalar, bu yağış-frekans farklılıklarının akış ve taşkın debisi tahminlerine yansımasını bölgesel hidrolojik modeller çerçevesinde incelemelidir.

5. Kaynaklar

[1] Kidd, C., & Levizzani, V. (2011). Status of satellite precipitation retrievals. Hydrology and Earth System Sciences, 15(4), 1109-1116.

[2] Benkirane, M. (2024). Evaluation of satellite precipitation products for hydrological applications. Remote Sensing Applications, 33, 101-115.

[3] Ekpetere, C. M., et al. (2024). Assessing extreme rainfall anomalies and convective storm events using GPM-IMERG datasets. Journal of Hydrology, 629, 130-145.

[4] Maggioni, V., Meyers, P. C., & Robinson, M. D. (2016). A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) era. Journal of Hydrometeorology, 17(4), 1101-1117.

[5] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2(1), 1-21.

[6] Yucel, I., & Onen, A. (2014). Evaluating satellite-based precipitation products over complex terrains in Turkey. Atmospheric Research, 143, 200-215.

[7] Derin, Y., Anagnostou, E., Berne, A., Borga, M., Bouilloud, L., et al. (2016). Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain. Journal of Hydrometeorology, 17(6), 1817-1836.

[8] Navarro, A., García-Ortega, E., Merino, A., Sánchez, J. L., et al. (2019). Assessment of IMERG precipitation estimates over complex alpine terrain. Remote Sensing, 11(18), 2131.

[9] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., et al. (2020). NASA Global Precipitation Measurement (GPM) IMERG. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06.

[10] Türkoğlu, N., et al. (2016). Long-term precipitation trends and satellite data integration in Türkiye. International Journal of Climatology, 36(12), 4120-4135.

[11] Papalexiou, S. M., & Koutsoyiannis, D. (2013). Battle of extreme value distributions: A global investigation on extreme daily rainfall. Water Resources Research, 49(1), 187-201.

Yeşilırmak Havzasında Akım Rejimlerinin Çoklu Hidrolojik Göstergelerle Değerlendirilmesi

Emirhan Cemek*
Devlet Su İşleri 7. Bölge Müdürlüğü, Planlama Şube Müdürlüğü, Samsun, 0000-0001-9031-5142
emirhancemek@dsi.gov.tr
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği – Su Kaynakları Laboratuvarı, Ankara, 0000-0001-9031-5142
emirhan.cemek@metu.edu.tr

İsmail Yücel
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği – Su Kaynakları Laboratuvarı, Ankara, 0000-0001-9073-9324
iyucel@metu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: hidrolojik gösterge, akım rejimi, süreklilik eğrisi, günlük debi, Yeşilırmak

1. Amaç

Günlük akım kayıtları bir akarsuyun yalnızca ne kadar su taşıdığını değil, akımın yıl içindeki zamanlamasını, günler arasındaki değişkenliğini, yüksek ve düşük akım düzeylerinin birbirine göre konumunu ve hidrografın ne sıklıkla yön değiştirdiğini de içerir. Bu özelliklerin tek bir istatistikle temsil edilmesi mümkün değildir. Hidrolojik göstergeler, akım serilerinin istatistiksel veya dinamik özelliklerini özetleyerek zaman serilerindeki rejim bilgisini karşılaştırılabilir niceliklere dönüştürür [1]. Bu çalışmada kullanılan göstergeler akım rejiminin farklı özelliklerini tanımlamaktadır. RBI günler arasındaki akım değişimlerinin büyüklüğünü, T50 ve HFI akımın yıl içindeki zamanlamasını, akım süreklilik eğrisinden elde edilen göstergeler ise yüksek ve düşük akım düzeylerini ortaya koymaktadır. Bu göstergelerin birlikte değerlendirilmesiyle istasyonlar arasındaki rejim farklılıkları birden fazla özellik üzerinden karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Yeşilırmak Havzasında yer alan 7 adet DSİ akım gözlem istasyonunun 15 ortak su yılına ait günlük ortalama akımlarını birden fazla hidrolojik gösterge kullanarak karşılaştırmak ve istasyonların akım rejimi bakımından hangi yönlerde farklılaştığını belirlemektir. İstasyonların drenaj alanları 9,83 ile 259 km² arasında değişmektedir. Bu nedenle ham debiler doğrudan karşılaştırılmamış, günlük debiler drenaj alanına göre birimi mm/gün olan akım yüksekliğine çevrilmiştir. Hesaplamalarda her su yılı ayrı bir değerlendirme dönemi olarak ele alınmıştır. Her istasyonun 15 yıllık genel durumu medyan değerlerle, yıllar arasındaki değişim ise çeyrekler arası aralıkla özetlenmiştir. Göstergeler arasındaki benzerlikler Spearman sıra korelasyonu ile incelenmiş; büyük ölçüde aynı bilgiyi veren değişkenlerin ana değerlendirmede birlikte kullanılmasından kaçınılmıştır. Son aşamada istasyonlar; akım büyüklüğü, akımın yıl içindeki zamanlaması, günler arasındaki değişim, akım yön değiştirme sıklığı ve akım süreklilik eğrilerinden elde edilen özellikler bakımından karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada DSİ 7. Bölge Müdürlüğü tarafından işletilen D14A014, D14A062, D14A064, D14A081, D14A133, D14A144 ve D14A146 istasyonlarına ait günlük ortalama debiler kullanılmıştır. İncelenen dönem 2011–2025 su yıllarını kapsamakta olup her su yılı 1 Ekim'de başlayıp 30 Eylül'de sona ermektedir. Buna göre veri dönemi takvim tarihi olarak 1 Ekim 2010–30 Eylül 2025 arasındadır. İstasyonların drenaj alanları 9,83–259,0 km² arasında değişmektedir. Akım büyüklüklerinin istasyonlar arasında karşılaştırılabilmesi için günlük debiler $q=86{,}4\times(Q/A)$ bağıntısıyla birimi mm/gün olan birim alan akım yüksekliğine dönüştürülmüştür. Ortalama akım, q10, q50 ve q90 gibi doğrudan akım büyüklüğünü ifade eden sonuçlarda bu değerler kullanılmıştır. RBI, CV, T25, T50, T75, HFI ve akım yön değiştirme sıklığı gibi göstergeler ise debi serisinin sabit bir katsayıyla ölçeklenmesinden etkilenmediğinden, kendi tanımlarına uygun olarak hesaplanmıştır.

Günlük değişim büyüklüğü Richards-Baker Akım Değişkenliği İndeksi (RBI) ile değerlendirilmiştir. Baker ve arkadaşları [2] tarafından günlük ortalama akımlar için önerilen indeks, ardışık günlerdeki mutlak debi değişimlerinin toplamının dönem toplam debisine oranıdır ve bu çalışmada Eşitlik (1) ile her su yılı için

ayrı hesaplanmıştır. Yıllık akım hacminin zaman içindeki dağılımını değerlendirmek amacıyla T25, T50 ve T75 göstergeleri hesaplanmıştır. T25, T50 ve T75 sırasıyla yıllık toplam akım hacminin %25, %50 ve %75'ine ulaşılan günü göstermektedir. T50 böylece yıllık akım hacminin yarısının hangi tarihe kadar gerçekleştiğini ifade etmektedir. HFI ise yıllık toplam akım hacminin %25'inden %75'ine ulaşılması arasında geçen süre olarak hesaplanmıştır. Düşük HFI değerleri yıllık akım hacminin orta %50'lik bölümünün daha kısa bir dönemde gerçekleştiğini, yüksek değerler ise daha uzun bir döneme yayıldığını göstermektedir. Ayrıca günlük akımın varyasyon katsayısı, pozitif ve negatif günlük değişimlerin ortalama büyüklükleri ile akım yönünün artıştan azalışa veya azalıştan artışa geçme sıklığı hesaplanmıştır.

$$\mathrm{RBI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^{n} q_i} \quad (1)$$

Akımların yıl içindeki büyüklük dağılımı akım süreklilik eğrileri (ASE) kullanılarak incelenmiştir. ASE, farklı akım değerlerinin yılın ne kadarında aşıldığını gösterir [3]. Eğriden yüksek, orta ve düşük akım koşullarını temsil eden q10, q50 ve q90 değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, istasyonların akım düzeylerinin karşılaştırılmasının yanı sıra yüksek ve düşük akımların medyan akıma göre göreli durumunun değerlendirilmesinde de kullanılmıştır. ASE akımların büyüklük dağılımını gösterirken bu akımların yılın hangi döneminde gerçekleştiği hakkında bilgi vermez. Bu nedenle akım zamanlaması T50 ve HFI göstergeleriyle ayrıca değerlendirilmiştir.

Her gösterge, yedi istasyonun 15 su yılının her biri için ayrı ayrı hesaplanmış ve toplam 105 yıllık değer elde edilmiştir. İstasyonların genel durumu 15 yıllık medyanla, yıllar arasındaki değişim ise çeyrekler arası aralıkla özetlenmiştir. İstasyonlar arasındaki farkları sınamak için Friedman testi kullanılmıştır. Bu testte aynı su yılına ait yedi istasyon değeri birlikte değerlendirilmiştir. Friedman testinde $p<0,05$ bulunması durumunda, farkın hangi istasyon çiftlerinden kaynaklandığını görmek için eşleştirilmiş Wilcoxon testi uygulanmış; çok sayıda ikili karşılaştırmanın hata olasılığını artırmaması için p değerleri Holm yöntemiyle düzeltilmiştir. Göstergelerin benzer bilgi verip vermediği ayrıca Spearman sıra korelasyonu ile incelenmiştir. Korelasyonlar hem 105 yıllık değer üzerinden hem de her istasyonun 15 yıllık medyanları üzerinden hesaplanmıştır. İlk gruptaki 105 değer, aynı yedi istasyonun farklı yıllarına ait olduğundan bağımsız gözlemler olarak kabul edilmemiş ve burada yalnızca göstergeler arasındaki benzerliğin düzeyi dikkate alınmıştır. Bir gösterge çiftinin çok benzer bilgi verdiğinin kabul edilmesi için her iki karşılaştırmada da $|\rho|\geq 0,85$ koşulu aranmıştır. Bu değerlendirme sonunda sekiz ana hidrolojik gösterge seçilmiş ve 15 yıllık medyanları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Seçilmiş hidrolojik göstergelerin 15 yıllık medyan değerleri.

AGİ	Ort. q (mm/gün)	RBI	T50 (gün)	HFI (gün)	Yön değişimi (/100)	q10/q50	q90/q50	ASE eğimi
D14A014	0.508	0.243	178.0	85.8	20.82	4.701	0.226	3.910
D14A062	0.132	0.156	200.0	79.0	14.01	6.200	0.171	3.796
D14A064	0.246	0.138	176.5	89.0	21.98	3.330	0.140	3.005
D14A081	0.625	0.248	190.5	81.8	14.01	3.920	0.450	3.181
D14A133	0.386	0.209	183.0	74.8	23.35	7.114	0.074	4.597
D14A144	0.491	0.113	182.5	67.0	11.26	7.519	0.045	6.912
D14A146	0.743	0.266	177.0	64.0	15.66	7.238	0.078	5.473

3. Değerlendirme

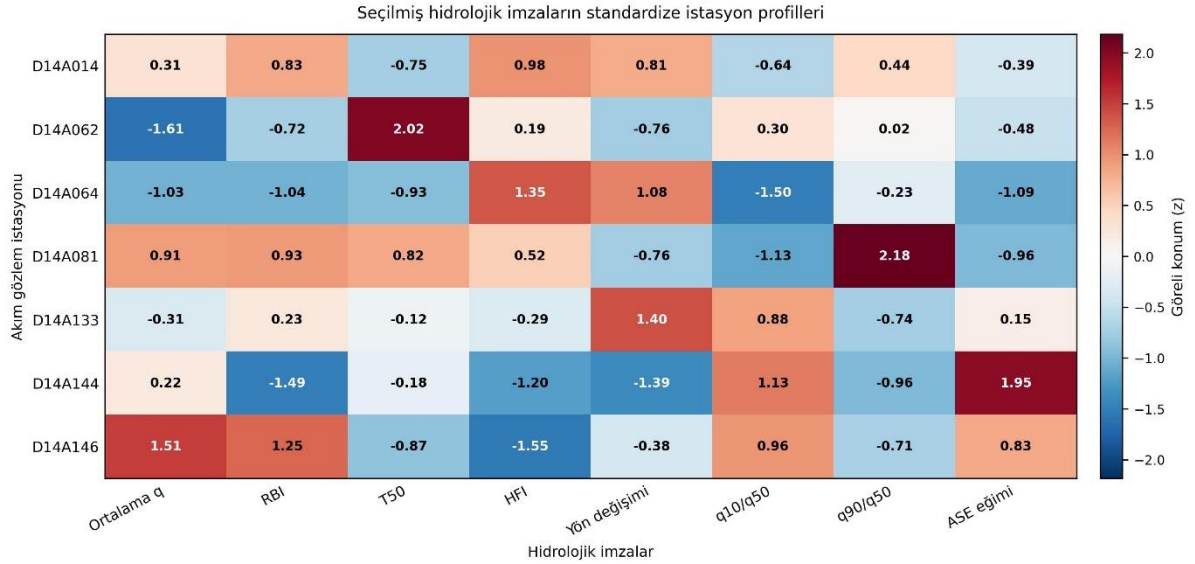
Analizler, aynı havza içinde yer alan istasyonların yalnızca akım büyüklüğü bakımından değil, rejimin farklı bileşenleri bakımından da ayrıldığını göstermiştir. Ortalama günlük akım yüksekliğinin 15 yıllık medyanı istasyonlar arasında 0,132 mm/gün (D14A062) ile 0,743 mm/gün (D14A146) arasında değişmiştir. RBI için en yüksek medyan değer D14A146'da 0,266, en düşük değer ise D14A144'te 0,113 olarak hesaplanmıştır. On beş ortak su yılı birlikte değerlendirildiğinde RBI değerlerinin istasyonlar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterdiği belirlenmiştir (Friedman $\chi^2=36,97$; $p<0,001$; Kendall $W=0,411$). Yıllık toplam akım hacminin yarısına ulaşma zamanı olan T50'nin medyanı istasyonlara göre yaklaşık 177 ile 200. günler arasında değişirken, yıllık hacmin %25'inden %75'ine ulaşılması arasında geçen süreyi ifade eden HFI'nin medyanı 64 ile 89 gün arasında değişmiştir.

Friedman testi sonucunda hem T50 hem de HFI değerlerinin istasyonlar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterdiği belirlenmiştir (sırasıyla p=0,0138 ve p=0,0124). Akım yönündeki değişimleri değerlendirmek amacıyla günler arasındaki akım değişiminin artış veya azalış yönünde olduğu belirlenmiş; artıştan azalışa ya da azalıştan artışa dönüşler yön değişimi olarak sayılmıştır. Akımın değişmediği günler yönün belirlenmesinde dikkate alınmamıştır. Farklı uzunluktaki su yıllarının karşılaştırılabilmesi için yön değiştirme sayısı, yıl içindeki toplam günler arası karşılaştırma sayısına oranlanarak yüzde olarak ifade edilmiştir. Buna göre yön değiştirme sıklığının 15 yıllık medyanı D14A133'te %23,35, D14A144'te ise %11,26 olarak hesaplanmıştır. Yön değiştirme sıklığı bakımından istasyonlar arasındaki farklılık da istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Friedman χ^2=62,89; p<0,001; Kendall W=0,699).

Akım süreklilik eğrilerinden elde edilen sonuçlar, istasyonların yüksek ve düşük akım özellikleri bakımından da birbirinden ayrıldığını göstermiştir. q10/q50 oranının 15 yıllık medyanı 3,33 ile 7,52, q90/q50 oranının medyanı ise 0,045 ile 0,450 arasında değişmiştir. ASE'nin orta bölüm eğimi de istasyonlara göre 3,00 ile 6,91 arasında değişmiş ve bu üç gösterge için istasyonlar arasındaki farklılıklar Holm düzeltmesi sonrasında da istatistiksel olarak anlamlı kalmıştır. D14A144'te q10/q50 oranının en yüksek, q90/q50 oranının en düşük ve ASE orta bölüm eğiminin en yüksek olması, yüksek akımların medyan akımdan belirgin biçimde ayrıldığını ve düşük akımların medyan akıma göre oldukça düşük kaldığını göstermektedir. Aynı istasyonda RBI ve akım yön değiştirme sıklığı ise en düşük değerleri almıştır. Başka bir ifadeyle, D14A144'te yıl içinde yüksek ve düşük akımlar arasındaki fark belirginken, ardışık günler arasındaki akım değişimleri görece daha küçük ve artış-azalış yönündeki değişimler daha seyrektir. Bu sonuç, RBI, akım yön değiştirme sıklığı ve ASE'den elde edilen göstergelerin akım rejiminin farklı özelliklerini tanımladığını göstermektedir. Bu nedenle istasyonların yalnızca tek bir değişkenlik göstergesine göre değerlendirilmesi yeterli değildir.

İstasyonlar, akım rejiminin farklı özellikleri bakımından aynı davranışı göstermemiştir. D14A146'da ortalama akım yüksekliği ve RBI en yüksek değerlere ulaşırken HFI en düşük değeri almıştır. Bu istasyonda yıllık akım hacminin orta %50'si daha kısa bir sürede gerçekleşmiş, günler arasındaki akım değişimleri de diğer istasyonlara göre daha büyük olmuştur. D14A064'te ise HFI 89 gün ile en yüksek değerdedir. Aynı istasyonda q10/q50 oranı 3,33, ASE orta bölüm eğimi ise 3,00 ile incelenen istasyonlar arasındaki en düşük değerleri almıştır. Bu değerler, yüksek akımların medyan akımdan fazla uzaklaşmadığını ve ASE'nin orta bölümünde akım değerlerinin daha sınırlı bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Buna rağmen akımın artış ve azalış yönü D14A064'te sık değişmiştir. D14A081'de ise q90/q50 oranı 0,450 olarak hesaplanmış ve bu değer yedi istasyon içindeki en yüksek oran olmuştur. Başka bir ifadeyle, D14A081'in düşük akım düzeyi kendi medyan akımına göre diğer istasyonlardan daha yüksek kalmıştır. Bu sonuçlar, akım büyüklüğü, zamanlama ve akım yönündeki değişimlerin istasyonları farklı yönlerden ayırdığını göstermektedir.

Göstergeler arasındaki benzerlik Spearman sıra korelasyonu ile kontrol edilmiştir. Ortalama akım yüksekliği ile q10 arasında çok yüksek korelasyon bulunmuştur (105 yıllık kayıtta ρ=0,970; istasyonların 15 yıllık medyanlarında ρ=0,964). Bu nedenle q10, ortalama akım yüksekliğiyle büyük ölçüde aynı bilgiyi verdiği için ana karşılaştırmaya ayrıca alınmamıştır. Göreli yükselme ve düşme hızları arasında da yüksek ilişki belirlenmiştir (sırasıyla ρ=0,912 ve 0,857). Son karşılaştırmada ortalama akım yüksekliği, RBI, T50, HFI, akım yön değiştirme sıklığı, q10/q50, q90/q50 ve ASE orta bölüm eğimi kullanılmıştır. CV, yükselme ve düşme hızları, yükselme/azalma oranı ile q50 ve q90 hesaplanmış olmakla birlikte, ana gösterge grubunu gereksiz yere genişletmemek için karşılaştırmanın merkezine alınmamış; ilgili bulguların yorumlanmasında gerektiğinde kullanılmıştır. Farklı birimlerdeki bu sekiz göstergenin aynı grafik üzerinde karşılaştırılabilmesi için her istasyonun 15 yıllık medyan değeri z-puanına dönüştürülmüş ve sonuçlar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Seçilen hidrolojik göstergelerin istasyonlara göre karşılaştırılması. Pozitif değerler ilgili göstergenin yedi istasyon ortalamasının üzerinde, negatif değerler ise altında olduğunu göstermektedir. Renkler yalnızca göreli farklılığı ifade etmektedir.

Hesaplamalarda her gün için tek bir ortalama debi değeri kullanılmıştır; saatlik ya da daha kısa zaman aralıklı kayıtlar veri setinde yer almamaktadır. Bu nedenle RBI, akım yön değiştirme sıklığı ve benzeri göstergeler günlük seride gözlenen değişimleri ifade etmektedir. Akım süreklilik eğrisinden elde edilen q90/q50 oranı ise bir süreyi değil, düşük akım düzeyinin medyan akıma oranını göstermektedir. İstasyonlar arasındaki farklılıkların iklim, jeoloji, arazi kullanımı veya akım düzenleme yapılarıyla ilişkisi, bu özelliklerin ayrıca analize dâhil edilmesiyle daha ayrıntılı incelenebilir. Bu çalışmada esas karşılaştırma, aynı 15 yıllık döneme ait günlük akım kayıtlarından elde edilen göstergelerin istasyonlar arasında nasıl değiştiği üzerine kurulmuştur.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Yeşilırmak Havzasındaki yedi DSİ istasyonunun 15 ortak su yılı boyunca akım rejimi bakımından birbirinden farklı özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Tüm istasyonlarda aynı gözlem döneminin kullanılması, karşılaştırmaların kayıt uzunluğundan etkilenmesini önlemiş; akım büyüklüklerinin birim havza alanı üzerinden ifade edilmesi ise drenaj alanları farklı olan istasyonların daha sağlıklı karşılaştırılmasını sağlamıştır. Özellikle akım yön değiştirme sıklığı, RBI ve akım süreklilik eğrisinden elde edilen oranlar istasyonlar arasındaki farklılıkları açık biçimde ortaya koyarken, T50 ve HFI akımın yıl içindeki zamanlaması ve yıllık hacmin ne kadar geniş bir döneme yayıldığı hakkında tamamlayıcı bilgi sağlamıştır.

Çalışmanın önemli sonuçlarından biri, kullanılan göstergelerin aynı hidrolojik özelliği temsil etmediğinin görülmesidir. D14A144'te düşük RBI ve düşük akım yön değiştirme sıklığına karşılık yüksek ASE orta bölüm eğimi ve düşük q90/q50 oranı belirlenirken, D14A146'da yüksek birim alan akımı, yüksek RBI ve kısa HFI birlikte görülmüştür. Bu sonuçlar, günler arasındaki akım değişimlerinin büyüklüğü, yıllık akım hacminin zaman içindeki dağılımı ve yüksek-düşük akım düzeylerinin birbirinden farklı rejim özelliklerini yansıttığını göstermektedir. Göstergeler arasındaki korelasyonların incelenmesi sonucunda benzer bilgi taşıyan değişkenler belirlenmiş ve 15 aday gösterge arasından hidrolojik anlamı birbirinden farklı sekiz ana gösterge değerlendirmede tutulmuştur.

Uygulanan yaklaşım, uzun süreli günlük akım kayıtlarının yalnızca ortalama, minimum veya maksimum değerlerle özetlenmesi yerine, akım rejiminin farklı özelliklerinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar ileride havza eğimi, yükselti, jeoloji, arazi kullanımı ve akım düzenleme yapıları gibi havza özellikleriyle birlikte ele alındığında, istasyonlar arasında belirlenen rejim farklılıklarının fiziksel nedenleri daha ayrıntılı biçimde incelenebilir. Bu yönüyle çalışma, DSİ gözlem ağındaki istasyonların ortak bir dönem üzerinden karşılaştırılması ve farklı akım

rejimi özelliklerinin sistematik biçimde belirlenmesi için uygulanabilir bir değerlendirme yaklaşımı ortaya koymaktadır.

5. Kaynaklar

1] McMillan, H. K. (2021). A review of hydrologic signatures and their applications. WIREs Water, 8(1), e1499. doi: 10.1002/wat2.1499.

[2] Baker, D. B., Richards, R. P., Loftus, T. T., Kramer, J. W. (2004). A new flashiness index: Characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. Journal of the American Water Resources Association, 40(2), 503-522. doi: 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x.

[3] Vogel, R. M., Fennessey, N. M. (1994). Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals. Journal of Water Resources Planning and Management, 120(4), 485-504. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485).

Sulama Suyu Kalitesi İndeksleri

Mehmet KÖKSAL*
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye, ORCID: 0009-0003-0063-2024
5423581@ogrenci.bilecik.edu.tr

Çayan ALKAN
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye, ORCID: 0000-0002-4574-448X
cayan.alkan@bilecik.edu.tr

Anahtar Kelimeler: su kalitesi 1, sulama suyu 2, sar 3, kuraklık 4, taşkın 5.

1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, su kaynaklarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini birlikte değerlendirerek sulama suyu kalitesini anlaşılır göstergelerle ortaya koyan indeksleri sistematik biçimde incelemektir. Geleneksel yaklaşımlarda parametrelerin tek tek değerlendirilmesi, çok sayıda verinin bütüncül olarak yorumlanmasını güçleştirirken, indeks yöntemleri karmaşık su kalitesi verilerini bütünleştirerek farklı su kaynaklarının, dönemlerin ve kullanım amaçlarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, Horton tarafından geliştirilen ilk su kalite indeksinden başlayarak [1], NSFWQI, CWQI, O-WQI ve BCWQI gibi su kalite indeksleri ile tarımsal sulama suyu kalitesinin belirlenmesinde kullanılan SAR, RSC, Na% ve PI indeksleri; temel aldıkları parametreler, hesaplama yaklaşımları, sınıflandırma ölçütleri, kullanım amaçları ve karar verme süreçlerine katkıları bakımından karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır. Çalışmada yalnızca indekslerin tanıtılması değil, aynı zamanda farklı çevresel koşullarda ve su kullanım amaçlarında hangi indeksin daha işlevsel olduğunun ortaya konulması ve uygun indeks seçimine yönelik bütüncül bir değerlendirme çerçevesinin sunulması da hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra, su kalite indekslerinin CBS tabanlı mekânsal analizlerle bütünleştirilmesi yoluyla su kalitesindeki zamansal ve mekânsal değişimlerin değerlendirilmesi, ayrıca havza ölçeğinde sürdürülebilir su yönetimi kararlarına katkı sağlayabilecek yaklaşımların ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, mevcut su kalite indekslerinin bilimsel araştırmalardaki kullanım alanları ve havza ölçekli su yönetimi kararlarında uygulanabilirliği değerlendirilerek, geleneksel indeks modellerinin sınırlılıklarının ortaya konulması ve modern karar destek sistemleri kapsamında sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, sistematik literatür taraması yöntemiyle hazırlanmıştır. Web of Science, Scopus, Google Scholar ve ULAKBİM Ulusal Veri Tabanı gibi akademik veri tabanlarında “su kalitesi indeksi”, “water quality index” ve “sulama suyu kalitesi” anahtar kelimeleri kullanılarak tarama yapılmış; konuyla doğrudan ilgili hakemli makaleler ve tezler değerlendirmeye alınmıştır.

2.1 Sulama Suyu Kalitesi İndeksleri

Su kalitesi indeksleri arasında; fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin ağırlıklandırılarak tek bir değere indirgendiği Horton Su Kalitesi İndeksi, dokuz temel parametreyi (sıcaklık, pH, bulanıklık, fekal koliform, çözünmüş oksijen, $BOİ_5$, toplam fosfat, nitrat, toplam katı madde) kapsayan Ulusal Sanitasyon Vakfı Su Kalitesi İndeksi (NSFWQI), kapsam-sıklık-genlik (F1, F2, F3) faktörlerini birlikte değerlendiren Kanada Su Kalitesi İndeksi (CWQI), akarsuların zamansal değişimini izlemek için geliştirilen ve DO, BOİ, sıcaklık, toplam fosfor, toplam azot, pH, TDS ile bulanıklık parametrelerini 0–100 arasında normalize eden Oregon Su Kalitesi İndeksi (OWQI) ve British Columbia Su Kalitesi İndeksi (BCWQI) yer almaktadır [2], [3]. Bu indekslerin her biri, parametrelerin normalize edilmesi ve ağırlıklandırılması esasına dayanmakta olup elde edilen alt indeks değerleri (Qi) belirli bir formülle birleştirilerek genel indeks değerine (WQI) ulaşılmaktadır [4-5].

2.2 Tarımsal Sulama Suyu Kalitesi İndeksleri

Tarımsal sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesinde ise, sulama suyundaki sodyumun kalsiyum ve magnezyuma oranını gösteren Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) ve toprak sodikleşme tehlikesini

belirleyen Artık Sodyum Karbonat (RSC) ile sodyumun toplam katyonlara oranını ifade eden sodyum yüzdesi (Na%) ve uzun süreli sulamanın toprak geçirgenliği üzerindeki etkilerini ortaya koyan Permeabilite İndeksi (PI) kullanılmaktadır [6]. Bu indeksler birlikte değerlendirilerek sulama suyu kalitesinin toprak yapısı üzerindeki etkisinin ortaya konulduğu görülmektedir.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

$$RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (2)$$

$$Na\% = \frac{Na^+ \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \quad (3)$$

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100 \quad (4)$$

3. Değerlendirme

Türkiye genelindeki nehir ve göl ekosistemlerinde yürütülen çalışmalar incelendiğinde, su kalitesinin ağırlıklı olarak "orta" düzeyde seyrettiği ve havzadan havzaya ciddi farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Karasu Nehri'nin su kalitesinin incelendiği çalışmada, mevsimsel geçişler, evsel-endüstriyel deşarjlar ve tarımsal sızıntılar nedeniyle toplam azot, fosfor, ağır metaller ve fekal koliform parametrelerinde sınır aşımları saptanmış; su kalitesi Sınıf III-IV düzeyine gerilemiştir. Kaynak bölgesinin sulak alan yapısından kaynaklanan yüksek doğal organik madde içeriğinin içme suyu arıtımında dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) riski oluşturduğu; her iki mevsimde de gözlenen amonyum ve nitrit varlığının ise havzada kronik bir azotlu kirlilik ve ötrofikasyon baskısına işaret ettiği belirlenmiştir [7]. Aksu Çayı'nda yapılan bir başka çalışmada ise çözünmüş oksijen yetersizliği ile E. coli, toplam koliform ve fenol konsantrasyonlarının içme suyu temini açısından kritik riskler oluşturduğu tespit edilmiştir [8]. Benzer şekilde, Ordu ili yüzey sularında yapılan çalışmada suların Ca-Mg-HCO_3 tipinde olduğu belirlenmiş [9]; Kılavuzlu Baraj Gölü'nde Kanada Su Kalitesi İndeksi (CWQI) ile yapılan analizlerde de bu durum doğrulanmıştır [10]. Doğal kaynak sularında sertlik, iletkenlik ve askıda katı madde giderimine yönelik araştırmalar da bu temel parametrelerin su güvenliği üzerindeki belirleyiciliğini ortaya koymaktadır [11]. Tarımsal sulama dinamikleri ve kirlilik baskıları değerlendirildiğinde, yüzey sularının genel olarak sulamaya uygunluk gösterdiği, ancak özellikle yaz aylarında artan buharlaşma ve yoğun sulama drenajına bağlı olarak EC ve SAR değerlerinde mevsimsel yükselişler yaşandığı gözlenmektedir [12]. Murat Nehri'nde uzun dönem verilerinin trend analizleri su kalitesinin hidrolojik süreçlere bağlı olarak zamansal dalgalanmalar sergilediğini göstermektedir [13]; Çoruh Nehri havzasında ise sediment fazında tespit edilen krom, nikel, mangan, bakır, çinko, kadmiyum ve kurşun birikimi, kirliliğin madencilik faaliyetleri gibi bölgesel antropojenik baskılarla doğrudan ilişkili olduğunu kanıtlamaktadır [14]. Buna karşılık, Bilecik-Osmaneli bölgesinde [15] analiz edilen fizikokimyasal parametrelerin yürürlükteki yönetmelik sınırları dahilinde kalması, su kalitesinin arazi kullanımı, jeolojik yapı ve yerel koruma dinamiklerine göre şekillendiğini, dolayısıyla tek tip bir su kalitesi modelinin uygulanamayacağını göstermektedir. Geleneksel izleme yaklaşımlarının ötesinde, biyolojik ve ekolojik göstergelerin ele alındığı çalışmalar su ekosistemlerinin uzun vadeli durumuna dair kritik veriler sunmaktadır. Nitekim Eskişehir bölgesindeki akarsu ve göllerde diyatome topluluklarının hiperötrofik koşullara işaret etmesi [16], Kocaçay Deltası'nda zoobentoz komünite yapısına dayalı biyolojik kalitenin kimyasal kaliteye kıyasla daha düşük çıkması [17] ve sulama göletlerindeki ekolojik değerlendirmeler [18], yalnızca anlık fizikokimyasal parametrelere odaklanan yöntemlerin kronik kirlilik yükü ve habitat bozulması gibi kümülatif baskıları tam olarak yansıtamadığını doğrulamaktadır. Bu durum, kimyasal analizlerin biyolojik indikatörlerle entegre edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada incelenen su kalite indeksleri, sulama sularının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini tartışarak karar vericilere hızlı ve anlaşılır bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Genel amaçlı indeksler (NSFWQI, CWQI, O-WQI, BCWQI) su kaynaklarının içme ve ekolojik açıdan durumunu ortaya koyarken,

tarıma özgü indeksler (SAR, RSC, Na%, PI) toprak-su etkileşimini ve sodikleşme riskini belirlemede kritik rol oynamaktadır. Nitekim Değerlendirme bölümünde de vurgulandığı üzere, yalnızca anlık fizikokimyasal ölçümlere dayanan bu indeksler kronik kirlilik yükünü ve habitat bozulmasını tam olarak yansıtamamakta; diyatome ve zoobentoz topluluklarına dayalı biyolojik indikatörlerin [16-18] fizikokimyasal indekslerle bütünleştirilmesi, su ekosistemlerinin gerçek durumunun çok daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasını sağlamaktadır. Ancak indeks hesaplamalarında kullanılan parametre seçimi ve ağırlıklandırma yönteminin öznel olması, aynı su kaynağı için farklı indekslerin farklı sonuçlar üretmesine yol açabilmekte; bu durum standart bir metodolojik çerçevenin eksikliğine işaret etmektedir. Öte yandan, Karasu ve Çoruh nehirlerinde belirlenen ağır metal birikimi ile evsel-endüstriyel deşarj ve mikrobiyolojik kirlilik kaynaklı riskler [7-8, 14] göz önüne alındığında, su kalite indekslerinin yalnızca doğal/hidrolojik değişkenliği değil, noktasal kirlilik kaynaklarını da düzenli biçimde izlemesi gerektiği açıktır. Değerlendirme sürecinde göz ardı edilmemesi gereken bir diğer önemli boyut, iklim değişikliğinin su kalitesi üzerindeki dolaylı etkileridir. Kuraklık dönemlerinde azalan akış debisi, kirletici konsantrasyonlarının seyrelme kapasitesini düşürerek EC, SAR ve tuzluluk gibi parametrelerin kritik eşiklerin üzerine çıkmasına neden olabilmekte; bu da sulama suyu kalitesini olumsuz etkilemektedir. Buna karşılık, taşkın dönemlerinde artan yüzeysel akış, tarım alanlarından ve yerleşim bölgelerinden kaynaklanan sediment, besin maddesi ve kirletici yükünün su kaynaklarına taşınmasını hızlandırarak kısa süreli ancak şiddetli kalite bozulmalarına yol açabilmektedir. Dolayısıyla su kalite indekslerinin yalnızca ortalama veya mevsimsel verilerle değil, kuraklık ve taşkın gibi ekstrem hidrolojik olayları da kapsayacak şekilde dinamik olarak güncellenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda iklim değişikliği senaryolarının su kalite indekslerine entegre edilmesi, biyolojik ve ekolojik göstergelerin fizikokimyasal parametrelerle düzenli olarak bütünleştirilmesi, ağır metal ve mikrobiyolojik kirlilik kaynaklarının sistematik biçimde izlenmesi, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve havza ölçekli izleme ağlarının hem kuraklık-taşkın döngülerini hem de noktasal/yayılı kirlilik baskılarını dikkate alacak şekilde yapılandırılması önerilmektedir. Böylece su kalite indeksleri, yalnızca mevcut durumu betimleyen değil, aynı zamanda iklimsel değişkenliğe karşı dirençli su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayan etkin bir karar destek aracına da dönüştürülebilecektir.

5. Kaynaklar

[1] Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. Journal of the Water Pollution Control Federation, 37(3), 300–306.

[2] Sutadian, A. D., Muttil, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—A review. Environmental Monitoring and Assessment, 188, 58.

[3] Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for monitoring surface water quality. Ecological Indicators, 122, 107218.

[4] Bora, M., & Goswami, D. C. (2017). Water quality assessment in terms of water quality index (WQI): A case study of the Kolong River, Assam, India. Applied Water Science, 7(6), 3125–3135.

[5] Tripathi, M., Singal, S. K., & Garg, A. (2019). Water quality assessment of a river using water quality indices and multivariate analysis. Environmental Monitoring and Assessment, 191, 567.

[6] Bilgin, A. (2018). Su kalitesi indeksi ve uygulamaları. Journal of Current Researches on Engineering, Science and Technology (JoCREST), 4(2), 161–170.

[7] Alver, A., & Baştürk, E. (2019). Karasu Nehri su kalitesinin farklı su kalitesi indeksleri açısından değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13(1), 488–497.

[8] Dede, Ö. T., & Sezer, M. (2017). Aksu Çayı su kalitesinin belirlenmesinde Kanada Su Kalitesi İndeksi (CWQI) modelinin uygulanması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(3).

[9] Ersoy, A. F., & Tonde, B. S. (2015). Ordu ili yüzey suyu kaynaklarının kalitesinin farklı su kalite indeksleri ile değerlendirilmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 15(3), 854–865.

[10] Küçükönder, M., Kalkan, E., & Cırık, K. (2022). Kılavuzlu Baraj Gölü (Kahramanmaraş) su kalitesi ve Kanada su kalite indeks sınıfı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1), 118–142.

[11] Avcı, B. (2011). Doğal kaynak sularında sertlik, iletkenlik ve askıda katı madde gideriminin araştırılması (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[12] Alkan, Ç., Dikmen, R., & Sezgin, D. (2015). Investigation of agricultural water quality of Bursa-Nilüfer Hasanağa Dam Pond and Kütahya-Tavşanlı Adranos Stream. Afet ve Risk Dergisi, 8(1), 318–339.

[13] Doğan Demir, A., Şahin, Ü., & Demir, Y. (2016). Murat Nehri su kalite parametrelerinin trend analizi ve tarımsal açıdan kullanılabilirliği. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 9(1), 16–21.

[14] Akkan, T., & Mutlu, T. (2011). Assessment of heavy metal pollution of the Çoruh River (Turkey). Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 1(4), 355–367.

[15] Bağdatlı, M. C., Kalipci, E., & İpek, G. G. (2017). Bilecik-Osmaneli ilçesi içme ve kullanma sularının kalite parametreleri açısından CBS ile değerlendirilmesi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 149–161.

[16] Ogan, A. C. (2013). Eskişehir ilinde bulunan akarsu ve göllerde su kalitesinin diyatome indeksleri ile değerlendirilmesi (Doktora tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

[17] Akay, E. (2013). Kocaçay Deltası'nın zoobentoz komünite yapısı ve bazı çevresel değişkenler ile ilişkisi (Doktora tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[18] Uysal, E. (2015). Eskişehir'deki sulama göletlerinin su kalite indekslerinin belirlenmesi ve ekolojik açıdan değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Bölgesel Ölçüm Alanlarında Seyrek Debi Verisinin Sıkıştırılmış Algılama ile Yeniden Yapılandırılması ve Etkileri

Mustafa Selmani ÖZKAYA*
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Orcid no: 0009-0007-4806-4336
ozkayam19@itu.edu.tr

Şevket ÇOKGÖR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Orcid no
cokgor@itu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: sıkıştırılmış algılama, bölgesel ölçüm alanı, seyrek veri, debi, enerji verimliliği.

1. Amaç

Günümüz su yönetim stratejilerinde, suyun kaynaktan temin edilmesinden ziyade mevcut su potansiyelinin optimize edilerek yönetilmesi öncelikli bir konuma gelmiştir [1-3]. Etkin bir su yönetiminin ilk ve en kritik adımı ise sürdürülebilir ölçüm altyapısının kurulmasıdır. Su idarelerinin operasyonel ve stratejik kararları hatasız alabilmesi, şebeke genelindeki anlık ölçüm verilerinin doğruluğuna ve sürekliliğine bağlıdır. Ölçüm süreçlerinin yaygınlaşması, verilerin merkezi olarak depolandığı, analiz edildiği ve uzaktan kontrol imkânı sunan SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemlerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu durum sahada ölçüm yapan aletlere sürekli enerji sağlamak zorunluluğunu doğurmaktadır.

SCADA sistemlerinin saha ayağını oluşturan debimetre ve basınçölçer gibi elektronik ölçüm cihazları, kesintisiz çalışabilmek için sürekli bir enerji kaynağına gereksinim duymaktadır. Sahada konumlandırılmış bu cihazlara şebeke elektriği veya güneş paneli gibi harici kaynaklarla sürekli enerji sağlanması, lojistik açıdan zorlayıcı ve yüksek maliyetlidir. Bu doğrultuda batarya kullanımı, saha uygulamaları için pratik ve bağımsız bir çözüm sunmakla birlikte, bataryaların sınırlı bir işletme ömrü bulunmaktadır. Cihazların batarya ömrünü uzatabilmek ve operasyonel sürdürülebilirliği sağlamak adına, verileri yüksek frekansta kesintisiz toplamak yerine, sinyalin matematiksel özelliklerinden faydalanarak daha düşük seyrek (eksik/alt örneklenmiş) örnekleme yapmak bir çözüm yolu olarak öne çıkmaktadır [5].

Saha çalışmalarında verilerin sürekli yerine kesintili veya seyrek olarak elde edilmesi sıklıkla karşılaşılan bir problemdir. Kesintisiz veri akışı için gerekli tüm teknik altyapı tesis edilmiş olsa dahi; yazılımsal kararsızlıklar, elektriksel dalgalanmalar veya elektronik donanım arızaları veri sürekliliğini sıklıkla kesintiye uğratmaktadır. Sinyal işleme literatüründeki temel çalışmalardan biri, belirli koşulları sağlayan sinyallerin çok az sayıda rastgele örnekle dahi yüksek doğrulukla yeniden inşa edilebileceğini ortaya koymuştur [6]. Bu yaklaşım, ölçüm sıklığındaki seyreklik veya veri setindeki sistematik eksikliklerin, orijinal sinyalin karakteristiğini elde etmede mutlak bir engel teşkil etmediğini göstermiştir

Bahsi geçen çalışmada [6] teorik altyapısı sunulan Sıkıştırılmış Algılama (Compressive Sensing - CS) yönteminin hidrolik mühendisliği ve su şebekeleri yönetimindeki uygulama alanı giderek genişlemektedir. Boru hatlarındaki sızıntıların tespiti amacıyla yerleştirilen algılayıcılardan donanımsal kısıtlar nedeniyle yüksek çözünürlüklü veri alınamadığı durumlarda, seyrek verilerin yeniden yapılandırılması yoluyla yüksek çözünürlüklü zaman serileri elde edilebilmektedir [7]. Basınç zaman serilerinin CS yöntemiyle işlenmesi sayesinde, sinyalin barındırdığı anlamlı bilgi içeriği kayba uğramaksızın, iletişim için gerekli bant genişliği ve sunucu depolama kaynakları önemli ölçüde optimize edilebilmektedir [8]. Su kalitesini gösteren sıcaklık, çözülmüş oksijen, iletkenlik, konsantrasyon verilerinin seyrek olarak temsil edilebilir ve CS ile hata oranı oldukça düşük seviyede kalabilir [9]. Su kaynakları ve hidrolik mühendisliğinin farklı alt disiplinlerinde CS yöntemiyle gerçekleştirilen diğer uygulamalar literatürde mevcuttur [10], [11].

Ölçüm noktalarının ve cihaz sayısının artması; kurumların sürekli denetim yükünü artırmakta, kesintisiz veri akışının depolanması için büyük sunucu kapasitelerine ve yüksek veri iletim enerjisine ihtiyaç doğurmaktadır [12]. Bu çalışmanın temel amacı, Bölgesel Ölçüm Alanı (BÖA) debi zaman serilerinin spektral uzaydaki seyreklik özelliğini kullanarak, alt-örneklenmiş veriler üzerinden sinyalin yüksek

doğrulukla yeniden inşa edilebileceğini göstermektir. Geliştirilen yaklaşımın, saha cihazlarının batarya ömürlerini uzatma potansiyeli, depolanacak veri boyutunu küçültme kabiliyeti ve gerçek değerlerden sapma miktarını kabul edilebilir sınırlar içinde tuttuğu doğrulanmıştır. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, BÖA debi verilerinin sıkıştırılmış algılama tabanlı seyrek örnekleme modeliyle dinamik analizi daha önce gerçekleştirilmemiştir. Bu yönüyle çalışma, batarya beslemeli debimetrelerin sahada uzun süreli kullanımına ve veri merkezlerinde depolama optimizasyonuna katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Konya ilinin su ve kanalizasyon altyapısından sorumlu olan KOSKİ Genel Müdürlüğü, 2025 yılı kurumsal verilerinde fiziki su kayıpları oranını %19,8 olarak beyan etmiştir (KOSKİ, 2025). Kent içi su dağıtım şebekelerini kontrol altında tutabilmek ve su kayıplarıyla etkin mücadele edebilmek amacıyla şebeke genelinde izole bölgesel ölçüm alanları (BÖA) ve basınç yönetim alanları (BYA) tesis edilmektedir. Bu stratejik planlama kapsamında, Konya merkez sınırları içerisindeki üç ana ilçede 89 adet BÖA ve 26 adet BYA kurulmuştur.

İzole edilen bu alt bölgeler; debimetreler, basınç sensörleri ve gerekli düğüm noktalarında uzaktan kontrol edilebilir basınç kırıcı vanalar (BKV) vasıtasıyla SCADA sistemi üzerinden anlık olarak izlenmekte ve denetlenmektedir. SCADA altyapısı yalnızca hidrolik parametreleri toplayıp arşivlemekle kalmayıp; derin kuyuların, içme suyu depolarının ve isale hatlarının entegre çalışmasını sağlayan merkezi bir veri yönetim ağı sunmaktadır. Konya genelinde binlerce kuyu, yüzlerce depo ve terfi merkezi bulunması, ana sunuculara yönelik veri trafiğini oldukça yoğunlaştırmaktadır.

Verilerin aktarılması için en önemli gereksinim ise enerjidir. Enerjinin bu sistemlerde olması için güneş panellerinden, elektrik hatlarından faydalanılmaktadır. Sistemler çoğunlukla anlık olarak SCADA ile haberleşerek veriyi göndermektedir, bu durum sistemin kesintisiz enerji ihtiyacını oluşturmaktadır. Bu çalışmada Konya Meram Selçuklu BÖA 20 adlı bölgenin debimetresinden elde edilen Mart 2023-Temmuz 2026 verileri incelenmiştir. Bu veriler 2 dakikalık debi verisidir. Veri boyutu 1.173.311 adet gözlemden oluşmaktadır.

2.2 Yöntem

2.2.1 Sıkıştırılmış algılama

Sıkıştırılmış algılama teorisinin temel ilkesi, matematiksel bir dönüşüm uzayında seyreklik (sparsity) özelliği gösteren yüksek boyutlu sinyallerin, Nyquist örnekleme kriterinin öngördüğü $f_s \geq 2f_{max}$ alt sınırına bağlı kalmaksızın, rastgele seçilmiş az sayıda örnekle kayıpsız veya minimum hatayla yeniden inşa edilebilmesine dayanmaktadır [6].

Matematiksel olarak $x \in R^N$ vektörü, $\psi \in R^{NxN}$ dönüşüm tabanında K-seyrek bir sinyal ($\backslash x = \psi s$ ve $\|s\|_0 = K \ll N$) olsun. Candès ve meslektaşlarının kanıtladığı üzere, $M \ll N$ olmak üzere $y = \phi x = \phi\psi s = \theta s$ biçiminde rastgele doğrusal ölçümler alınır; burada $\phi \in R^{MxN}$ ölçüm matrisidir. Sistem eksik belirlenmiş ($M \ll N$) olduğundan normalde sonsuz çözüme sahiptir; ancak ölçüm matrisi kısıtlı izometri özelliğini (Restricted Isometry Property- RIP) sağlıyorsa, s katsayılar vektörü L_1 norm en küçükleme ile tam olarak çözülebilir:

$$\|s\|_1 \text{ öyle ki } y = \theta s \quad (1)$$

Bu sayede, yüksek boyutlu sinyal henüz ölçüm aşamasındayken doğrudan sıkıştırılmış formda elde edilir ve dışbükey optimizasyon yöntemleriyle kayıpsız biçimde geri inşa edilir.

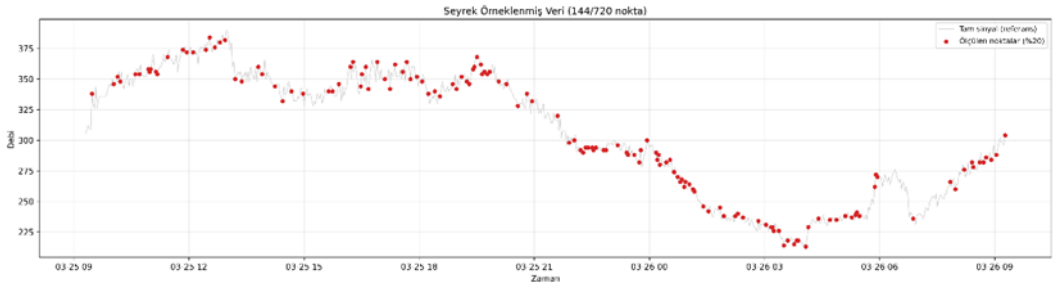
2.2.2 Performans Ölçütleri

Makine öğrenmesi modellerinin doğruluğunu ve genelleme yeteneğini değerlendirmek için çeşitli performans ölçütleri kullanılır. Bu çalışmada, model performansını değerlendirmek için Nash-Sutcliffe (NSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) kullanılmıştır. NSE, tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki benzerliği ölçen istatistiksel bir ölçüdür; 1'e yakın değerler, modelin oldukça doğru sonuçlar ürettiğini gösterir. MAE, tahmin edilen ve gözlemlenen değerler

arasındaki mutlak farkların ortalamasını temsil eder; düşük MAE değerleri, modelin düşük ortalama hata büyüklüğüne sahip olduğunu gösterir. RMSE, MSE'nin (ortalama kare hatası) karekökü olarak hesaplanır ve hataların orijinal birimlerinde yorumlanmasına olanak tanır.

3. Değerlendirme

Sıkıştırılmış algılamada temsil matrisi ile örneklem matrisi arasında uyumsuzluk olmalıdır [6]. Bu uyumsuzluğu ise rastgele ölçümler sayesinde sağlanır. Eğer örnekleme noktaların periyodik bir yapıdaysa, bu örnekleme deseninin kendisi frekans uzayında (Fourier / Wavelet) belirli frekanslarla güçlü şekilde örtüşür, yani ϕ(örneklem matrisi) ile Ψ (Wavelet / Fourier) arasında yüksek uyumsuzluk yerine yüksek uyum oluşur. Bu teorik gereksinimi karşılamak adına, mevcut debi veri setinden farklı oranlarda rastgele alt örnekler çekilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



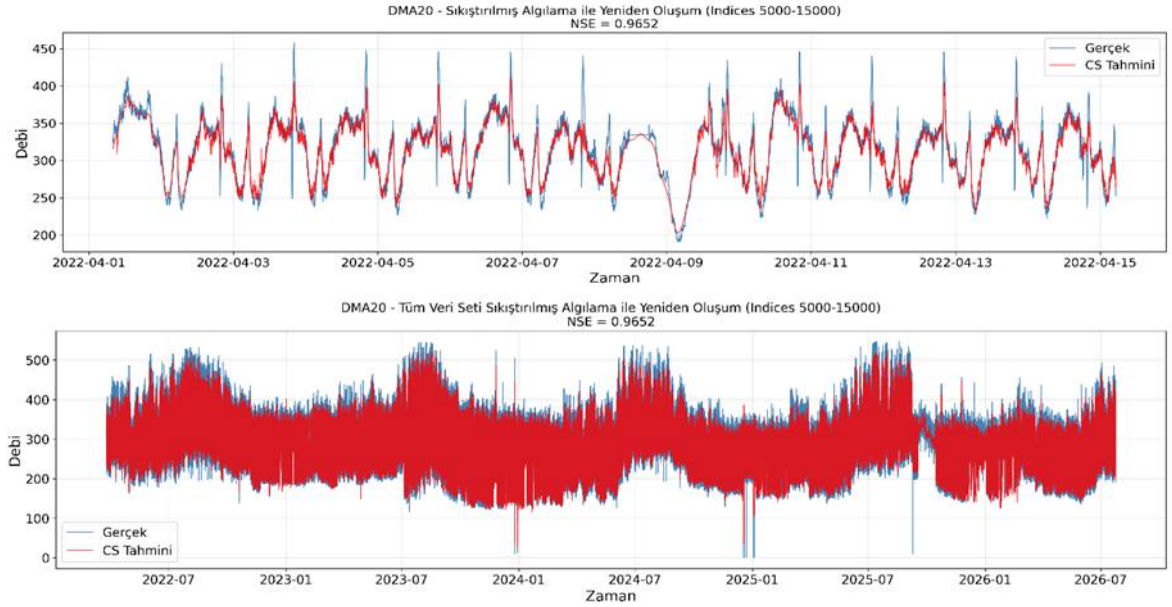
Şekil 1. Bölgeye ait gerçek debi zaman serisi (gri çizgi) üzerinde sıkıştırılmış algılama (CS) analizi için uygulanan rastgele zamanlı örnekleme modeli (%20 örnekleme oranı/ kırmızı noktalar)

Sinyal işleme literatüründe ampirik çalışmalar, optimum geri yapılandırma için seyreklik seviyesinin toplam ölçüm hacminin yaklaşık dörtte biri civarında tutulması gerektiğini rapor etmektedir [6]. Bu araştırmada ise literatürdeki bu genel kabulü test etmek amacıyla seyreklik/örnekleme oranları %10'dan %25'e kadar kademeli olarak değiştirilmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Gerçek verinin yalnızca %20'si ve %25'i kullanılarak yapılan yeniden yapılandırma işlemlerinde dahi NSE değerlerinin 0,95 barajını aşması, üretilen serilerin gerçek şebeke karakteristiğiyle son derece yüksek bir uyum sergilediğini kanıtlamaktadır. Bu iki senaryoya ait MAE değerleri sırasıyla 10,75 m^3/sa ve 9,55 m^3/sa olarak hesaplanmıştır. RMSE değerlerinin (14,75 ve 13,05 m^3/sa) MAE değerlerine yakın seyretmesi, modelin uç hatalar üretmediğini ve kararlı yapısını doğrulamaktadır. Ortalama debi bazındaki mutlak sapmalar incelendiğinde ise sırasıyla %0,77 ve %0,64'lük oldukça düşük hata payları elde edilmiştir.

Tablo 1. Farklı örnekleme oranlarına göre sıkıştırılmış algılama yönteminin geri yapılandırılma performans ölçütleri ve gerçek debi değerleriyle karşılaştırılması

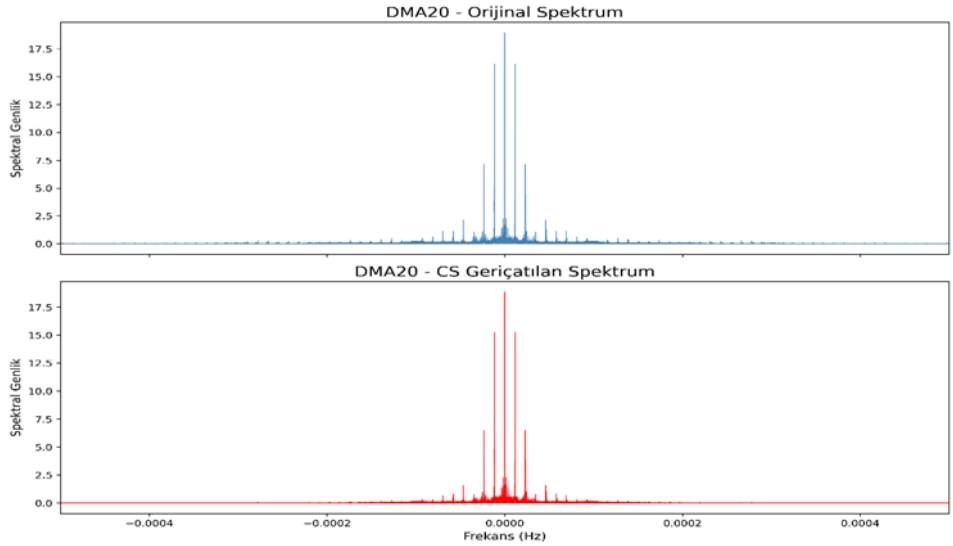
Örnekleme Oranı	Boyut	NSE	MAE	RMSE	Ortalama Debi (m^3/sa)
10%	11388	0,891	16,906	23,083	297,35
15%	170532	0,936	12,865	17,686	299,29
20%	227376	0,955	10,759	14,759	300,17
25%	284220	0,965	9,553	13,058	300,56
Gerçek (%100)	1137165				302,5

Geri çatılan zaman serisi ile orijinal veri akışının karşılaştırmalı grafikleri Şekil 2'de sunulmuştur. Yeniden oluşturulan zaman serisinin, orijinal verideki ani tüketim dalgalanmalarını (pik noktalarını) genel eğilim bazında başarıyla yakaladığı, ancak bazı ekstrem tepe değerlerinin genliklerini tam olarak karşılayamadığı gözlenmektedir (Şekil 2a). Orijinal veri setindeki bu ani sıçramalar, hidrolik gürültü kaynaklı olabilmektedir. Şebekede kullanılan ultrasonik tip debimetreler akustik prensiplerle çalıştıklarından, yapısal olarak gürültülü sinyal üretme eğilimindedir. Tüm veri setini kapsayan Şekil 2b incelendiğinde, CS tabanlı modelin makro ölçekte genel hidrolik eğilimden kopmadığı müşahede edilmektedir.



Şekil 2. Gerçek debi verileri ile %25 örnekleme oranı kullanılarak sıkıştırılmış algılama yöntemiyle yeniden yapılandırılan zaman serilerinin karşılaştırmalı analizi: a) Belirli bir zaman aralığındaki (5000-15000 indisleri) kısmi uyum ve pik noktaları, b) Tüm gözlem dönemini kapsayan genel eğilim uyumları

Sıkıştırılmış algılama spektral analizi; haftalık döngü (168 saat) gibi baskın düşük frekanslı bileşenleri %1 gibi ihmal edilebilir bir hata payıyla korurken, yüksek frekanslı harmoniklere doğru ilerledikçe sistematik bir genlik daralması sergilemektedir (Şekil 3). Günlük periyodun ana bileşeninde %5,4, ikinci harmoniğinde ise %8,6 oranında genlik kaybı belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle; sinyaldeki düşük frekanslı, uzun periyotlu makro bileşenler neredeyse kayıpsız şekilde geri yapılandırılırken, yüksek frekanslı ve kısa periyotlu mikro bileşenlere gidildikçe kayıp miktarının sistematik olarak büyüdüğü saptanmıştır.



Şekil 3. BÖA debi zaman serisinin frekans uzayındaki spektral seyreklik analizi: a) Orijinal zaman serisinin fourier spektrumu, b) %25 örnekleme oranıyla geri çatılan zaman serisinin Fourier spektrumu

Elde edilen sonuçlar, sıkıştırılmış algılama yönteminin BÖA hidrolik zaman serilerini başarılı bir şekilde yeniden yapılandırdığını ve yüksek frekanslı debi ölçümlerinde güvenle uygulanabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, BÖA ve BYA şebekelerinde yürütülecek ölçüm çalışmalarında, özellikle kalıcı enerji altyapısı bulunmayan geçici ölçüm noktalarındaki cihazların harici bir güç beslemesine ihtiyaç duymaksızın, yalnızca dahili bataryalarla uzun süre işlevsel kalabileceğini ortaya koymaktadır. Enerji altyapısı kurulum bütçelerinin optimize edilmesiyle, su idareleri aynı bütçeyle daha fazla noktada

ölçüm yapabilme ve sızıntı tespiti çalışmalarının kapsamını genişletme imkânı bulacaktır [13-14]. Ayrıca kablosuz veri aktarım sistemlerinde donanımsal veya yazılımsal kesintiler nedeniyle yaşanan veri kayıpları, literatürde genellikle sabit ortalama veya medyan değer atamalarıyla doldurulmaktadır. Önerilen CS modeli, bu tür yapay veri atamalarına ihtiyaç bırakmaksızın, kaybolan veri dilimlerinin gerçekçi dinamiklerle yüksek doğrulukta tamamlanmasına olanak tanımaktadır. Başka bir ifadeyle, debimetrelerin kesintisiz veri ileterek sürekli enerji tüketmesi yerine, zamanın yalnızca dörte biri veya beşte biri oranında rastgele anlarda uyanıp örnekleme yapması ve ardından uyku moduna geçmesi, sistemlerin toplam enerji ve veri iletim kaynaklarını kayda değer ölçüde optimize edecektir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Konya BÖA içme suyu şebekesine ait iki dakikalık çözünürlükteki, dört yılı aşkın dinamik debi verilerinin sıkıştırılmış algılama yöntemiyle seyrek örnekleme üzerinden yeniden inşa edilebilirliği incelenmiştir. Sıkıştırılmış algılama yönteminin BÖA'larda bulunan debimetrelerin sürekli ve düzenli veri iletimi gereksinimini ortadan kaldırarak yüksek oranda doğruluk ile geri yapılandırması yapabildiği gösterilmiştir. Debi zaman serilerinin frekans uzayında seyrek olarak temsil edilebilirliği doğrulanmıştır. Sıkıştırılmış algılama yöntemi, önsel bir bilgiye gereksinim duymadan yüksek frekanslı akış verilerini başarıyla yeniden oluşturmuştur.

Seyrek örnekleme yaklaşımıyla ölçüm cihazlarının enerji tüketiminin minimize edilmesi ve buna bağlı olarak veri depolama alanlarının küçültülmesi CS ile mümkündür. Su idarelerinin yönettikleri dinamik şehir altyapıları nedeniyle çok büyük miktarda veri kaynağı bulunmakta ve bu verilerin güvenli bir şekilde arşivlenmesi gerekmektedir. CS yöntemi, verinin hem işlenmesi hem de saklanması süreçlerinde operasyonel kolaylık sunmaktadır. Böylece kaynak verimliliği hem sahada cihaz bazında hem de merkezde veri merkezleri (sunucu) bazında iki yönlü olarak sağlanmış olacaktır.

5.Kaynaklar

[1] M. M. Koşucu, "İstanbul Asya Yakası'nda DMA Tabanlı Fizikî Su Kayıpları Yönetimi ve Altyapı Sızıntı Endeksi Analizi", Doğal Afetler Ve Çevre Derg., c. 11, sy. 1, ss. 318-326, Oca. 2025, doi: 10.21324/dacd.1585493.

[2] C. Bozkurt, M. Firat, ve A. Ateş, "Su ve Kanalizasyon İdareleri için Mevcut Durum Analizi ile Uygun Performans Göstergelerinin Web Tabanlı Hesaplama Aracı ile Değerlendirilmesi", Doğal Afetler Ve Çevre Derg., c. 10, sy. 1, ss. 167-178, Oca. 2024, doi: 10.21324/dacd.1309329.

[3] M. M. Koşucu vd., "Gerçek Zamanlı Basınç Yönetimiyle Su Dağıtım Şebekesinde Su Kaybının Azaltılması", Tek. Dergi, c. 32, sy. 1, ss. 10541-10564, Oca. 2021, doi: 10.18400/tekderg.658870.

[4] M. Allen, A. Preis, M. Iqbal, ve A. J. Whittle, "Water Distribution System Monitoring and Decision Support Using a Wireless Sensor Network", içinde 2013 14th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, Honolulu, HI, USA: IEEE, Tem. 2013, ss. 641-646. doi: 10.1109/SNPD.2013.97.

[5] R. Du, L. Gkatzikis, C. Fischione, ve M. Xiao, "Energy Efficient Sensor Activation for Water Distribution Networks Based on Compressive Sensing", IEEE J. Sel. Areas Commun., c. 33, sy. 12, ss. 2997-3010, Ara. 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2481199.

[6] E. J. Candes ve M. B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling", IEEE Signal Process. Mag., c. 25, sy. 2, ss. 21-30, Mar. 2008, doi: 10.1109/MSP.2007.914731.

[7] Z. Li, P. Lee, ve R. Murch, "Compressive-sensing based super-resolution detection for leakage and uniform blockage in water pipelines", Mech. Syst. Signal Process., c. 158, s. 107686, Eyl. 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.107686.

[8] G. Tzagkarakis, P. Charalampidis, S. Roubakis, A. Makrogiannakis, ve P. Tsakalides, "Quantifying the Computational Efficiency of Compressive Sensing in Smart Water Network Infrastructures", Sensors, c. 20, sy. 11, s. 3299, Haz. 2020, doi: 10.3390/s20113299.

[9] K. Zhang, W. Bin Mamoon, E. Schwartz, ve A. J. Parolari, "Reconstruction of Sparse Stream Flow and Concentration Time-Series Through Compressed Sensing", Geophys. Res. Lett., c. 50, sy. 2, s. e2022GL101177, Oca. 2023, doi: 10.1029/2022GL101177.

[10] A. R. Alan ve C. Bayındır, “30 Ekim 2020 İzmir-Samos Tsunamisi Ölçümlerinin Sıkıştırılabilir Algılama Yöntemiyle Analizi”, Fırat Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg., c. 36, sy. 2, ss. 837-845, Eyl. 2024, doi: 10.35234/fumbd.1455780.

[11] L. Zhao, Y. Kuang, J. Zhang, ve B. Teng, “Compressive Sensing Convolution Improves Long Short-Term Memory for Ocean Wave Spatiotemporal Prediction”, J. Mar. Sci. Eng., c. 13, sy. 9, s. 1712, Eyl. 2025, doi: 10.3390/jmse13091712.

[12] A. Rezai, P. Keshavarzi, ve Z. Moravej, “Key management issue in SCADA networks: A review”, Eng. Sci. Technol. Int. J., c. 20, sy. 1, ss. 354-363, Şub. 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2016.08.011.

[13] J. C. Van Der Walt, P. S. Heyns, ve D. N. Wilke, “Pipe network leak detection: comparison between statistical and machine learning techniques”, Urban Water J., c. 15, sy. 10, ss. 953-960, Kas. 2018, doi: 10.1080/1573062X.2019.1597375.

[14] C. M. Corzo, L. Alfonso, G. Corzo, ve D. Solomatine, “Locating Multiple Leaks in Water Distribution Networks Combining Physically Based and Data-Driven Models and High-Performance Computing”, J. Water Resour. Plan. Manag., c. 149, sy. 12, s. 04023066, Ara. 2023, doi: 10.1061/JWRMD5.WRENG-6005.

Samsun Terme Ovasında Kentsel Taşkın Risk Değerlendirmesi ve Yapı Ölçeğinde Doğrudan Hasar Tahmini

Enes YILDIRIM*
Giresun Üniversitesi, Gaziler, Prof. Ahmet Taner Kışlalı Cd., 28200 Giresun Merkez/Giresun, 0000-0002-9043-769X
enes.yildirim@giresun.edu.tr

Babak MAHMOUDI
Giresun Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Gaziler, Prof. Ahmet Taner Kışlalı Cd., 28200 Giresun Merkez/Giresun, 0009-0002-3557-0903
babak.mahmoudi@giresun.edu.tr

Anahtar Kelimeler: kentsel taşkın, Terme, HEC-RAS 2B modelleme, taşkın hasar tahmini

1. Amaç

Kentsel taşkınlar, hızlı kentleşme ve iklim değişikliğinin birlikte tetiklediği en yıkıcı hidrometeorolojik afetlerden biridir. Türkiye özelinde taşkın, depremlerden sonra ikinci en önemli doğal afet olup kayıtlı afet olaylarının üçte birinden fazlasını oluşturmaktadır [1]. Özellikle nehir taşkınları üzerlerinde bulunan beşeri faaliyetleri (ulaşım, tarım, ticaret vb.) en sık etkileyen taşkın tiplerindendir [2]. Karadeniz kıyısı, denizden gelen nemli hava kütlelerinin Canik Dağları tarafından yükseltilmesiyle oluşan yüksek şiddetli ve kısa süreli yağışlar nedeniyle ülkenin en fazla taşkına maruz kalan koridorlarından biridir. Samsun ilinin doğusunda yer alan Terme ilçesi, dik yukarı havzadan alçak eğimli deltaik ovaya ani geçişi nedeniyle sık ve şiddetli ani taşkınlara maruz kalmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Terme Çayı havzasında kentsel taşkının hidrolik mekanizmalarını ve mekânsal yayılımını iki boyutlu (2B) kararsız akım modeliyle nicel olarak değerlendirmek ve farklı tekerrür sürelerinde yapı ölçeğinde doğrudan ekonomik hasarı tahmin etmektir.

Literatürde Terme havzasına yönelik en kapsamlı önceki çalışma, Bozoğlu tarafından 2012 taşkınının 1B/2B birleşik modellerle incelenmesi ve yukarı havza yapısal önlemlerinin aşağı havza taşkınına etkisinin değerlendirilmesi üzerine odaklanmış bir çalışmadır [3]. Ancak, Türkiye'deki mevcut değerlendirmelerin çoğu kararlı (steady) akım varsayımına dayanarak pik debiyi zamandan bağımsız bir sınır koşulu olarak ele almakta olup bu türden bir yaklaşım düz deltaik ortamlarda taşkın dalgasının zamansal ötelenmesini, taşkın yayılımının ilerleyişini ve pik derinliklerin yerleşim alanlarına varış süresini yeterince temsil edememektedir. Bu çalışma, 1 metre (m) çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), kararsız akımlı tam momentum 2B hidrodinamik model ve yapı ölçeğinde derinlik–hasar fonksiyonlarını bir arada kullanarak Terme ovası için ilk yapı ölçekli doğrudan hasar değerlendirmesini sunmakta ve taşkın riski yönetimi, arazi kullanım planlaması ile yapısal koruma önceliklendirmesi için nicel bir kanıt tabanı oluşturmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Terme ovasında kentsel taşkının yayılımını ve etkisini değerlendirmek için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), hidrolojik analiz ve hidrodinamik modellemeyi bütünleştiren bir çerçeve uygulanmıştır. Yöntem; çalışma alanının tanımlanması, veri ve yapı envanterinin oluşturulması, HEC-HMS ile pik debilerin hesaplanması ve HEC-RAS 2B modeliyle taşkın yayılım haritalarının üretilmesi adımlarından oluşmaktadır.

2.1 Çalışma Alanı

Terme ilçesi, çalışma alanının en doğusunda yer almakta ve Terme Çayı'nın drenaj alanında yer almaktadır (Şekil 1). Kızılırmak ve Yeşilırmak gibi büyük akarsu sistemlerinin aksine Terme havzası göreli olarak küçük olmakla birlikte ani taşkınlara oldukça yatkındır. Havza, yaklaşık 393,2 km² drenaj alanına sahiptir. Ana kanal, Canik Dağları'ndaki kaynaklarından Karadeniz'e döküldüğü noktaya kadar 56 km boyunca uzanmaktadır. Ortalama havza eğimi %3 olarak hesaplanmış olsa da bu değer kritik bir hidrolik geçişi gizlemektedir. Öyle ki, yukarı havza dik ve engebeli araziden hızlı yüzeysel akış üretirken, aşağı kentsel kesimler neredeyse düz bir deltaik ovaya dönüşmektedir. Yüksek hızlı yukarı havza akımlarının düşük kapasiteli, düşük eğimli aşağı havza kanallarıyla karşılaştığı bu "darboğaz" etkisi, Terme ilçesinde gözlenen sık ve şiddetli kentsel taşkınların temel nedenidir [3].

Terme havzası, akışın doğrudan kentsel merkezden geçtiği, düzenlenmemiş (barajsız) bir havzadır; dolayısıyla havzada üretilen tüm yüzeysel akış herhangi bir rezervuar tarafından tutulmadan doğrudan yerleşim alanına ulaşmaktadır. Bölge, güncel iklim sınıflandırmasına göre nemli subtropikal iklim kuşağında yer almakta; yüksek nem ve yıl boyu süregelen yağışla karakterize edilmektedir. Karadeniz'den gelen nem yüklü hava kütlelerinin Canik Dağları tarafından yükseltilmesi, ani taşkınları tetikleyen yüksek şiddetli ve kısa süreli sağanaklara yol açmaktadır.



Şekil 1. Terme Çayı havzasının konumu, havza sınırları ve drenaj ağı

2.2 Veri Temini ve Yapı Envanteri

Hidrolik modelin temeli, yüksek doğruluklu topografik ve arazi örtüsü verilerine dayanmaktadır. Havza sınırlarını, akarsu ekseni ve karmaşık taşkın yatağı topografyasını tanımlamak için 1 m çözünürlüklü bir SYM kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü (Manning n) belirleyen kentsel, tarımsal ve doğal örtü sınıfları hidrolik modelleme safhasında pürüzlülük katsayısının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Terme ovası için kapsamlı bir yapı envanteri, en güncel yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden bireysel yapıların otomatik sayısallaştırma algoritmasıyla çıkarılmasıyla oluşturulmuştur. Her yapı poligonu, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) kayıtlarıyla eşleştirilerek konut, ticari ve sanayi gibi kullanım sınıfları atanmış ve güncel emlak değerlerine göre birim yenileme bedelleri türetilmiştir. Taşkın derinliklerini ekonomik kayba dönüştürmek için, her kullanım sınıfı için su derinliğini yapısal ve içerik kaybı yüzdesine bağlayan HAZUS derinlik–hasar fonksiyonları benimsenmiştir [4]. Hidrodinamik model çıktıları, coğrafi referanslı yapı envanteri ve kayıp fonksiyonları CBS ortamında birleştirilerek yapı ölçeğinde doğrudan hasar tahminleri elde edilmiştir.

2.3 Hidrolojik Modelleme

Havza içinde sürekli ve güvenilir akım gözlem verisinin sınırlı olması nedeniyle pik taşkın debilerinin tahmininde olay tabanlı yağış–akış modellemesi tercih edilmiş ve Terme havzasının aşırı yağış koşullarındaki tepkisi HEC-HMS ile simüle edilmiştir. Tasarım yağışları, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) elde edilen Şiddet–Süre–Tekerrür (IDF) eğrileriyle oluşturulmuş; Karadeniz bölgesinin yoğun, konvektif ve hızlı pik yapan yağış desenlerini temsil etmek için SCS Tip II dağılımlı 24 saatlik tasarım sağanağı benimsenmiştir [5]. Toplam simülasyon süresi, taşkın dalgasının havza çıkışına ulaşmasına ve azalma eğrisinin tümüyle yakalanmasına olanak tanımak için 48 saate uzatılmıştır.

Yağış kayıplarını hesaplamak ve etkin yüzeysel akış hacmini belirlemek için, aşağıdaki eşitlikle ifade edilen SCS Eğri Numarası (SCS-CN) yöntemi uygulanmıştır (Denklem 1):

$$Q = (P - Ia)^2 / (P - Ia + S) \quad (1)$$

Bu eşitlikte Q doğrudan akış derinliğini (mm), P toplam kümülatif yağışı (mm), Ia başlangıç soyutlamasını (mm; genellikle 0,2S), S ise akış başladıktan sonraki potansiyel maksimum tutulmayı (mm) göstermektedir. S parametresi boyutsuz Eğri Numarası (CN) ile olan ilintisi Denklem 2 üzerinde verilmiştir.

$$S = (25400 / CN) – 254 \quad (2)$$

Arazi örtüsü, hidrolojik toprak grupları ve öncül nem koşullarının mekânsal dağılımını hassas biçimde temsil etmek için yüksek çözünürlüklü TRCN100 veri seti kullanılmıştır [6]. Tasarım sağanakları, SCS Birim Hidrograf dönüşüm yöntemiyle HEC-HMS içinde ötelenerek 2 ila 500 yıl arasında değişen tekerrür süreleri için sentetik akış hidrografları üretilmiş ve bunlar kararsız akım hidrodinamik simülasyonlarının yukarı havza sınır koşullarını oluşturmuştur.

2.4 İki Boyutlu Hidrodinamik Modelleme

Hidrolik öteleme ve taşkın yayılım haritalaması, HEC-RAS'ın iki boyutlu (2B) modelleme yetenekleriyle gerçekleştirilmiştir. Terme ovasının son derece düz deltaik topografyası, bir boyutlu modeller bu tür düz ve yoğun yapılaşmış arazilerde yanal taşkın yayılımını temsil etmekte yetersiz kalmakta olduğundan [7], taşkın dalgalarının karmaşık yanal yayılımını, çok yönlü akış yollarını ve zamansal sönümlenmesini doğru biçimde temsil edebilmek için 2B yaklaşımı zorunlu kılmıştır.

Taşkın yayılımının arazi üzerindeki yayılımında kullanılan arazi modeli temeli 1 m çözünürlüklü SYM üzerine kurulmuştur. Hesaplama verimliliğini korurken hidrolik doğruluğu sağlamak amacıyla mekânsal olarak değişken bir hesaplama ağı oluşturulmuş; ana kanal boyunca hücre boyutu 15 m × 15 m'ye kadar sıklaştırılırken uzak taşkın yatağı alanlarında 50–100 m arasında daha kaba hücreler kullanılmıştır. Nehir kıyıları, yol dolguları ve doğal sırtlar gibi kritik topografik kontrolleri zorlamak ve yapay sayısal akış sızıntısını önlemek için yapısal kırılma çizgileri ağa dâhil edilmiştir. Sayısal kararlılığı sağlamak ve Courant–Friedrichs–Lewy (CFL ≤ 1,0) koşulunu karşılamak için 1 saniyelik sabit zaman adımı kullanılmıştır. Kentsel yapıların neden olduğu dik hız gradyanlarını ve yerel türbülansı yakalamak amacıyla, basitleştirilmiş difüzyon dalgası yerine tam momentum (Full Momentum) sığ su denklemleri çözülmüştür.

Sınır koşulları, HEC-HMS modelinden elde edilen sentetik tasarım hidrograflarının yukarı havza sınırlarına tanımlanmasıyla oluşturulmuştur. Karadeniz'e boşalan aşağı havza çıkışında ise yerel enerji eğimine dayalı normal derinlik sınır koşulu uygulanmıştır. Terme havzası düzenlenmemiş (barajsız) olduğundan, havzanın ürettiği akışın tamamı kentsel merkezden geçecek şekilde modellenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, Sentinel-2 tabanlı LULC haritalarından her arazi örtüsü sınıfı için atanan mekânsal olarak değişken Manning katsayılarıyla temsil edilmiştir [8].

3. Değerlendirme

3.1 Havzanın Fiziksel Özellikleri

Hidrodinamik simülasyondan önce Terme havzasının fiziksel ve morfometrik parametreleri çok ölçekli topografik yaklaşımla çıkarılmıştır. Terme havzası, alt havzalar ölçeğinde göreli olarak dik ortalama eğim ve kısa toplanma süresi (Tc) ile karakterize edilmekte; bu durum, havzanın ani taşkınlara yatkınlığını arttırmaktadır. Havzanın alt havzalara ait başlıca morfometrik özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Terme havzasına ait alt havzaların fiziksel ve morfometrik özellikleri

Alt Havza	Drenaj Alanı (km²)	Ana Kanal Uz. (km)	Ort. Eğim (%)	Ağırlıklı CN
SB-T1	229,5	35,57	0,410	60
SB-T2	136,1	46,50	0,353	60
SB-T3	16,3	10,45	0,066	70
SB-T4	11,2	10,96	0,040	70

3.2 Pik Debi Tahmini

Terme havzasının hidrolojik tepkisi, sekiz farklı tekerrür süresi için HEC-HMS modeliyle simüle edilmiştir. Yüksek çözünürlüklü TRCN100 veri seti ile yerel IDF eğrilerinin birlikte kullanılmasıyla sentetik hidrograflar üretilmiş; elde edilen pik debiler (Q) Tablo 2'de sunulmuştur. Debilerin 2 yıldan 5 yıla geçişte belirgin biçimde artması, havzanın sık yağış olaylarına karşı yüksek duyarlılığını yansıtmaktadır.

Tablo 2. Terme Çayı için farklı tekerrür sürelerine ait tahmini pik debiler (m^3/s)

Q2	Q5	Q10	Q25	Q50	Q100	Q200	Q500
161,1	513,8	826,0	1272,0	1632,0	2008,1	2394,6	2790,2

3.3 Taşkın Risk Değerlendirmesi ve Doğrudan Hasar

Taşkın risk değerlendirmesi Terme deltaik havzası için 2 ila 500 yıl arasındaki sekiz tekerrür süresinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, Terme'nin sınırlı kanal kapasitesi nedeniyle sık olaylara karşı yüksek duyarlılık gösterdiğini; taşkın ve yapısal hasarların göreli olarak düşük tekerrür sürelerinde ortaya çıktığını göstermektedir. Doğrudan hasarlar, taşkın derinlik grid'leri ile yapı envanteri ve fonksiyonlarının birleştirilmesiyle Türk Lirası (₺) cinsinden hesaplanmıştır.



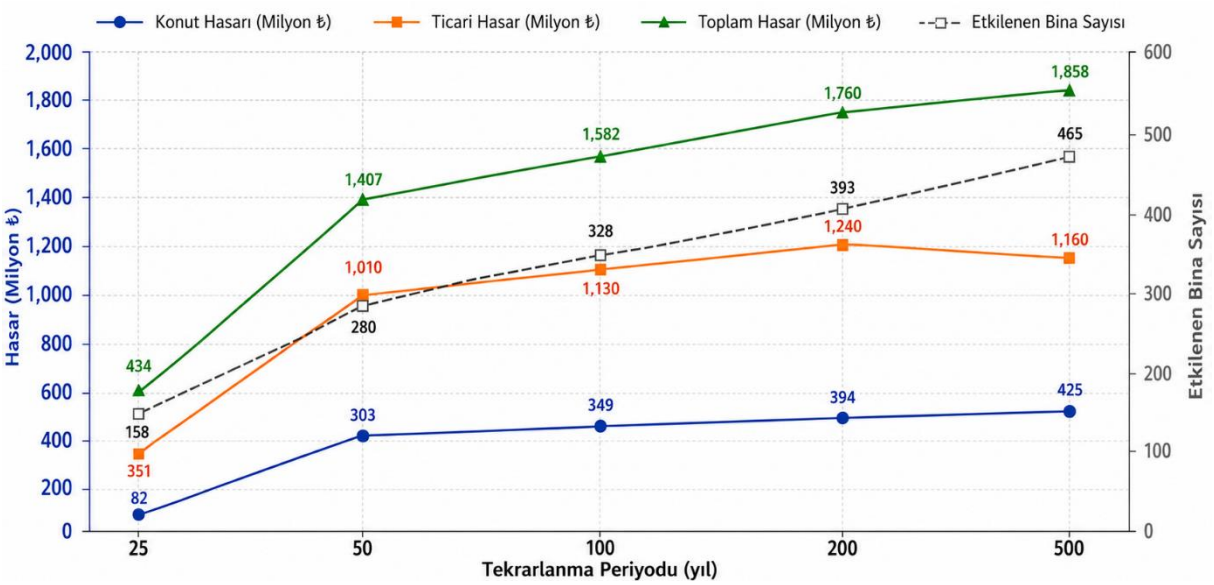
Şekil 2. Terme deltaik ovası için (a) 100 ve (b) 200 yıllık tekerrür sürelerine ait, 2B HEC-RAS modeliyle üretilen taşkın yayılım haritaları

Tablo 3'te görüldüğü üzere Terme'de ticari yapılar her tekerrür süresinde toplam kaybın baskın bileşenini oluşturmakta ve konut hasarını yaklaşık 2,5–3,5 kat aşmaktadır. 500 yıllık olayda ticari hasar 1,16 milyar ₺'ye ulaşmakta ve bu durum, taşkına yatkın kentsel çekirdekte zemin katlarda yer alan perakende, konaklama ve hizmet sektörü yapılarının yüksek yenileme değerlerini yansıtmaktadır. Konut hasarı mutlak değer olarak daha düşük olmakla birlikte en fazla sayıda yapıyı (500 yıllık olayda 344 konut) etkileyerek konut stokunun geniş coğrafi maruziyetine işaret etmektedir. Toplam kullanım tipleri genelinde ticari sektör tüm tekerrür sürelerinde toplam hasarın yaklaşık %60–65'ini, konut ise yaklaşık %20–25'ini oluşturmaktadır.

Tablo 3. Terme için tekerrür süresine ve baskın kullanım tipine göre doğrudan hasar tahminleri

Tekerrür (yıl)	Konut (M₺)	Ticari (M₺)	Toplam Hasar (M₺)	Etkilenen Yapı
25	82,20	351,40	433,60	158
50	302,87	1010,00	1406,72	280
100	349,35	1130,00	1582,19	328
200	393,72	1240,00	1759,82	393
500	425,29	1160,00	1857,76	465

500 yıllık tasarım olayında Terme'de toplam doğrudan hasar yaklaşık 1,86 milyar ₺'ye ulaşmakta ve 465 yapıyı etkilemektedir. Bu hasar; yapı başına yaklaşık 4,00 milyon ₺'ye, ilçe nüfusu (yaklaşık 60.000) üzerinden hesaplandığında ise kişi başına yaklaşık 31,0 bin ₺'ye karşılık gelmektedir. Terme'nin hasar–tekerrür ilişkisi, tekil bir kritik eşiğe bağlı kalmaksızın debi büyüklüğüyle sürekli ve neredeyse monotonik biçimde artan bir eğri sergilemektedir; bu davranış, çalışma alanında taşkın maruziyetinin belirli bir taşma eşiğiyle tetiklenmekten çok kademeli olarak ölçeklendiğini göstermektedir (Şekil 2 ve Şekil 3).



Şekil 3. Terme için hasar–tekerrür süresi ilişkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Samsun ilinin Terme ilçesindeki kentsel taşkının hidrolik mekanizmaları, mekânsal yayılımı ve doğrudan ekonomik sonuçları çok ölçekli ve bütünleşik bir çerçeveyle nicel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Terme havzası, dik yukarı havzadan düşük eğimli alüvyal ovaya ani hidrolik geçişi ("darboğaz" etkisi) nedeniyle göreli olarak sık tekerrür sürelerinde hasar verici taşkınlar üretmektedir; belirgin taşkın yayılımı 25 yıllık senaryodan itibaren başlamaktadır.
- Havzanın düzenlenmemiş (barajsız) yapısı, üretilen tüm akışın doğrudan kentsel merkezden geçmesine yol açarak taşkın riskini artırmaktadır.

- 500 yıllık olayda toplam doğrudan hasar yaklaşık 1,86 milyar ₺'ye ulaşmakta ve 465 yapıyı etkilemektedir; ticari yapılar tüm tekerrür sürelerinde toplam kaybın yaklaşık %60–65'ini oluşturmaktadır.
- Yapı başına ortalama hasar yaklaşık 4,00 milyon ₺, kişi başına maruziyet ise yaklaşık 31,0 bin ₺ düzeyindedir; en fazla sayıda yapının konut sınıfında etkilenmesi geniş konut maruziyetine işaret etmektedir.
- Terme için en yüksek risk azaltma kaldıracı; ticari sektöre yönelik taşkına dayanıklılık önlemleri, erken uyarı sistemleri ve sigorta teşvik mekanizmalarında yatmaktadır. Yapı ölçekli hasar haritaları, Taşkın Risk Yönetimi Yönetmeliği kapsamındaki planlar ve yapısal koruma önceliklendirmesi için nicel bir kanıt tabanı sağlamaktadır.

5. Kaynaklar

[1] Haltas, I., Yildirim, E., Oztas, F., Demir, I. (2021). A comprehensive flood event specification and inventory: 1930–2020 Turkey case study. International Journal of Disaster Risk Reduction, 56, 102086.

[2] Merz, B., Hall, J., Disse, M., Schumann, A. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(3), 509–527.

[3] Bozoğlu, B. (2015). 1-D and 2-D Flood Modeling Studies and Upstream Structural Measures for Samsun City Terme District (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Ankara.

[4] Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2022). Hazus Flood Model Technical Manual: Hazus 5.1. U.S. Department of Homeland Security.

[5] Ponce, V. M., Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity?. Journal of Hydrologic Engineering, 1(1), 11–19.

[6] Babagiray, S., Cevahir, F. Y. E., Seyrek, K., Babagiray, G. (2026). TRCN100, High-Resolution Gridded Curve Numbers of Türkiye to Use in Hydrological Models. Journal of Computing in Civil Engineering, 40(3), 04026002.

[7] Patel, D. P., Ramirez, J. A., Srivastava, P. K., Bray, M., Han, D. (2017). Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: A case application of the new HEC-RAS 5. Natural Hazards, 89(1), 93–130.

[8] Brunner, G. W. (2020). HEC-RAS, River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center (HEC), US Army Corps of Engineers.

Küçük Menderes Havzası Su Ortamlarında Per- ve Poliflorlu Alkil Maddelerin (PFAS) Değerlendirilmesi

Ezgi AYIŞIĞI AŞICI*
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0002-3936-7681
ezgiayisigi@iyte.edu.tr

Neval BAYCAN
Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0001-9243-4655
neval.baycan@deu.edu.tr

Oyanur ÖZTÜRK
Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ozturk.oyanur@ogr.deu.edu.tr

Hakan ALYÜRÜK
Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, İzmir
ORCID: 0000-0001-8632-4281
hakan.alyuruk@deu.edu.tr

Yetkin DUMANOĞLU
Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0003-3381-4425
yetkin.dumanoglu@deu.edu.tr

Efem BİLGİÇ
Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0002-6855-4750
efem.bilgic@deu.edu.tr

Hasan ALTIOK
Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
hasan.altiok@deu.edu.tr

Barış GÜMÜŞTAŞ
Ege Üniversitesi, İlaç Geliştirme ve Farmakokinetik Araştırma ve Uygulama Merkezi, İzmir
ORCID: 0000-0002-3640-925X
baris.gumustas@ege.edu.tr

Mustafa ODABAŞI
Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0002-0506-0470
mustafa.odabasi@deu.edu.tr

Orhan GÜNDÜZ
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir
ORCID: 0000-0001-6302-0277
orhangunduz@iyte.edu.tr

Anahtar Kelimeler: PFAS, Küçük Menderes Havzası, su kalitesi, atıksu arıtma tesisi

1. Amaç

Per- ve poliflorlu alkil maddeler (PFAS), güçlü karbon–flor bağları nedeniyle çevrede yüksek kalıcılık gösteren, biyobirikime ve uzun mesafeli taşınıma uğrayabilen geniş bir sentetik organik kimyasal grubudur. Tekstil, kâğıt, yüzey kaplama, yangın söndürme ve seramik gibi çok sayıda endüstriyel

süreçte kullanılmaları nedeniyle atıksu, yüzey suyu ve yeraltı suyu ortamlarına ulaşmaktadır [1, 2]. PFAS bileşiklerinin sucul ortamdaki dağılımı ve akıbeti diğer su kalitesi parametrelerinden etkilenmektedir. Bu nedenle PFAS bulunuşunun su karakterizasyonu ile birlikte yorumlanması kaynak tanımlaması açısından önem taşımaktadır.

Küçük Menderes Havzası, çok sayıda karma organize sanayi bölgesi, kâğıt, tekstil ve seramik gibi yüksek kirlilik yüküne sahip münferit sanayi tesisleri ve önemli yerleşim yerlerini barındırması nedeniyle PFAS bulunma olasılığının yüksek olduğu bir alandır [3]. Havzada bugüne kadar PFAS'a yönelik bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmanın amacı, havzanın farklı su matrislerinde (yerüstü suyu, yeraltı suyu ve atıksu arıtma tesisi giriş/çıkışları) kış dönemi PFAS düzeylerini belirlemek ve elde edilen PFAS profilini eşzamanlı ölçülen diğer su kalitesi parametreleri (pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik, askıda katı madde, kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam organik karbon) ile birlikte ve ulusal mevzuat sınıflandırmaları çerçevesinde değerlendirerek olası kaynakları ortaya koymaktır. Böylece havza ölçeğinde kaynak temelli bir PFAS izleme yaklaşımı için temel bir veri setinin oluşturulması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı ve Örnekleme

Çalışma alanı olarak, su toplama alanının büyük bölümü İzmir il sınırları içinde yer alan ve Tire, Torbalı, Ödemiş, Pancar ve İTOB gibi karma organize sanayi bölgelerini (OSB) barındıran Küçük Menderes Havzası seçilmiştir [3]. Kış dönemini temsilen, 15 yerüstü suyu (baraj gölleri, doğal göller, nehir/dere noktaları ile kıyı/deniz suyu), 7 yeraltı suyu kuyusu ve havzadaki endüstriyel (tekstil, seramik), OSB (Tire OSB, Pancar OSB, İTOB OSB) ve kentsel (İZSU Tire, İZSU Torbalı) atıksu arıtma tesislerinin (AAT) giriş ve çıkışlarından olmak üzere toplam 37 su numunesi alınmıştır. Numune alma noktaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Numuneler önce numune ortamında yıkanan çelik kova ile alınmış, kontaminasyonu önlemek amacıyla metanol ve PFAS içermeyen ultra saf su ile yıkanıp kurutulan 1 L hacimli yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) şişelere polipropilen (PP) huni ile aktarılmıştır. Numuneler soğuk zincir (+4°C) ile laboratuvara ulaştırılmış olup PFAS analizleri yapılana kadar +4°C'de muhafaza edilmiştir.

2.2 Su Karakterizasyonu

Her numunede sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen ve elektriksel iletkenlik arazide anlık olarak ölçülmüştür. Askıda katı madde (AKM), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik karbon (TOK), toplam inorganik karbon (TİK) ve toplam karbon (TK) laboratuvarda analiz edilmiştir. Karbon parametrelerinin iç tutarlılığı kütle dengesi yaklaşımıyla (TK = TOK + İK) denetlenmiş; KOİ-TOK stokiyometrik ilişkisi (tam oksidasyon için KOİ/TOK oranı yaklaşık 2,67) olası ölçüm anomalilerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Yüzey suyu sonuçları, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY) Ek-5 Tablo 2 Sınıf I–III kriterleriyle [4]; yeraltı suları ise YASKKY [5] ile içme/kullanma amaçlı işletilen kuyular için İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik ve TS 266 [6] referans aralıklarıyla; AAT çıkışları ise Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) sektörel tablo değerleriyle [7] karşılaştırılmıştır.

2.3 PFAS Analizi

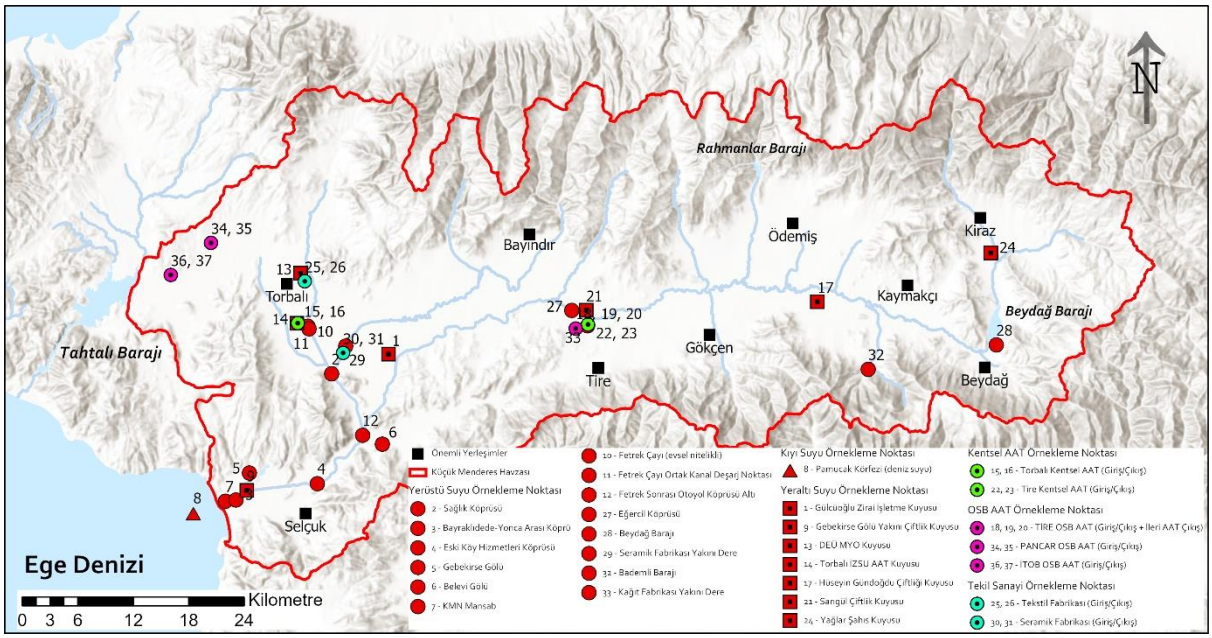
Su numunelerinde 27 hedef PFAS bileşiği, EPA 1633 yöntemiyle uyumlu olarak katı faz ekstraksiyonu (SPE) sonrası LC-MS/MS ile analiz edilmiştir [8]. Yöntem validasyonunda kalibrasyon standardı (PFAC30PAR) 2,5–500 ppb aralığında hazırlanmış ve tüm analitler için doğrusallık $R^2 \geq 0,90$ elde edilmiştir. Tayin limitleri 0,05–5,35 ppb, tespit limitleri ise 0,16–17,83 ppb aralığında belirlenmiştir. Saf suya 5 ve 25 ppb düzeylerinde standart katma ile 27 bileşiğin 24'ünde geri kazanım %62–126 aralığında bulunmuş; yüzey suyu matrisinde ise geri kazanımlar %11–83 aralığına gerilemiştir. Bu durum, yüksek AKM ve organik yük içeren matrislerde matris girişiminin geri kazanımını sınırladığını göstermektedir. Ekstraksiyon için yeterli numune hacminin 250 mL olduğu belirlenmiştir.

3. Değerlendirme

3.1 Su Karakterizasyonu Bulguları

Yüzey sularında Bademli Göleti ve Beydağ Baraj Gölü en düşük organik yüke sahip olup YSKY Sınıf I–II bandındaki referans nitelikli temiz su kütleleridir. Buna karşılık kâğıt fabrikası yakınındaki dere, 0,19 mg/L çözünmüş oksijen değeri ile pratik olarak anaerobik koşula ulaşmış; KOİ, TOK ve AKM değerleri ise sırasıyla 423,1 mg/L, 135,8 mg/L ve 162,5 mg/L seviyeleri ile akarsuyun özümseme kapasitesini

yitirdiğini gösteren ve kontrolsüz/kaçak endüstriyel deşarja işaret eden bir profil sergilemiştir. Gebekirse Gölü (4580 µS/cm) ve Pamucak Körfezi deniz suyu (43600 µS/cm), çalışmadaki en yüksek iletkenliğe sahip su kütleleridir. Bu yüksek iletkenlik değerleri, Gebekirse'nin Küçük Menderes deltasında denize yakın konumu (deniz suyu girişimi ve evaporasyon etkisi) ile Pamucak'ın ise deniz suyu matrisinden kaynaklı ve büyük ölçüde doğal bir özelliktir. Endüstriyel ve karma AAT girişlerinde yüksek KOİ değerleri (tekstil fabrikası girişi 1069,7 mg/L; İTOB girişi 1641,9 mg/L) ölçülürken, iyi işletilen tesis çıkışlarında (Pancar OSB %98, İZSU Torbalı %96 KOİ giderimi ve Tire OSB ileri arıtma çıkışı) atıksulardaki konvansiyonel parametrelerin etkin biçimde giderildiğini göstermektedir.



Şekil 1. Küçük Menderes Nehir Havzası su örnekleme noktaları

3.2 PFAS Bulguları ve Karakterizasyonla İlişkisi

PFAS analizi yapılan 35 numunenin yaklaşık %54'ünde ΣPFAS tespit limitinin (TL) altında kalmıştır. Bu bulgu havzanın büyük bölümünde PFAS yükünün düşük seyrettiğine işaret etmektedir. TL değerinin üzerinde tespit edilen numunelerde ΣPFAS 0,2–104,1 ppb aralığında değişmiş ve en yüksek değerlerin tamamı endüstriyel/karma AAT giriş hatlarında ve endüstriyel atıksu alıcı ortamlarında ölçülmüştür (Tablo 1). Bu dağılım, havzadaki PFAS yükünün yayılı değil, sınırlı sayıda noktasal endüstriyel kaynaktan ortaya çıktığını düşündürmektedir. AAT giriş hatları ile kâğıt fabrikası yakınındaki derede baskın profil, yeni nesil PFAS bileşikleri olan HFPO-DA, NaDONA ve PFPeA'dan oluşmaktadır. PFOA yalnızca Fetrek Çayı evsel deşarjında (3,0 ppb) ve tekstil AAT çıkışında (2,4 ppb) saptanmış, PFOS ise hiçbir numunede tespit limitinin üzerine çıkmamıştır.

Tablo 1. Su kategorilerine göre toplam PFAS konsantrasyonu aralıkları ve baskın bileşikler

Su kategorisi	Numune sayısı	ΣPFAS aralığı (ppb)	Baskın bileşikler
Yüzey suyu (nehir, göl, geçiş, kıyı)	15	<TL – 83,6	PFHpA; kâğıt sanayi deşarjı altındaki derede HFPO-DA/PFPeA/NaDONA
Yeraltı suyu (kuyu)	7	<TL – 1,4	PFHpA
Endüstriyel AAT çıkışı	2	<TL – 2,4	PFOA
Evsel/karma AAT girişi	5	45,8 – 104,1	HFPO-DA, NaDONA, PFPeA
Evsel/karma AAT çıkışı	6	<TL – 2,3	PFPeA

Baskın gözlenen bu üç yeni nesil bileşiğin tipik kullanımları ile kaynakları, çalışmada ölçülen en yüksek konsantrasyonları Tablo 2'de özetlenmiştir. Bu profil, küresel ölçekte PFOA/PFOS'tan yeni nesil bileşiklere geçiş eğiliminin havza sanayisinde de baskın olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Havzada baskın gözlenen yeni nesil PFAS bileşikleri: tipik kullanım/kaynak ve çalışmada ölçülen en yüksek konsantrasyon

Bileşik	Açıklama	Tipik kullanım ve kaynak	Maks. konsantrasyon (ppb)
HFPO-DA	GenX teknolojisi (Hekzafloropropilen oksit-dimer asit)	Yapışmaz kaplama ve su/yağ itici ürünlere yönelik florpolimer (PTFE) üretiminde PFOA yerine kullanılan polimerizasyon işlem yardımcısı	99,8 (İTOB OSB AAT girişi)
NaDONA	Yeni nesil eter bazlı bileşik (NaDONA; sodyum dodekafloro-3H-4,8-dioksanonanoat). Ticari florpolimer işlem yardımcısı ADONA'nın (amonyum tuzu) sodyum tuzu formudur.	Kimya ve elektronik (kablo izolasyonu, conta) endüstrisinde florpolimer üretimi için PFOA'ya alternatif emülgatör	22,6 (Pancar OSB AAT girişi)
PFPeA	Kısa zincirli karboksilik asit (perfloropentanoik asit)	Tekstil/kâğıt yağ-su itici kaplama ve yangın söndürücü köpük (AFFF) kaynaklı; florotelomer bazlı ürünlerin bozunma ürünü	10,0 (Pancar OSB AAT girişi)

Havzada en yüksek ΣPFAS yükleri İTOB (104,1 ppb) ve Pancar (92,2 ppb) OSB arıtma tesisi girişlerinde ölçüldüğünden, bu bölgelerin sektörel bileşimi olası kaynaklar açısından incelenmiştir. Bu bölgelerde PFAS ile ilişkilendirilebilecek çok sayıda sektör (örn. kimya/boya, plastik-polimer ve kompozit işleme, film/bant ile esnek ambalaj/kâğıt, tekstil-konfeksiyon ve deri terbiyesi, metal yüzey işlemleri/galvanizleme ve yangın söndürme sistemleri) yer almaktadır. Baskın bileşiklerin kimyası bu değerlendirmeyi destekler nitelikte olup florpolimer üretiminin işlem yardımcıları HFPO-DA ve NaDONA, PTFE esaslı conta/sızdırmazlık elemanı, teknik keçe/filtre ve teknik tekstil/kompozit üretimiyle; kısa zincirli PFPeA ise tekstil/kâğıt yağ-su itici kaplamalar ve florotelomer bazlı ürünlerin bozunmasıyla ilişkilendirilebilmektedir [2]. Bu değerlendirme sektör düzeyinde olup, yükün hangi tesislerden kaynaklandığının kesinleştirilmesi tesis bazlı kaynak izleme çalışmalarını gerektirmektedir.

Örneklerin karakterizasyonu ile PFAS bulguları birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek PFAS yükleri düşük çözünmüş oksijen değeri olan ve yüksek KOİ, AKM'ye sahip endüstriyel deşarj etkisi altındaki noktalarda gözlenmektedir. Bunun en belirgin örneği kâğıt fabrikası deşarjının yapıldığı derede görülmektedir. Ancak yüksek organik yüke sahip her istasyonda da (örn. Belevi Gölü (KOİ: 90,8 mg/L) ve Küçük Menderes Nehri Eğercil Köprüsü (KOİ: 82,5 mg/L) gibi noktalarda) PFAS tespit edilmemiş ve bu örneklerde ΣPFAS tespit limitinin altında kalmıştır. Bu sebeple konvansiyonel organik kirlilik göstergeleri tek başına PFAS varlığını açıklamamaktadır. Ancak su karakterizasyonu, olası noktasal kaynakları önceliklendirmede güçlü bir bağlamsal araç olarak işlev görmektedir.

İyi arıtma verimi gösteren tesislerde konvansiyonel parametreler giderilmiş olsa da, giriş hatlarındaki yüksek ΣPFAS yükünün (45,8–104,1 ppb) çıkışta belirgin biçimde düşmesi (< TL–2,3 ppb), biyolojik arıtmanın PFAS'ı parçalamaktan çok çamur ve diğer fazlara aktarabileceğine işaret etmekte ve mikrokirleticiler için ayrı bir izleme gerektirmektedir.

3.3 Mevzuatla Karşılaştırma

Çalışma bulguları uluslararası içme suyu ve çevresel sınır değerlerle karşılaştırıldığında (Tablo 3), kâğıt fabrikası deşarjı altındaki derenin (83,6 ppb) ve dört AAT giriş numunesinin (45,8–104,1 ppb) AB İçme Suyu Direktifi'nin (2020/2184) ΣPFAS-20 için öngördüğü 100 ng/L düzeyinin [9] oldukça üzerinde olduğu

gözlenmiştir. Ancak bu noktaların içme suyu kaynağı olmadığı, ve karşılaştırmanın büyüklük mertebesini göstermek amacıyla yapıldığına dikkat edilmelidir. PFOA, iki numunede EPA (2024) MCL değeri olan 4,0 ng/L'nin [10] çok üzerinde saptanmıştır. PFOS'un hiçbir numunede tespit edilmemesi ise 2013/39/EU ve YSKY kapsamındaki kalite standardı (0,65 ng/L) [11] açısından olumlu bir bulgudur.

Tablo 3. Çalışma bulgularının uluslararası içme suyu/çevresel sınır değerlerle karşılaştırılması.

Düzenleme	Parametre	Sınır değer (ng/L)	Çalışmadaki durum
AB İçme Suyu Direktifi 2020/2184 [9]	ΣPFAS-20	100	Kâğıt endüstrisi deşarjı altındaki derede (83,6 ppb) ve dört AAT girişinde (45,8–104,1 ppb) sınırın çok üzerinde
U.S. EPA NPDWR MCL (2024) [10]	PFOA	4,0	Fetrek Çayı evsel deşarj noktası (3,0 ppb) ve tekstil çıkışı (2,4 ppb) sınırın üzerinde
U.S. EPA NPDWR MCL (2024) [10]	HFPO-DA	10	Kâğıt endüstrisi deşarjı altındaki derede (69,4 ppb) ve AAT girişleri (en yüksek 99,8 ppb) sınırın üzerinde
2013/39/EU [11] ve YSKY [4]	PFOS	0,65	Hiçbir numunede tespit edilmedi

4. Sonuçlar

Küçük Menderes Havzası'nda kış döneminde PFAS analizi yapılan 35 su numunesinin yaklaşık %54'ünde ΣPFAS tespit limitinin altında kalmış olup havzanın büyük bölümünde PFAS yükü düşüktür.

En yüksek PFAS düzeyleri endüstriyel/karma AAT girişlerinde ve kâğıt fabrikası deşarjının yapıldığı derede ölçülmüş olup, havzadaki yükün noktasal endüstriyel kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir.

Baskın PFAS bileşikler, HFPO-DA, NaDONA, PFPeA gibi yeni nesil türler olup daha bilinen PFOS türü hiç saptanmamış, PFOA türü ise yalnızca iki noktada tespit edilmiştir.

Havza genelinde düşük çözünmüş oksijene ve yüksek KOİ, AKM'ye sahip endüstriyel etkili noktalar PFAS yükü açısından da öne çıkmakla birlikte, organik kirlilik göstergeleri tek başına PFAS varlığını açıklamamaktadır. Ancak genel karakterizasyon kaynak önceliklendirmesinde bağlamsal bir araçtır.

Etkin biyolojik arıtma konvansiyonel parametreleri giderse de PFAS'ın akıbeti ayrıca izlenmelidir.

Elde edilen veri seti, havzada gelecekteki mevsimsel ve çok matrisli PFAS izlemesi ile kaynak temelli yönetim için temel niteliğindedir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Programı kapsamında 124Y285 numaralı proje ile desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

[1] Evich, M. G., Davis, M. J. B., McCord, J. P., ve ark. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. Science, 375(6580), eabg9065.

[2] Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., ve ark. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Environmental Science: Processes & Impacts, 22(12), 2345–2373.

[3] Küçük Menderes Havzası Yönetim Planı. (2018). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.

[4] Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY). Resmî Gazete, 30 Kasım 2012, Sayı: 28483 (Değişiklik: 16 Haziran 2021, Sayı: 31513).

[5] Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (YASKKY). Resmî Gazete, 7 Nisan 2012, Sayı: 28257.

[6] İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. Resmî Gazete, 17 Şubat 2005, Sayı: 25730; TS 266, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

[7] Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY). Resmî Gazete, 31 Aralık 2004, Sayı: 25687 (Değişiklik: 17 Aralık 2022, Sayı: 32046).

[8] U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Method 1633: Analysis of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous, Solid, Biosolids, and Tissue Samples by LC-MS/MS. Washington, DC.

[9] European Union. (2020). Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Union, L 435, 1–62.

[10] U.S. Environmental Protection Agency. (2024). PFAS National Primary Drinking Water Regulation. Federal Register, 89(80), 32532–32757.

[11] European Union. (2013). Directive 2013/39/EU as regards priority substances in the field of water policy. Official Journal of the European Union, L 226, 1–17.

Spor Tesislerinde Kuraklığa Dirençli Su Yönetimi: Alternatif Su Kaynaklarının SWMM ile Değerlendirilmesi

Abdullah Emin DEMİRCİOĞLU*
Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34722, Türkiye

Kadir GEZİCİ
Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, 25100, Türkiye

Erdal KESGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34469, Türkiye

Anahtar Kelimeler: iklim değişikliği, stadyum, alternatif su kaynakları, kuraklık, swmm

1. Amaç

İklim değişikliği ve artan su talebi, kentsel su yönetiminde yalnızca taşkınların kontrolünü değil, mevcut su kaynaklarının daha verimli kullanılmasını ve içme suyu kalitesi gerektirmeyen talepler için yerel alternatiflerin geliştirilmesini de gerekli hâle getirmektedir. İklim değişikliğine bağlı olarak özellikle yağış süresi ve periyotlarında meydana gelen düzensiz değişimler, bir yandan drenaj sistemleri üzerindeki baskıyı artırırken diğer yandan kurak dönemlerde su arzı ile talep arasındaki açığı büyütebilmektedir [1-2]. Bu nedenle yağmur suyunun yalnızca uzaklaştırılması gereken bir drenaj yükü olarak değil; uygun toplama, depolama ve gerektiğinde arıtma süreçleriyle yeniden kullanılabilecek yerel bir su kaynağı olarak değerlendirilmesi, kuraklığa uyum ve su güvenliği açısından önem taşımaktadır [3].

Stadyumlar ve büyük spor kompleksleri, bu yaklaşımın uygulanabileceği özel kentsel tesislerdir. Geniş çatı yüzeyleri, doğal ve sentetik spor sahaları, otoparklar ve peyzaj alanları aynı yerleşke içerisinde bulunurken; saha sulaması, temizlik, peyzaj ve dönemsel ziyaretçi kullanımı önemli miktarda su talebi oluşturabilmektedir [4,5]. Bu talebin tamamının içme suyu kalitesindeki şebeke suyundan karşılanması, özellikle kuraklık ve su kıtlığı baskısının arttığı dönemlerde sürdürülebilirlik açısından yeniden değerlendirilmelidir. Buna karşılık stadyum çatılarında oluşan yüzey akışı, spor sahalarının katmanlı yapısından drene olan su ve yağmur bahçelerinin alt drenajından elde edilebilecek su, içme suyu kalitesi gerektirmeyen kullanımlar için alternatif kaynak oluşturma potansiyeline sahiptir.

Mevcut su kaynakları, yağış-akış ilişkileri ve sızma karakteristikleri açısından birbirinden farklı hidrolojik davranışlar sergilemektedir. Çatı akışı yağışa doğrudan tepki verirken, spor sahaları ve yağmur bahçelerinde infiltrasyon, geçici depolama ve alt drenaj süreçleri suyun sistemden çıkışını geciktirebilmektedir [6-7]. Bu farklılık, kaynakların yalnızca ayrı ayrı değil, birbirini tamamlayabilecek bir su sistemi olarak ele alınmasını mümkün kılmaktadır.

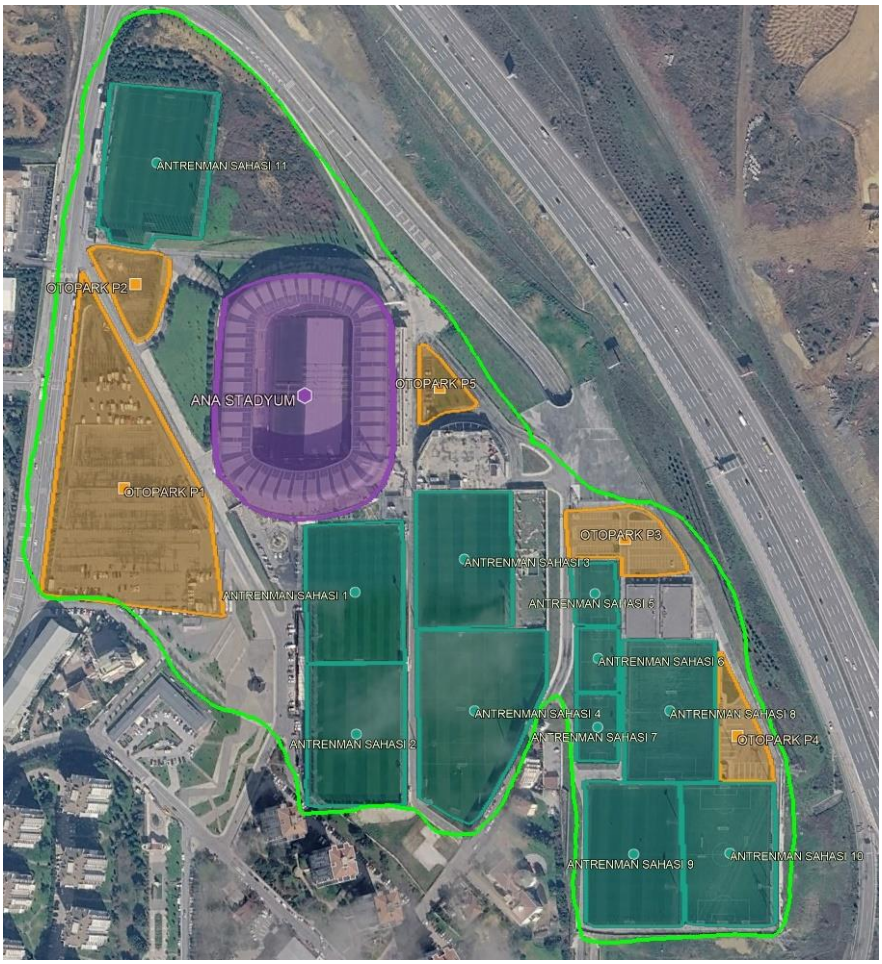
İklim değişikliği açısından değerlendirildiğinde, alternatif su kaynaklarının önemi yalnızca mevcut koşullarda sağlayabilecekleri su miktarıyla sınırlı değildir. Yağış miktarı, şiddeti, süresi ve yağışsız dönemlerin uzunluğunda meydana gelebilecek değişimler; çatı yağmur suyu hasadı, spor sahası drenajı ve yağmur bahçelerinden geri kazanılabilecek su miktarlarını farklı biçimlerde etkileyebilir. Bu nedenle alternatif su kaynaklarının mevcut hidrolojik koşullar altındaki davranışlarının belirlenmesi, gelecekteki iklim koşulları altında meydana gelebilecek değişimlerin değerlendirilebilmesi için gerekli bir referans durum oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, İstanbul Başakşehir Fatih Terim Stadyumu ve çevresindeki spor yerleşkesinde çatı yağmur suyu hasadı, spor sahası drenaj suyu ve yağmur bahçesi drenajının kuraklık ve iklim değişikliğine uyum kapsamında alternatif su kaynakları olarak potansiyelini EPA Storm Water Management Model (SWMM) ile değerlendirmek; farklı hidrolojik koşullar altında kaynakların su geri kazanım performanslarını ve zamansal davranışlarını karşılaştırmak ve elde edilen mevcut durum sonuçlarını gelecekteki iklim değişikliği senaryolarının değerlendirilmesinde kullanılacak hidrolojik çıktı olarak ortaya koymaktır.

2. Materyal ve yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı İstanbul'da bulunan Başakşehir Fatih Terim Stadyumu ve stadyum çevresindeki spor yerleşkesidir. Çalışma alanı Şekil 1'de gösterilmektedir. Stadyum yerleşkesi içerisinde çalışma kapsamında değerlendirilen başlıca yüzeyler; stadyum çatısı, spor sahaları ve açık otopark alanlarından oluşmaktadır. Stadyum çatısının toplam alanı 12.038 m^2 olup bunun 7.321 m^2'si cam, 4.717 m^2'si ise alüminyum yüzeydir. Ana saha ile birlikte 11 açık sahanın toplam yüzey alanı 82.233 m^2'dir. Yerleşkede bulunan beş açık otoparkın toplam alanı ise 32.848 m^2'dir. Yağış-akış, infiltrasyon ve drenaj özellikleri farklı olan bu yüzeyler modelde ayrı hidrolojik birimler olarak temsil edilmiştir.



Şekil 1. Başakşehir Fatih Terim Stadyumu yerleşkesi

Doğal ve sentetik spor sahaları, klasik kentsel geçirgen yüzeylerden farklı olarak kontrollü infiltrasyon ve drenaj sağlayan mühendislik katmanlarına sahip olduğundan; yüzey, depolama ve alt drenaj süreçlerini temsil edecek biçimde modellenmiştir [6].

2.2 SWMM Model Yapısı ve Alternatif Su Kaynakları

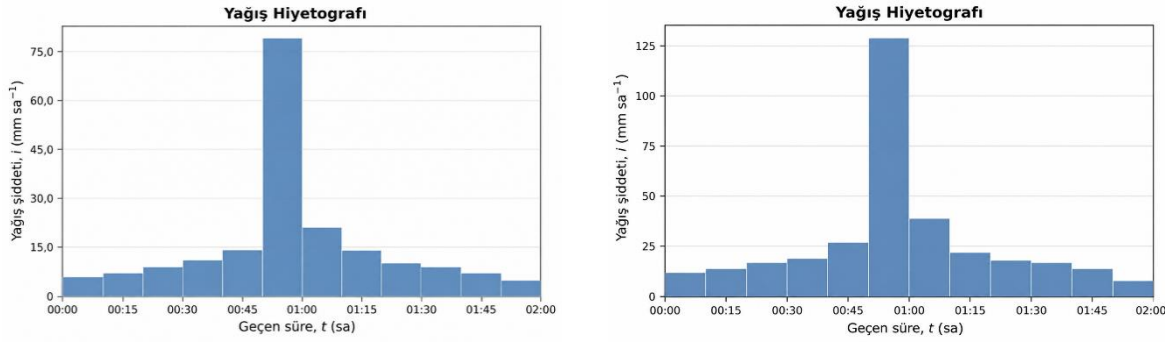
Yerleşkenin hidrolojik ve hidrolik davranışı EPA SWMM 5.2 kullanılarak modellenmiştir [8]. Stadyum çatıları, spor sahaları, otoparklar, yeşil alanlar ve sert zeminler farklı hidrolojik özelliklerine göre alt havzalara ayrılmış; yüzey ve infiltrasyon parametreleri tanımlanmıştır. Oluşan akışlar düğüm, boru, depolama ve çıkış elemanlarından oluşan drenaj ağı üzerinden dinamik dalga yaklaşımıyla yönlendirilmiştir.

Doğal ve sentetik spor sahaları ile yağmur bahçeleri, infiltrasyon, geçici depolama ve drenaj süreçlerinin zaman içerisinde temsil edilmesi amacıyla Düşük Etkili Kalkınma (Low Impact Development, LID)

bileşenleriyle tanımlanmıştır. Değerlendirmede üç alternatif su kaynağı esas alınmıştır: Stadyum çatılarından elde edilen yağmur suyu, spor sahalarından elde edilen drenaj suyu ve yağmur bahçelerinin alt drenajından elde edilen su. Bu bileşenler farklı uygulama alanlarını temsil eden konfigürasyonlarda incelenmiştir. Mevcut çalışma kapsamında, üç kaynağın birlikte bulunduğu konfigürasyon tercih edilmiş ve bunların birlikte sağlayabileceği potansiyeli karşılaştırılabilir biçimde göstermek amacıyla yorumlanmıştır.

2.3 Meteorolojik Veriler ve Tasarım Yağışları

Çalışma alanına ilişkin yağış girdilerinin oluşturulmasında 17636 kodlu Florya Meteoroloji İstasyonu esas alınmıştır. Kısa süreli hidrolojik tepkinin değerlendirilmesi için 5 ve 50 yıllık tekerrür sürelerine sahip, 120 dakika süreli tasarım yağışları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Florya Şiddet-Süre-Tekerrür (IDF) değerlerine göre 120 dakikalık ortalama yağış şiddeti 5 yıllık olay için 16 mm/saat, 50 yıllık olay için 28 mm/saat olup toplam yağış yükseklikleri sırasıyla 32 ve 56 mm'dir. Oluşturulan 5 ve 50 yıllık tasarım yağışlarının 10 dakikalık zamansal dağılımları Şekil 2'de verilmiştir.



a b

Şekil 2. 120 dakikalık tasarım yağışlarının zamansal dağılımı; a) 5 yıllık tekerrür süreli tasarım yağışı, b) 50 yıllık tekerrür süreli tasarım yağışı

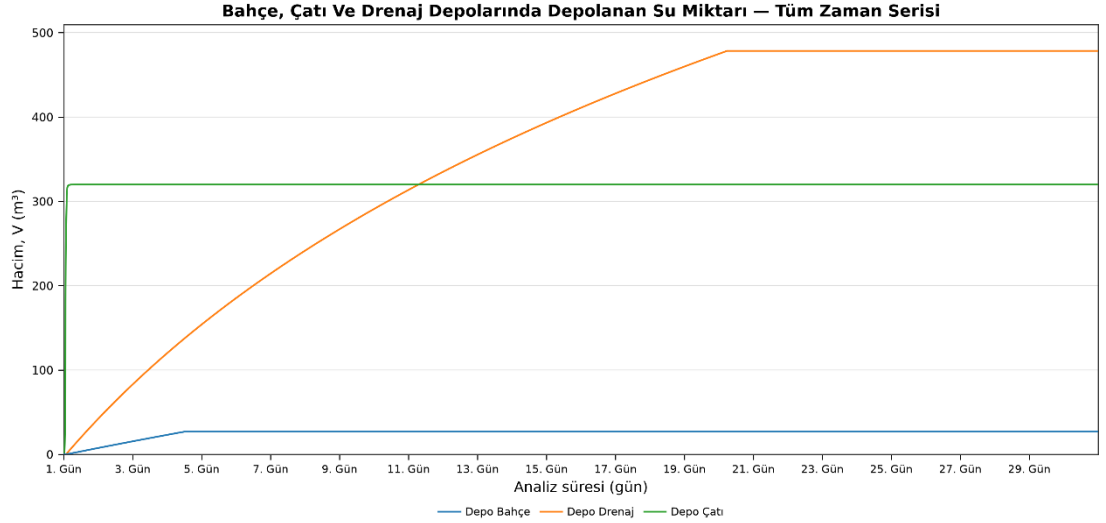
Tasarım yağışları 10 dakikalık zaman adımlarıyla oluşturulmuştur. Bu amaçla farklı sürelerdeki IDF şiddetlerinden kümülatif yağış yükseklikleri hesaplanmış, ardışık süreler arasındaki artımsal yağış blokları belirlenmiş ve Alternating Block yöntemiyle zaman serisi girdileri oluşturulmuştur. Elde edilen 10 dakikalık bloklarda en yüksek eşdeğer yağış şiddeti 5 yıllık yağış için 79 mm/saat, 50 yıllık yağış için 129 mm/saat olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sonraki aşamada kısa, orta ve uzak gelecek dönemler için oluşturulacak iklim değişikliği kaynaklı yağış serileriyle yapılacak SWMM analizlerinin karşılaştırılacağı mevcut iklim referansını oluşturmaktadır. Böylece iklim değişikliğine bağlı yağış karakteristiğindeki olası değişimlerin alternatif su kaynaklarının geri kazanım performansı üzerindeki etkisi nicel olarak değerlendirilebilecektir.

3. Değerlendirme

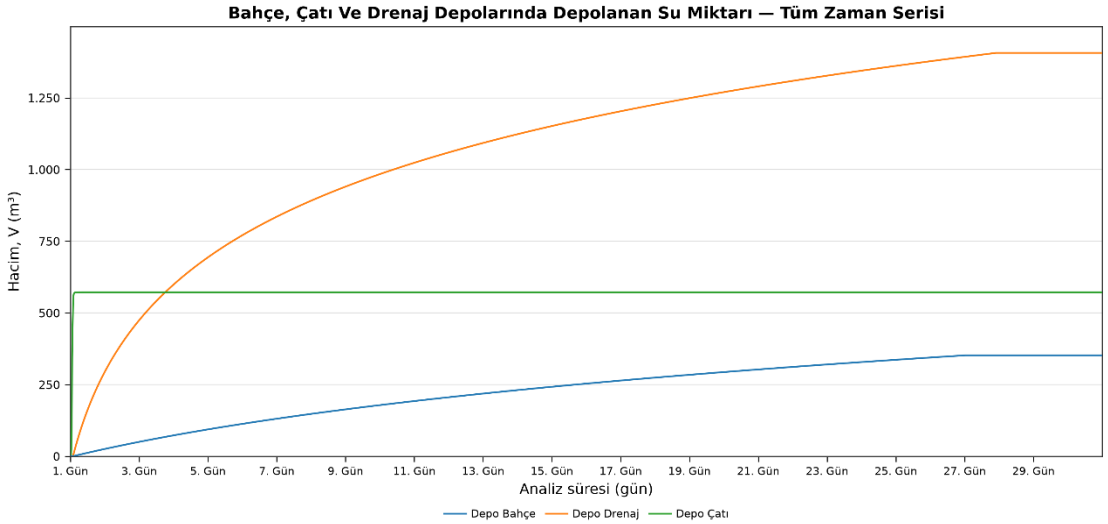
Alternatif su kaynaklarının uygulama alanlarının farklı olması, sistemlerin yalnızca toplam hacim üzerinden karşılaştırılmasının birim alan performansını doğrudan yansıtmamasına neden olmaktadır. Bu nedenle çatı yağmur suyu hasadı, spor sahası drenajı ve yağmur bahçesi drenajı için maksimum depolanan su hacimleri ilgili kaynak alanlarına oranlanarak L/m^2 cinsinden değerlendirilmiş; toplam hacimler ise stadyum ölçeğindeki alternatif su potansiyelini göstermek amacıyla ayrıca ele alınmıştır.

Alternatif su kaynaklarında depolanan su hacimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. 5 yıllık tekerrür süreli tasarım yağışında çatı deposu ilk gün içerisinde yaklaşık 320 m^3'e ulaşırken, spor sahası drenajı yaklaşık 20. günde 478 m^3'e, yağmur bahçesi drenajı ise yaklaşık 5. günde 27 m^3'e ulaşmıştır. 50 yıllık tekerrür süreli tasarım yağışında çatı deposunda ilk gün içerisinde 572 m^3 su depolanmış; spor sahası ve yağmur bahçesi drenajından elde edilen hacimler 27-28. güne kadar artarak sırasıyla 1407 ve 352 m^3'e ulaşmıştır. Bu sonuçlar, çatı akışının yağışa hızlı tepki verdiğini, spor sahası ve yağmur bahçesi drenajının ise infiltrasyon ve geçici depolama süreçleri nedeniyle zamana yayıldığını göstermektedir.

Farklı büyüklükteki tasarım yağışlarında elde edilen sonuçlar aynı zamanda alternatif su kaynaklarının yağış karakteristiğindeki değişimlere aynı düzeyde tepki vermediğini göstermektedir. Çatı yüzeyleri yağışa doğrudan ve hızlı tepki verirken, spor sahaları ve yağmur bahçelerinde infiltrasyon, geçici depolama ve alt drenaj süreçleri hidrolojik tepkiyi geciktirmektedir. Bu farklılık, iklim değişikliği sonucunda yağış şiddeti, süresi ve yağışlar arası kurak dönemlerde meydana gelebilecek değişimlerin her bir alternatif su kaynağını farklı biçimde etkileyebileceğini işaret etmektedir. Dolayısıyla iklim değişikliğine uyum stratejilerinde yalnızca toplam geri kazanılabilir su hacminin değil, suyun oluşma zamanı ve sürekliliğinin de dikkate alınması gerekmektedir.



a



b

Şekil 3. Çatı, spor sahası drenajı ve yağmur bahçesi drenajından elde edilen su hacimlerinin zamana bağlı değişimi: a) 5 yıllık, b) 50 yıllık tekerrür süreli tasarım yağışı.

Tablo 1. Tasarım yağışları altında alternatif su kaynaklarının birim alan geri kazanım potansiyeli

Tasarım yağışı	Toplam yağış (mm)	Çatı (L/m²)	Spor sahası drenajı (L/m²)	Yağmur bahçesi (L/m²)	Toplam potansiyel hacim (m³)
5 yıl	32	30,7	12,0	2,0	825
50 yıl	56	54,8	35,2	26,3	2331

Tablo 1'e göre birim alan başına en yüksek geri kazanım potansiyeli her iki tasarım yağışında da çatı yüzeylerinde elde edilmiştir. 5 yıllık tekerrür süreli tasarım yağışında çatı, spor sahası drenajı ve yağmur

bahçesi için sırasıyla 30,7, 12,0 ve 2,0 L/m^2; 50 yıllık tasarım yağışında ise 54,8, 35,2 ve 26,3 L/m^2 maksimum depolanan su hesaplanmıştır. Çatı yüzeylerinin geçirimsiz yapısı birim alan performansını artırırken, spor sahalarının geniş uygulama alanı toplam su potansiyelinde saha drenajını öne çıkarmaktadır. Dolayısıyla alternatif kaynakların değerlendirilmesinde birim alan performansı, toplam uygulama alanı ve hidrolojik tepki süresi birlikte dikkate alınmalıdır. Bu parametreler aynı zamanda iklim değişikliğine uyum açısından da önem taşımaktadır. Gelecekte yağışların miktarı kadar şiddeti ve zamansal dağılımının değişmesi durumunda, hızlı tepki veren çatı hasadı ile gecikmeli tepki veren spor sahası ve yağmur bahçesi drenajlarının sistem içerisindeki göreli katkılarının değişmesi beklenebilir. Bu nedenle alternatif kaynakların birlikte kullanılması, iklim kaynaklı hidrolojik değişkenliğe karşı daha dirençli bir su yönetimi yaklaşımı sağlayabilir.

4. Sonuçlar

Mevcut iklim koşullarını temsil eden hidrolojik referans analizleri, stadyumların yalnızca yüksek su tüketimine sahip tesisler olarak değil, aynı zamanda kuraklık ve iklim değişikliğine uyum kapsamında farklı alternatif su kaynakları oluşturabilecek sistemler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Beş yıllık tasarım yağışında toplam maksimum alternatif su hacmi 825 m^3, 50 yıllık tasarım yağışında ise 2331 m^3 olarak hesaplanmıştır. Birim alan bazında her iki yağışta da çatı yüzeyleri en yüksek geri kazanım potansiyelini gösterirken, geniş uygulama alanı nedeniyle toplam hacimde spor sahası drenajı öne çıkmıştır.

Bu sonuçlar, stadyumlarda sürdürülebilir su yönetiminde kaynakların yalnızca toplam hacimlerine göre değil, birim alan geri kazanım potansiyelleri ve hidrolojik davranışları birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Çatı, spor sahası drenajı ve yağmur bahçesi suyunun birlikte ele alınması, içme suyu kalitesi gerektirmeyen kullanımlarda şebeke suyuna bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlayabilecek bütünleşik bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte gerçek şebeke suyu ikamesinin belirlenebilmesi için su talebi, depolama işletmesi, su kalitesi ve gerekli arıtma süreçlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

İklim değişikliğine uyum açısından değerlendirildiğinde, sonuçlar alternatif su kaynaklarının birbirinden farklı hidrolojik tepki özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çatı yağmur suyu hasadı kısa süreli yağışlara hızlı cevap verirken, spor sahaları ve yağmur bahçeleri suyu daha uzun süre sistem içerisinde tutarak gecikmeli bir drenaj ve geri kazanım davranışı göstermektedir. Bu nedenle gelecekte yağış rejiminde meydana gelebilecek değişimlere karşı yalnızca tek bir alternatif su kaynağına dayalı sistemler yerine, farklı tepki sürelerine sahip kaynakların birlikte kullanıldığı bütünleşik sistemlerin değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışmada elde edilen mevcut durum sonuçları, gelecekte yürütülecek iklim değişikliği analizleri için referans oluşturmaktadır. Sonraki aşamada kısa, orta ve uzak gelecek dönemlere ait yağış serileri SWMM modeline entegre edilerek alternatif su kaynaklarının geri kazanım potansiyeli ve hidrolojik davranışındaki değişimler karşılaştırılacaktır. Bu kapsamda, iklim değişikliğinin spor tesislerinde alternatif su kaynaklarının kullanılabilirliği ve spor sahalarındaki sulama suyu talebi üzerindeki etkileri nicel olarak değerlendirilecek; elde edilen bulgular doğrultusunda iklim dirençli su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi hedeflenecektir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Programı kapsamında desteklenen 124Y276 numaralı “Spor Sahalarında İklim Değişikliği Koşulları Altında Sürdürülebilir Su Yönetimi: Akıllı Şehir-Akıllı Stadyum Konsepti” başlıklı proje kapsamında yürütülmüştür.

5. Kaynaklar

[1] IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896.

[2] IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844.

[3] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2022). Yağmur Suyu Hasadı: Rehber Dokümanı. Ankara.

[4] Burszta-Adamiak, E., Spychalski, P. (2021). Water savings and reduction of costs through the use of a dual water supply system in a sports facility. Sustainable Cities and Society, 66, 102620. doi: 10.1016/j.scs.2020.102620.

[5] Kesgin, E., Gezici, K. (2025). Innovative water management strategies for sports fields: A practical approach to sustainability. Environmental Research and Technology, 8(4), 928–940. doi: 10.35208/ert.1549699.

[6] Fei, Y., Zhao, Y., Fu, D., Chen, W. (2024). Structure and material of sports turf based on sponge-city concept: A combined experimental and numerical study. Case Studies in Construction Materials, 20, e03187. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03187.

[7] Weathers, M., Hathaway, J. M., Tirpak, R. A., Khojandi, A. (2023). Evaluating the impact of climate change on future bioretention performance across the contiguous United States. Journal of Hydrology, 616, 128771. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128771.

[8] Rossman, L. A., Simon, M. A. (2022). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2 (EPA/600/R-22/030). U.S. Environmental Protection Agency.