ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Technical Bulletin of DSI

SAYI: 148
YIL : Temmuz 2026



Keban Barajı-Elazığ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

YIL:2026 **SAYI: 148** **ISSN: 1012-0726**
E-ISSN: 1308-2477

İçindekiler

Teknik Not
Basınçlı Sulama Şebekelerinde Kullanılan HDPE 100 Borunun İrdelenmesi 9
Sinan T. SARIOĞLU

Araştırma Makalesi
WEAP Modeli ile İklim Değişikliği Senaryoları Çerçevesinde Solöz Deresi Akım Projeksiyonu Kalibrasyon Sonuçlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi 25
Bihter SEZER GÜNEY, Feza ÖRÜÇ

Araştırma Makalesi
Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) Makine Öğrenmesi Modeli ile Akım Tahmini: Filyos Havzası Örneği 34
Salih BABAGİRAY, Önder KARAGÖZ, Muhammet Bahattin AVCUOĞLU

Vaka Çalışması
Dolusavak Kanallarında Kavitasyon Riskini Azaltmaya Yönelik Mineral Katkılı Beton Tasarımı: Ilısu Barajı Örneği 48
Aydın SAĞLIK, İnan GÜNDÜZ, Hüseyin DEMİR

Vaka Çalışması
Tatarlı ve Aslanpınarı (Ceyhan-Osmaniye) Kaynaklarının Hidrojeolojik Özellikleri ve Oluşum Modeli.....75
Ziya BERKKAYA, Hilal DOKUZ, Uğur Erdem DOKUZ

Araştırma Makalesi
Türkiye'de Su Sorunu Haberlerinin Çerçevelenmesi: Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı Üzerinden Bir Okuma.....90
Özlem Tuğçe KELEŞ

Vaka Çalışması
Demirköprü Barajı Rezervuarı Yüzeyinde Yüzer Güneş Enerji Santralinin Kurulumunun Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği 103
Ali Osman ERTUĞRUL, Cemil ARSLAN

Derleme
Türkiye'de Tarımsal Sulamanın Tarihsel Gelişimi, Mevzuatı ve Kurumsal Yapısının Analizi 115
Erdem EROĞLU

TECHNICAL BULLETIN OF DSİ

YEAR: 2026 **ISSUE:148** **ISSN: 1012-0726**
E-ISSN: 1308-2477

Contents

Technical Note
Analysis of HDPE 100 Pipe Used in Pressurized Irrigation Networks 9
Sinan T. SARIOĞLU

Research Article
Comparative Evaluation of the Calibration Results of Solöz Creek Streamflow Projections under Climate Change Scenarios Using the WEAP Model 25
Bihter SEZER GÜNEY, Feza ÖRÜÇ

Research Article
Flow Forecasting Using a Long Short-Term Memory (LSTM) Machine Learning Model: Filyos Basin Example 34
Salih BABAGİRAY, Önder KARAGÖZ, Muhammet Bahattin AVCUOĞLU

Case Study
Mineral Admixture-Based Concrete Design for Mitigating Cavitation Risk in Spillway Chutes: A Study of the Ilısu Dam.....48
Aydın SAĞLIK, İnan GÜNDÜZ, Hüseyin DEMİR

Case Study
Hydrogeological Characteristics and Conceptual Model of Tatarlı and Aslanpınarı (Ceyhan-Osmaniye) Springs 75
Ziya BERKKAYA, Hilal DOKUZ, Uğur Erdem DOKUZ

Research Article
Framing Water Issue News in Türkiye: A Reading Through Rogers' Diffusion of Innovations Theory 90
Özlem Tuğçe KELEŞ

Case Study
Technical and Economic Feasibility of Installing a Floating Solar Power Plant on the Demirköprü Dam Reservoir 103
Ali Osman ERTUĞRUL, Cemil ARSLAN

Review
An Analysis of the Historical Development, Legislation, and Institutional Structure of Agricultural Irrigation in Türkiye.....115
Erdem EROĞLU

DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ Adına Yayın Sahibi
Genel Müdür
Mehmet Akif BALTA

Yayın Kurulu
Başkan
Dinçer AYDOĞAN — DSİ Genel Müdürlüğü
Baş Editör
Prof. Dr. Levent KURNAZ — Boğaziçi Üniversitesi
Baş Editör Yardımcıları
Dr. Mehmet YAKUT — DSİ Genel Müdürlüğü
Hüseyin DEMİR — DSİ Genel Müdürlüğü
Üyeler
Dr. Ayhan KOÇBAY — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Bahattin AVCUOĞLU — DSİ Genel Müdürlüğü
İsmail SEVİM — DSİ Genel Müdürlüğü
Aydın SAĞLIK — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Bülent Çağlar ÖZCAN — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Murat Ali HATİPOĞLU — DSİ Genel Müdürlüğü
Nesrin ÖZBEK — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Nermin DOĞAN — DSİ Genel Müdürlüğü
Prof. Dr. Cem AVCI — Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ — Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Tuğrul YILMAZ — Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Arda ŞORMAN — Eskişehir Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aynur Şensoy ŞORMAN — Eskişehir Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Hülya BOYACIOĞLU — Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Emre ALP — Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ — Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU — Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN — Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Özgür ANIL — Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Nejan Huvaj SARIHAN — Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ayşen DAVRAZ — Süleyman Demirel Üniversitesi
Doç. Dr. Kıymet Deniz YAĞCIOĞLU — Ankara Üniversitesi
Doç. Dr. Enes ZENGİN — İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Ing. İsmail ALBAYRAK — Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü (ETH Zürih)
Dr. Özgen KÖKTEN — Temelsu Muhendislik
Yasin ENGİN — Türkiye Hazır Beton Birliği

Yabancı Dil Editörü
Işık Su YAZICI — Alman Havacılık ve Uzay Merkesi (DLR)

Yönetim Yeri Adresi
DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı
Saray Osmangazi Mah. Alparslan Türkeş Cad. No:6 Pursaklar/Ankara Türkiye
Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 454 38 05
bulten@dsi.gov.tr
bultendsi@gmail.com

Basıldığı Yer
Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube Müdürlüğü
Etlik- Ankara

Yayın Türü
Yaygın süreli yayın
Altı ayda bir yayınlanır. (Ocak, Temmuz)

SAYI : 148
YIL : TEMMUZ 2026

ISSN
1012 - 0726 (Basılı)
1308 - 2477 (e-ISNN)

© Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Owner of the Publication on behalf of GENERAL DIRECTORATE OF STATE HYDRAULIC WORKS
General Director
Mehmet Akif BALTA

Editorial Board

Chairman	
Dinçer AYDOĞAN	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Editor-in-Chief	
Prof. Dr. Levent KURNAZ	Boğaziçi Üniversitesi
Associate Editor-in-Chief	
Dr. Mehmet YAKUT	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Hüseyin DEMİR	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Members	
Dr. Ayhan KOÇBAY	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Dr. Bahattin AVCUOĞLU	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
İsmail SEVİM	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Aydın SAĞLIK	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Dr. Bülent Çağlar ÖZCAN	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Dr. Murat Ali HATİPOĞLU	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Nesrin ÖZBEK	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Dr. Nermin DOĞAN	General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ)
Prof. Dr. Cem AVCI	Boğaziçi University
Prof. Dr. Mehmet EKMEKÇİ	Hacettepe University
Prof. Dr. Tuğrul YILMAZ	Middle East Technical University
Doç. Dr. Arda ŞORMAN	Eskisehir Technical University
Prof. Dr. Aynur ŞENSOY ŞORMAN	Eskisehir Technical University
Prof. Dr. Hülya BOYACIOĞLU	Dokuz Eylul University
Doç. Dr. Emre ALP	Middle East Technical University
Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ	Ankara University
Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU	Necmettin Erbakan University
Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN	Gazi University
Prof. Dr. Özgür ANIL	Gazi University
Doç. Dr. Nejan Huvaj SARIHAN	Middle East Technical University
Prof. Dr. Ayşen DAVRAZ	Süleyman Demirel University
Doç. Dr. Kıymet Deniz YAĞCIOĞLU	Ankara University
Doç. Dr. Enes ZENGİN	Istanbul Technical University
Dr. Ing. İsmail ALBAYRAK	Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Dr. Özgen KÖKTEN	Temelsu Engineering and Consulting
Yasin ENGİN	Turkish Ready Mixed Concrete Association

Language Editor

Işık Su Yazıcı	German Aerospace Center

Management Address
DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı
Saray Osmangazi Mah. Alparslan Türkeş Cad. No:6 Pursaklar/Ankara TURKEY
Tel (312) 454 38 00
Fax (312) 454 38 05
bulten@dsi.gov.tr
bultendsi@gmail.com

Place of Publication
Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı
Basım ve Foto Film Şube Müdürlüğü
Etlik- Ankara

Publication Type
Periodical
Published semi-annually (January, July)

ISSUE :148
YEAR : JULY 2026

ISSN
1012- 0726 (Print)
1308- 2477 (e-ISSN)

© Open Access and Copyright: All articles published in the Technical Bulletin of DSİ are fully open access; they are freely available to read, download, and share immediately upon publication. All articles are published under the Creative Commons Attribution–NonCommercial–NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license. This license permits non-commercial sharing of the work provided that appropriate credit is given; however, it does not allow any modifications to the work. Copyright of any article published in the Technical Bulletin of DSİ is retained by the author(s).

DSİ Teknik Bülteni Amaç ve Kapsam

Amaç: Su kaynaklarının korunması, geliştirilmesi, yönetimi ve sürdürülebilir kullanımı ile ilgili konulardaki araştırmaları, uygulamaları ve bilimsel gelişmeleri; DSİ'nin tüm birimlerine, ilgili kamu kurum ve kuruluşlarına ve ilgili kişilere duyurmak ve tanıtmaktır. Bu amaç doğrultusunda DSİ Teknik Bülteni, su kaynakları araştırmaları ve uygulamalarına ilişkin bilgi alışverişini, yenilikçi çözümlerin ve uygulama deneyimlerinin paylaşımını teşvik ederek akademisyenler, teknik personel ve mühendisler, araştırmacılar ve karar vericiler arasındaki iş birliğini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Kapsam: DSİ Teknik Bülteni, inşaat, jeoloji, malzeme, ziraat, çevre, doğa ve yer bilimleri gibi farklı fen ve mühendislik dallarının çalışma alanlarının ilgili konularındaki geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Daha önce başka bir yerde yayınlanmamış olmak koşulu ile DSİ Teknik Bülten'inde yer alabilecek başlıca yayın konuları şunlardır:

- **Barajlar ve göletler:** Barajların ve göletlerin tasarımı, inşaatı, işletilmesi, güvenliği ve kalite kontrol faaliyetleri ile ilgili teknik makaleler,
- **Su yönetimi, sulama projeleri ve sulama alanındaki yenilikler:** Su mühendisliği ve sulama alanındaki yeni teknolojiler, ürünler ve uygulamalar ile birlikte sulama projelerinin planlanması, tasarımı, inşaatı ve işletmesi ile ilgili makaleler,
- **Taşkın ve kuraklık yönetimi:** Taşkınların ve kuraklığın tahmini, modellenmesi, değerlendirilmesi, önlenmesi ve yönetimi, afet risk azaltımı, iklim değişikliğine uyum ve dirençli su sistemleri ile ilgili makaleler,
- **Su yapıları:** Su kanalları, regülatörler, kapalı ve açık sistem akımları, atık su ve içme suyu arıtma sistemleri, pompa istasyonları ve diğer su yapılarının planlanması, tasarımı, inşaatı ve işletmesi ile ilgili makaleler,
- **Kıyı yapıları:** Deniz, göl veya nehir kıyılarında inşa edilen ve su kütlesi ile kara arasındaki etkileşimi yöneten yapıların tasarımı, inşaatı ile ilgili makaleler,
- **Sediment hareketi:** Nehirlerde ve göllerde doğal malzeme hareketleri, erozyon ve oyulma, rezervuarlarda sediment birikmesinin önlenmesi ile ilgili makaleler,
- **Doğal ve yapay yapı malzemeleri:** Beton, agrega, çimento, kaya, zemin, termoplastik, kompozit ve çelik borular, metalik malzemeler, polimer ve kompozit malzemeler ve geosentetik malzemelerle ilgili deneysel, teorik veya uygulamaya yönelik çalışmaları içeren makaleler,
- **Zemin ve kaya mekaniği:** Zeminlerin ve kayaların mühendislik özellikleri ve davranışları, bu özelliklerde zamana bağlı olarak meydana gelen değişikliklerin incelenmesi ve gelişen sorunların çözümü ile ilgili makalelerle birlikte, DSİ tarafından yürütülen hizmetlerde zemin ve kaya mekaniği alanında karşılaşılan sorunlara ait çözüm ve araştırmaları içeren makaleler,
- **Su kaynakları yönetimi:** Su kaynaklarının planlanması, geliştirilmesi, izlenmesi, yönetimi, tahsisi, kullanımı ve korunması ve iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkilerinin araştırılması, dijital teknolojiler, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri, yapay zeka, dijital ikiz ve sayısal modelleme gibi su kaynakları yönetiminde uygulanan yenilikçi teknolojiler ile ilgili makaleler,
- **Hidrolojik ve hidrojeolojik etüt ve araştırmalar:** Su kaynakları ile ilgili hidrolojik ve hidrojeolojik çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan izotop, uzaktan algılama, modelleme gibi teknolojiler ile ilgili makaleler,
- **Su kalitesi:** Su kaynaklarının kalitesinin izlenmesi, belirlenmesi, yerüstü ve yeraltı su kaynaklarının kalite ve miktar durumlarının korunması ve iyileştirilmesi ve su analiz yöntemleri ile ilgili deney metotları geliştirme konularında makaleler,
- **Su kalitesi modelleri ve tahminleri:** Su kalitesinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi amacıyla yapılan modellemeler, iklim değişikliğinin su kalitesi ve miktarı üzerindeki etkileri ile ilgili makaleler,
- **Su kirliliği:** Su kirliliğinin araştırılması, önlenmesi ve kontrolü ile ilgili makaleler,
- **Su güvenliği ve su politikaları:** Su güvenliği, sınır aşan sular, suyla ilgili uluslararası süreçler ve kurumlar, su yönetiminin kurumsal yapılanması, su hukuku ve mevzuatı ve su politikalarına ilişkin araştırmalar, vaka çalışmaları, su konularının medyada temsili, iklim iletişimi, kamuoyu algısı ve su yönetiminin sosyal ve ekonomik boyutlarına ilişkin çalışmalar,
- **Kalite-kontrol mühendisliği ve kalite yönetimi**: Organizasyonlarda kalite yönetim sistemi ile ilgili makaleler ve sürdürülebilir inşaat teknolojileri ve yapı malzemeleri, yenilenebilir inşaat malzemeleri, inşaat malzemelerinin kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülmesi, yapıların zaman içerisindeki değişimlerinin malzeme kalitesi açısından incelenmesi, yapıların davranışlarının ve yapısal bütünlüklerinin depreme ya da diğer yıkıcı etkilere karşı izlenmesi ile ilgili makaleler.

Yayın türleri: DSİ Teknik Bülteni'nde özgün araştırma makalesi, vaka çalışması, teknik not, kısa bildiri, bilimsel görüş ve derleme türlerinde yayın yapılmaktadır.

Sorumluluk reddi: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan makalelerin içeriğinden yazarlar sorumludur. DSİ Genel Müdürlüğü ve derginin herhangi bir kurulu, yayımlanan makalelerde yer alan görüş, düşünce ve görsellerden sorumlu tutulamaz. Bu yayınlarda ifade edilen görüşler, DSİ Genel Müdürlüğü'nün resmî görüşlerini yansıtmaz. "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" ile ilgili mevzuat hükümlerinin ihlalinden doğabilecek tüm hukuki sorumluluklar tamamen yazarlara aittir.

Technical Bulletin of DSİ: Aim and Scope

Purposes: The Technical Bulletin of DSİ aims to advance the dissemination of scientific knowledge, engineering practices, and technological innovations related to the protection, development, management, and sustainable use of water resources. The Bulletin serves as a platform for sharing research findings, technical expertise, and practical experience with professionals within the General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ) as well as researchers, practitioners, policymakers, and other stakeholders engaged in water resources and hydraulic engineering.

The Bulletin is committed to fostering collaboration among researchers, academics, engineers, technical professionals, and decision-makers by promoting the exchange of knowledge, innovative solutions, and practical experience that contribute to the sustainable management of water resources.

Scope: The Technical Bulletin of DSİ covers a broad range of topics within the fields of engineering and applied sciences, including civil, geological, materials, agricultural and environmental engineering, natural sciences, and earth sciences. Provided that they have not been published elsewhere, the principal subject areas considered for publication in the Technical Bulletin of DSİ include, but are not limited to, the following:

- **Dams and reservoirs:** Planning, design, construction, operation, maintenance, rehabilitation, and safety of dams, reservoirs, irrigation systems, water conveyance structures, hydraulic structures, and other water infrastructure;
- **Water management, irrigation projects and innovations in irrigation:** Planning, design, construction, and operation of irrigation projects, as well as emerging technologies, products, and applications in water engineering and irrigation,
- **Flood and Drought Management:** Forecasting, modeling, assessment, mitigation, and management of floods and droughts, disaster risk reduction, climate change adaptation and resilience of water systems,
- **Hydraulic Structures:** Planning, design, construction, and operation of water conveyance canals, diversion weirs, open-channel and closed-conduit flow systems, drinking water and wastewater treatment systems, pumping stations, and other hydraulic structures,
- **Coastal Structures:** Design and construction of structures built along coastlines, lakeshores, and riverbanks to manage the interaction between water bodies and adjacent land,
- **Sediment Transport:** Articles on sediment transport processes in rivers and lakes, erosion and scour, and the prevention of sediment accumulation in reservoirs,
- **Natural and Engineered Construction Materials:** Experimental, theoretical, or applied research on concrete, aggregates, cement, rock, soil, thermoplastics, composite and steel pipes, metallic materials, polymer and composite materials, and geosynthetic materials,
- **Soil and Rock Mechanics:** Engineering properties and behavior of soils and rocks, the investigation of time-dependent changes in these properties, and solutions to related engineering challenges, including technical studies addressing soil and rock mechanics issues encountered in projects undertaken by the General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ),
- **Water Resources Management:** Planning, development, monitoring, management, allocation, utilization, and protection of water resources, investigation of the impacts of climate change on water resources, digital technologies, remote sensing, geographic information systems (GIS), artificial intelligence, digital twins, numerical models and other innovative tools supporting water resources management,
- **Hydrological and Hydrogeological Studies:** Hydrological and hydrogeological investigations related to water resources, including the application of technologies such as isotope techniques, remote sensing, and numerical modeling,
- **Water Quality:** Monitoring and assessment of water quality, protection and improvement of the quality and quantity status of surface water and groundwater resources, and the development of experimental methods for water quality analysis,
- **Water Quality Modelling and Prediction:** Water quality modelling for the assessment and improvement of water quality, as well as studies examining the impacts of climate change on water quality and water availability,
- **Water Pollution:** Investigation, prevention, and control of water pollution,
- **Water Security and Water Policy:** Water governance, water security, transboundary waters, water-related international processes and institutions, institutional structure of water management, water law and legislation, and water policy, as well as studies on media representation of water-related issues, climate communication, public perception, and the social and economic dimensions of water resources management,
- **Quality Control Engineering and Quality Management:** Quality management systems in organizations, sustainable construction technologies and building materials, renewable construction materials, end-of-life recycling of construction materials, assessment of the long-term performance of structures from a materials quality perspective, and monitoring the behavior and structural integrity of infrastructure against earthquakes and other destructive hazards.

Publication Types: The Technical Bulletin of DSİ publishes original research articles, case studies, technical notes, short communications, opinion papers, and review articles.

Disclaimer: The authors bear full responsibility for the content of the articles published in the Technical Bulletin of DSİ. Neither the General Directorate of DSİ nor any board of the journal shall be held responsible for the opinions, views, or visuals presented in the published articles. The views expressed in these publications do not reflect the official position of the General Directorate of DSİ. Any legal liability arising from violations of the provisions of the "By-Law on Scientific Research and Publication Ethics of Higher Education Institutions" and related legislation rests entirely with the authors.

DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
DSİ TEKNİK BÜLTENİ
Editörden

Suyu Yeniden Düşünmek: Bültenimizin Yeni Yolculuğu

Değerli okuyucularımız,

DSİ Teknik Bülteni'nin baş editörlüğünü üstlendiğim bu ilk sayıyı sizlerle paylaşmaktan büyük bir memnuniyet duyuyorum. Uzun yıllardır ülkemizin su mühendisliği birikimini kayıt altına alan, saha deneyimini bilimsel yazıya döken ve kurumsal hafızamızın en önemli taşıyıcılarından biri olan bu yayına emek veren herkese; önceki editörlerimize, yazarlarımıza ve hakemlerimize öncelikle teşekkür borçluyum. Bugün üstlendiğim sorumluluk, bu birikimin üzerine inşa edilecek yeni bir dönemin sorumluluğudur.

Bu ilk sayıdan itibaren, sizlere bültenimizin nereye doğru evrileceğini anlatmak istiyorum.

Bilimsel Titizlikte Yeni Bir Eşik

Önceliğimiz, dergimizin bilimsel niteliğini uluslararası standartlara taşımaktır. Bu doğrultuda hakem değerlendirme süreçlerini daha bağımsız ve şeffaf bir yapıya kavuşturuyoruz; çıkar çatışması ihtimali taşıyan durumları somut ve doğrulanabilir ölçütlerle titizlikle gözetiyoruz; değerlendirme raporlarını içerik derinliği açısından ayrıca inceliyoruz. Yakın zamanda oluşturduğumuz Yayın Kurulu, bu sürecin kurumsal güvencesi olacak; makalelerin ön değerlendirmesinden hakem seçimine, metodolojik tartışmalardan yayın politikasına kadar pek çok aşamada kolektif bir akıl ile çalışacağız. Amacımız, DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan her makalenin, alanındaki en yüksek bilimsel ölçütleri karşıladığından emin olmaktır.

Suyu Çok Boyutlu Bir Mesele Olarak Ele Almak

Bültenimiz bugüne kadar haklı olarak hidrolik yapılar, su mühendisliği uygulamaları ve teknik projeler eksenli bir yayın çizgisi izlemiştir; bu birikim korunacak ve güçlendirilecektir. Ancak su, yalnızca bir mühendislik meselesi değildir. Su, toplumların nasıl yönetildiğinin, hangi politikaların benimsendiğinin, iklim değişikliğinin nasıl algılandığının ve kamuoyuna nasıl anlatıldığının da bir aynasıdır. Bir barajın, bir taşkının ya da bir kuraklığın hikâyesi; mühendislik hesaplarıyla başlar ama toplumsal kabul, medya temsili ve kamu algısıyla tamamlanır.

Bu nedenle dergimizin kapsamını, su politikaları, iklim iletişimi, su sorunlarının medyada temsili ve su yönetiminin toplumsal boyutları gibi disiplinlerarası alanları da içerecek şekilde genişletiyoruz. Bu sayıda yer alan, bir iletişim uzmanının kaleme aldığı yazı, bu yeni yönün ilk somut adımı ve bir tür "pilot uygulama" niteliğindedir. Amacımız, mühendislik odaklı ciddiyetimizden ödün vermeden, suyun toplumsal boyutlarını da tartışabilen, daha kapsayıcı bir platform inşa etmektir.

Önümüzdeki Dönem

Önümüzdeki sayılarda, hem klasik su mühendisliği çalışmalarına hem de yukarıda özetlediğim yeni tematik alanlara daha fazla yer vermeyi planlıyoruz. Yazarlarımızı, yalnızca teknik çözümlerini değil, bu çözümlerin toplumsal, kurumsal ve iletişimsel bağlamını da ele alan çalışmalarla dergimize katkı sunmaya davet ediyorum. Hakemlerimizden ve Yayın Kurulu üyelerimizden beklentim, bu yeni ve geniş ufuklu vizyonu titiz bir bilimsel bakışla desteklemeleridir.

DSİ Teknik Bülteni'ni, ülkemizin su alanındaki birikimini hem mühendislik hem de toplumsal boyutlarıyla ele alan, güçlü, güvenilir ve öncü bir bilimsel yayın hâline getirme yolunda attığımız bu ilk adımda, sizlerin de bu yolculuğa eşlik edeceğine inanıyorum.

Saygılarımla,

Prof. Dr. M. Levent Kurnaz
Baş Editör, DSİ Teknik Bülteni

Basınçlı Sulama Şebekelerinde Kullanılan HDPE 100 Borunun İrdelenmesi

Analysis of HDPE 100 Pipe Used in Pressurized Irrigation Networks

Sinan T. SARIOĞLU[1]*

[1]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: sinant@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 17.11.2025, Düzeltme (Revised): 28.04.2026, Kabul (Accepted): 05.05.2026

ÖZ

Bu çalışmada, basınçlı sulama şebekelerinde yaygın olarak kullanılan HDPE 100 boruların saha performansı ve boru hammaddesinin kalitesinin sistem güvenilirliğine etkisi incelenmiştir. Çalışmada, farklı projelerde işletme sırasında kırılma, patlama, boyuna çatlama ve ek yerlerinden ayrılma gibi arızalar gözlenen boru numuneleri teknik saha incelemesine tabi tutulmuştur. Bulgular, düşük kaliteli veya standart dışı hammadde kullanılarak üretilen boruların standart testleri ilk aşamada geçseler dahi uzun vadede mekanik dayanım kaybına ve yapısal arızalara yol açabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, PE100+ Association üyesi firmalardan temin edilen belgelenmiş hammadde ile üretilen borular, hem mekanik dayanım hem de saha performansı açısından daha güvenilir bulunmuştur. Çalışma, boru hammaddesinin kalitesinin izlenmesi, üretim sonrası bağımsız ve akredite laboratuvar testlerinin yapılması ve belgelenmiş tedarikçinin seçilmesinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, sulama projelerinde PE boruların mekanik dayanıklılığını güvence altına alarak saha uygulamalarında patlama, çatlama ve ayrışma gibi sorunları önlemeye, ayrıca üretim sürecinde kalite sürekliliği ve şeffaflığı sağlayarak, idare, yüklenici ve üretici arasında güvene dayalı bir denetim mekanizması oluşturmaya ve sistem performansını artırmaya katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: HDPE 100 boru, basınçlı sulama şebekeleri, boru dayanımı, boru hammaddesi kalitesi, PE 100 Derneği, saha testleri, boru arızaları

ABSTRACT

In this study, the field performance of HDPE 100 pipes, which are commonly used in pressurized irrigation networks, and the effect of pipe raw material quality on system reliability were investigated. In the study, pipe samples that showed failures such as breakage, bursting, longitudinal cracking, and separation at joint locations during operation in different projects were subjected to technical field examination. The findings show that pipes produced with low-quality or non-standard raw materials can lead to long-term loss of mechanical strength and structural failures, even if they pass short-term factory tests. In contrast, pipes produced using certified raw materials obtained from companies that are members of the PE100+ Association were found to be more reliable in terms of both mechanical strength and field performance. The study reveals that monitoring the quality of pipe raw materials, conducting independent and accredited laboratory tests after production, and selecting certified suppliers are critical. This approach contributes to ensuring the mechanical durability of PE pipes used in irrigation projects, preventing problems such as bursting, cracking, and separation in field applications, and also ensures continuity and transparency in the production process, creating a trust-based control mechanism among authorities, contractors, and manufacturers, thereby improving system performance.

Keywords: HDPE 100 pipes, pressurized irrigation networks, pipe durability, pipe material quality, PE 100 Association, field tests, pipe failures

1 Giriş

Ülkemizde artan nüfus ve buna bağlı olarak yükselen gıda ihtiyacı, tarımsal üretimin sürdürülebilir biçimde artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, özellikle su kaynaklarının etkin ve verimli kullanımını gerektiren sulama sistemlerinin önemini daha da artırmaktadır. Küresel ölçekte su kaynaklarının sınırlı olması ve iklim değişikliğinin etkileri, sulama sistemlerinde su kayıplarının azaltılmasını ve yüksek verimli sistemlerin tercih edilmesini gerekli kılmaktadır.

Sulama projelerinde yatırım maliyetlerinin önemli bir kısmını suyun iletimi ve dağıtımını sağlayan altyapı sistemleri oluşturmaktadır. Bu kapsamda, iletim ve dağıtım hatlarının hidrolik performansı, dayanımı ve işletme güvenilirliği, projenin genel başarısını doğrudan etkilemektedir. Özellikle geniş sulama alanlarında ve uzun iletim hatlarında sistem bileşenlerinin uygun şekilde seçilmesi, hem yatırım hem de işletme maliyetleri açısından kritik öneme sahiptir (Mays, 2010).

Geçmişte daha yaygın olarak kullanılan açık kanal sistemleri ve düşük basınçlı borulu sulama şebekeleri, buharlaşma, sızma ve işletme zorlukları gibi nedenlerle önemli su kayıplarına yol açmıştır. Bu nedenle günümüzde, suyun kontrollü ve basınçlı olarak iletilmesini sağlayan kapalı sistemler ön plana çıkmaktadır (Hoffman vd., 2007). Basınçlı sulama şebekelerinde kullanılan boru malzemesinin türü ve özellikleri topografya, zemin koşulları, işletme basıncı ve ekonomik faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir.

Son yıllarda yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) borular, esneklikleri, darbe dayanımları, korozyona karşı dirençleri ve montaj kolaylıkları nedeniyle sulama ve altyapı projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle HDPE 100 sınıfı borular, yüksek basınç dayanımı ve uzun servis ömrü ile öne çıkmaktadır (Plastics Pipe Institute, 2009; International Organization for Standardization, 2017). Bununla birlikte, uygulamada karşılaşılan boru arızalarının yalnızca tasarım ve montaj hatalarından değil, aynı zamanda hammadde kalitesi ve üretim süreçlerindeki farklılıklardan da kaynaklanabileceği belirtilmektedir (American Water Works Association, 2020).

Basınçlı sulama projelerinde boru maliyetlerinin toplam yatırım içerisindeki payının %65–75 seviyelerinde olduğu dikkate alındığında, boru performansı hem teknik hem de ekonomik açıdan belirleyici bir unsur haline gelmektedir. Bu nedenle sahada kullanılan boruların uzun dönem performanslarının incelenmesi ve arıza nedenlerinin ortaya konulması, sistem güvenilirliğinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Rajput, 2012).

Bu çalışmanın amacı, saha koşullarında arızalanmış HDPE 100 boruların performansını değerlendirmek ve boru hammaddesi kalitesinin sistem güvenilirliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktır.

2 Materyal ve Metot

Bu çalışma, kontrollü ve tekrarlı laboratuvar deneylerinden ziyade, basınçlı sulama şebekelerinde işletme sürecinde hasar meydana gelmiş HDPE 100 boruların saha kaynaklı teknik incelemesine dayanmaktadır. İnceleme kapsamındaki boru numuneleri, farklı projelerde işletme sırasında kırılma, patlama veya kaynak ayrışması gibi gözlenen hatlardan alınmış olup, numune seçimi rastgele değil, hasar oluşmuş bölgeleri temsil edecek şekilde yapılmıştır. Bu nedenle çalışmada klasik anlamda deney tekrarı veya istatistiksel dağılım analizi yerine, elde edilen deney sonuçlarının ilgili ulusal ve uluslararası standartlarda tanımlanan sınır değerlerle karşılaştırmalı değerlendirilmesi esas alınmıştır.

Polietilen Borunun Genel Özellikleri

Polietilen, üretimi büyük ölçüde petrole bağlı olan ve düşük, orta ve yüksek yoğunluklu olmak üzere genellikle 3 ana grupta sınıflandırılan bir polimerdir. Plastik malzemesinde meydana gelen gelişmelerle birlikte plastik boru kullanımı ve üretimi giderek yaygınlaşmakta, mühendislik problemleri açısından boruların önemi de artmaktadır. Boruların davranışları üretildiği malzemenin davranışlarına bağlı olmaktadır. Plastik borularda gerilme altında zamana bağlı deformasyon görülebildiğinden döşenip işletmeye alındıklarında da özellikle uygun hammadde kullanılmaması durumunda mekanik ve fiziksel özelliklerinde olumsuz yönde ciddi değişimler olabilmektedir.

PE borular, tek bir hammadde ile üretildikleri için homojen bir yapıya sahiptir. Bu durum, borunun tüm yapısal ve fiziksel özelliklerinin tek bir malzemenin davranışına bağlı olmasını sağlar. Buna karşılık, çelik borular sulama şebekelerinde iç yüzeyi epoksi, dış yüzeyi ise polietilen (PE) kaplama ile kullanılmakta olup, çok katmanlı bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Cam Takviyeli Polyester (CTP) borular ise cam elyafı ve silika kumu gibi birden fazla bileşenden oluşur ve bu nedenle heterojen bir yapıya sahiptir. Bu farklılıklar, boru malzemelerinin mekanik özellikleri, dayanım performansları ve kullanım alanları açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır.

Polietilen Boruların Anma Basınçları ve Sınıflandırılması

HDPE borular genel itibariyle PN (bar); 4, 6, 8, 10, 12,5, 16, 20, 25 anma basınçlarında üretilmektedirler. Polietilen boru ve ek parça üretiminde kullanılan hammaddeler Minimum Required Strength-Minimum Gerekli Mukavemet (MRS) ile sınıflandırılır. MRS, malzemenin 20°C de 50 yıl süre ile iç basınca gösterdiği mukavemet değeri olup hammadde sınıfına bağlı MRS değerleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Hammadde sınıfına bağlı MRS değerleri

Hammadde Sınıfı	MRS (Mpa) Değeri
PE32	3,2
PE40	4,0
PE63	6,3
PE80	8,0
PE100	10

TS EN 12201-2'ye göre MRS Sınıfı verilmiş malzemenin 20° C'de PN, Boru serisi (S) ve Standart Dimention Ratio-Standart Boyut Oranı (SDR), (nominal dış çapın nominal ek kalınlığına oranı) değerleri arasındaki bağlantılar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. HDPE 100 boru çeşitleri

SDR (Standart Boyut Oranı)	S (Boru Serisi)	PE 100 (PN, bar)
26	12,5	6
21	10	8
17	8	10
13,6	6,3	12,5
11	5	16
9	4	20
7,4	3,2	25

HDPE 100 Boru ve Hammaddesi

PE borular hasarsız düşey deformasyon gösteren plastik boru sınıfına girmektedir. Boru üzerine etkiyen toprak tepe yükü borunun yan yataklaması ile dengelenir. Tasarım şartı, maksimum müsaade edilir ovallik ve maksimum müsaade edilir eğilme gerilmesi olarak belirlenmiştir (Yılmaz, 2009).

HDPE 100 borular, yüksek mekanik dayanım ve uzun ömürlü kullanım için geliştirilmiş polietilen borulardır. Boruların performansı büyük ölçüde kullanılan hammaddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Özellikle basınçlı sulama şebekelerinde, boruların patlama, çatlama veya kaynak ayrışması gibi arızalara karşı dayanıklı olması kritik öneme sahiptir.

PE 100 hammaddesi, yüksek gerilme mukavemeti ve güvenlik katsayısı ile öne çıkar. Aynı SDR oranına sahip PE 80 boruların izin verilen çalışma basıncı 10 bar iken, PE 100 borularda bu değer 16 bar'a kadar çıkabilmektedir. Bu sayede, daha ince et kalınlığı ile yüksek basınç altında güvenli kullanım sağlanmaktadır.

Boru kalitesini belirleyen temel faktör, kullanılan hammaddeye ait belgeli ve standarda uygun üretimdir. PE 100 Derneği'ne üye üreticilerden temin edilen hammaddelerin kullanımı, kalite sürekliliği ve güvenilirliği açısından kritik önemdedir. Saha deneyimleri, yüksek kaliteli hammaddeden üretilmiş boruların uzun süreli performans sağlarken, düşük kaliteli hammaddelerle üretilen borularda kısa süre sonra mekanik arızalar meydana geldiğini göstermektedir.

PE Boru Üretiminde Düşük Kaliteli Hammadde Kullanımının Nedenleri

Polietilen borular, belirli kalite ve standartlara uygun olmayan, düşük kaliteli hammadde kullanılarak da üretilebilmektedir. Bu durumun temel nedenleri arasında; uluslararası standartlara uygun yüksek kaliteli hammaddenin büyük ölçüde yurt dışından temin edilmesi ve buna bağlı olarak döviz kurlarına endeksli yüksek maliyetler, sektörde faaliyet gösteren PE boru üreticisi firma sayısının sınırlı olması, yükleniciler ile üreticiler arasındaki ticari anlaşma koşulları, üretim sürecinin görece kolaylığı, piyasa koşullarındaki yoğun rekabet ve benzeri ekonomik ve yapısal etkenlerin olduğu söylenebilir.

Bu bağlamda, bazı üretici firmalar maliyet avantajı elde edebilmek amacıyla, kalite açısından yetersiz ancak ekonomik bakımdan daha düşük maliyetli hammaddeye yönelebilmektedir. Bu durum özellikle

denetim mekanizmalarının yeterli düzeyde işletilmediği veya etkin biçimde uygulanmadığı koşullarda daha sık ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak, kurumsal bir üretim yapısına sahip olmalarına rağmen bazı üretici firmalar, piyasa koşullarına uyum sağlamak ve rekabet avantajı elde etmek amacıyla zaman zaman düşük kaliteli hammaddeye yönelebilmektedir. Bu tür hammaddeyle üretilen PE borular, ilk testleri geçebilse dahi, saha koşullarında kullanım sonrasında çatlama, kırılma ve ek yerlerinde ayrılma gibi ciddi yapısal arızalara neden olabilmektedir. Bu durum, uzun vadede sistem güvenliğini olumsuz etkileyerek sulama projesinin sürdürülebilirliğini riske atmaktadır.

3 Tartışma

Bu bölümde, sulama şebekelerinde kullanılan PE esaslı borular üzerinde gerçekleştirilen deneysel incelemeler sonucunda elde edilen bulgular sunulmakta; söz konusu bulgular, saha koşulları ve ilgili standartlarda tanımlanan kabul kriterleri çerçevesinde değerlendirilerek borularda meydana gelen hasarların olası nedenleri irdelenmektedir.

Sunulan deney sonuçları, tekil ölçümler olarak değil, standartlarda tanımlanan kabul kriterlerini sağlayıp sağlamadığının tespiti amacıyla değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle saha kaynaklı hasarların nedenlerinin belirlenmesine yönelik teknik incelemelerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Döşenmiş PE Borularda Oluşan Hasarlar

Sulama şebekesini oluşturan boru hatları, zemin hareketleri, trafik yükleri gibi dış etkilere karşı dayanım sağlamak ve donma riskine maruz kalmamak amacıyla, yeterli derinlikte ve mümkün olduğunca tabii zemin eğimine paralel şekilde projelendirilmektedir. Bu yaklaşım, hem sistemin uzun ömürlü çalışmasını hem de bakım gereksinimlerinin en aza indirilmesini hedeflemektedir.

Üretimi tamamlanmış ve ilgili kalite kontrol testlerinden başarıyla geçmiş olan PE esaslı basınçlı borular, sahada uygun yöntemlerle döşendikten sonra işletmeye alınmaktadır. Ancak, tüm üretim ve montaj aşamalarında ilgili standartların öngördüğü sınır değerlere uygunluk göstermesine rağmen, bazı durumlarda boruların döşendikten sonraki 1-2 yıl içerisinde kırıldığına ilişkin bulgulara rastlanabilmektedir. Şekil 1'de, döşenmiş PE borularda kırılmaya ait bir örnek yer almaktadır.



Şekil 1. Döşenmiş bir PE boruda oluşan kırılma

Bu tür borularda gözlemlenen kırılma ve deformasyonların nedenlerini değerlendirebilmek amacıyla, kurulan borulardan numune alarak üzerinde çeşitli testlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle erime akış hızı (MFR), karbon siyahı miktarı ve dağılımı, yükseltgenme indüksiyon süresi (OIT) gibi testler ile borunun hammadde özelliklerinin detaylı biçimde incelenmesi önem arz etmektedir. Bu örnekte boru numunesi üzerinde erime akış hızı, yükseltgenme indüksiyon süresi ve kopma uzaması testleri yapılmıştır.

Üretimi tamamlanan PE esaslı borular, üretim sahasında yapılan muayene ve deneylerde ilgili standartların öngördüğü sınır değerlere uygunluk göstermiştir. Bununla birlikte, boruların döşenmesini takiben geçen belirli bir sürenin ardından sulama şebekesinde meydana gelen arızalar nedeniyle, sorunlu bölgelerden alınan boru numuneleri tarafsız ve akredite bir laboratuvara gönderilmiş, burada gerçekleştirilen testler neticesinde numunelerin, Tablo 3'de görüleceği üzere, standartların öngördüğü sınır değerleri sağlamadığını göstermiştir. Bu durum, borularda zaman içerisinde malzeme özelliklerinde bozulma meydana geldiğine işaret etmektedir.

Tablo 3. Döşenmiş boru üzerinde yapılan testler

Numune No	Deney	Standarda Göre Olması Gereken Değer	Deney Sonucu	Açıklama
1	Kopma uzaması	Min. %350	%119,29	Uygun Değil
1	Erime Akış Hızı	0,2-1,4 gr/10 dk	1,55 gr/10 dk	Uygun Değil
2	Kopma uzaması	Min. %350	%51,22	Uygun Değil
2	Erime Akış Hızı	0,2-1,4 gr/10 dk	188 gr/10 dk	Uygun Değil
2	Yükseltgenme İndüks. süresi	>20 dk.	1,6 dk	Uygun Değil

Döşeme sonrasında kırılma problemi gözlemlenen boruya ait Tablo 3'te sunulan test sonuçları incelendiğinde, özellikle erime akış hızı başta olmak üzere, borunun üretiminde kullanılan hammaddede birtakım sorunların bulunduğu anlaşılmaktadır. Üretim sürecinde, maliyeti düşürmek amacıyla boru hammaddesine standart dışı ve farklı nitelikte malzemelerin ilave edilmesi, boru yapısında süreksizliklerin, zayıf bölgelerin ve kesitlerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum, boruların zaman içerisinde mekanik özelliklerinde değişimlere neden olmakta, iç ve dış basınçlara, basınç değişimlerine karşı yapının homojen davranışını zayıflatmaktadır. Sonuç olarak, borularda çatlama, kırılma ya da ek yerlerinden ayrılma gibi yapısal bozulmalar meydana gelmekte ve borular işlevlerini kısmen ya da tamamen yitirebilmektedir.

PE Borularda Uygulanan Temel Testlerin Hammadde ile İlişkisinin Değerlendirmesi

Polietilen (PE) boruların uzun dönem performansı, yalnızca nihai ürün geometrisi ve üretim parametreleriyle değil, aynı zamanda kullanılan hammaddenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda PE borular üzerinde uygulanan temel kalite testleri, borunun standartlara uygunluğunun yanı sıra kullanılan hammaddenin niteliği hakkında da dolaylı fakat güçlü göstergeler sunmaktadır. Bu çalışmada, PE borularda yaygın olarak uygulanan yükseltgenme indüksiyon süresi (OIT), kopma uzaması, karbon siyahı içeriği ve erime akış hızı (MFR) testleri, hammadde ilişkisi perspektifinden değerlendirilmiştir.

3.1 Yükseltgenme İndüksiyon Süresi

Yükseltgenme indüksiyon süresi (OIT), polietilen esaslı malzemelerin oksidatif bozunmaya karşı direncini belirlemede kullanılan temel termal analiz yöntemlerinden biridir. Bu testte numune, yaklaşık 200 °C sıcaklıkta inert atmosferden oksijen atmosferine geçilerek izlenir ve oksidasyonun başladığı noktaya kadar geçen süre ölçülür. OIT değerinin 20 dakikanın üzerinde olması, malzemenin yeterli antioksidan içeriğine ve termal stabiliteye sahip olduğunu göstermektedir.

OIT değerinin standart alt sınırın altında olması, özellikle alın kaynağı ve elektrofüzyon kaynağı gibi 200-220 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen birleştirme işlemleri sırasında kritik sonuçlar doğurabilmektedir. Yetersiz oksidatif direnç, kaynak bölgesinde zincir kopmaları ve moleküler bozulmalara yol açarak, başlangıçta görünmeyen ancak servis süresi boyunca ilerleyen ayrılma ve kopma risklerini artırmaktadır. Bu durum, genellikle düşük kaliteli veya yetersiz stabilize edilmiş hammaddelerin kullanımına işaret etmektedir.

3.2 Kopma Uzaması

Kopma uzaması, PE boruların mekanik sünekliğini ve moleküler yapı bütünlüğünü değerlendirmede kritik bir parametredir. Çekme deneyi kapsamında ölçülen bu değer, polimer zincirlerinin yük altında ne ölçüde yönlenebildiğini ve kopmadan önce ne kadar deformasyona izin verdiğini göstermektedir.

Standartlarda belirtilen minimum kopma uzaması değerinin altında kalan numuneler, genellikle daha gevrek bir yapıya sahip olup bu durum düşük molekül ağırlığı, uygunsuz katkı kullanımı veya malzeme homojenliğinin sağlanamaması ile ilişkilendirilmektedir. Bu tür borular kısa vadede standart testleri geçebilse dahi, uzun dönem iç basınç dayanımı ve çevresel gerilme çatlağı direnci (ESCR) açısından risk taşımaktadır.

Buna karşılık, kopma uzaması değerinin standartların üzerinde olması ve diğer mekanik özelliklerle uyumlu sonuçlar vermesi, kullanılan hammaddenin moleküler yapı açısından yeterli kaliteye sahip olduğunun önemli bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

3.3 Karbon siyahı içeriği

Polietilen esaslı boruların UV ışınlarına karşı dayanımının artırılmasında karbon siyahı (KS) önemli bir katkı maddesidir. Bu katkı, UV direncinin yanı sıra boruların mekanik ve yapısal özellikleri üzerinde de etkili olmaktadır.

İlgili standartlara göre KS içeriğinin %2–%2,5 aralığında olması gerekmektedir. Bu aralık, UV dayanımının sağlanmasına ve kopma uzaması gibi mekanik özelliklerin standart sınırlar içinde kalmasına olanak tanımaktadır. İçeriğin %2'nin altında olması UV korumasını yetersiz kılarken, %2,5'in üzerine çıkması katkının polietilen matrisi içinde homojen dağılmasını zorlaştırarak esneklik kaybına ve lokal yapısal kusurlara yol açabilmektedir.

Katkı miktarı kadar, polimer matris içerisindeki dağılım homojenliği de kritik öneme sahiptir. Yetersiz dispersiyon, mekanik yük altındaki bölgelerde gerilme yığılmalarına neden olur ve bu durum çatlama ile kırılma riskini artırır.

Uygulamada boruların toprak altında kullanılacağı gerekçesiyle UV dayanımının önemsiz olduğu düşünülse de, karbon siyahı içeriği yalnızca UV direnciyle değil, aynı zamanda kullanılan hammaddenin kalitesiyle de ilişkilidir. TS EN 12201 (ISO 4427) standardında tanımlanan, ISO 6964 ve ISO 18553'e göre belirlenen uygun oran ve homojen dağılım, nitelikli hammadde ve kontrollü üretimin göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

İçerik miktarı ve dağılımı standart dışı bulunan ürünlerde, bu durumun üretim aşamasında sonradan yapılan katkılardan ziyade, başlangıçta uygun olmayan hammadde kullanımından kaynaklanmış olabileceği ihtimali ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle elde edilen analiz sonuçlarının, diğer mekanik ve fiziksel test bulguları ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu katkı maddesinin miktarı ve dağılım homojenliği, polietilen boruların uzun dönem performansı ve dayanıklılığı açısından belirleyici bir parametredir. Bu nedenle ilgili standartlara uygunluğun sağlanması büyük önem taşımaktadır.

3.4 Erime Akış Hızı (MFR) ve Hammadde-Boru Uyumunun Değerlendirilmesi

Erime akış hızı (MFR), termoplastik malzemelerin reolojik davranışını ve dolaylı olarak molekül ağırlığını tanımlayan temel bir parametredir. PE borular için MFR testi, 190 °C sıcaklık ve 5 kg yük altında gerçekleştirilmekte olup, standartlara göre elde edilen değerin 0,2–1,4 g/10 dk aralığında olması beklenmektedir.

Boru üretiminde kullanıldığı beyan edilen hammaddeden de aynı test koşullarında MFR ölçümü yapılmalı ve elde edilen sonuçlar ilgili standartlar doğrultusunda karşılaştırılmalıdır. TS 418-1 EN 12201-1 standardına göre, hammadde ile üretilmiş boru numunesi arasındaki erime akış hızı (MFR) sapmasının belirli sınırlar içerisinde olması gerekmektedir.

Bununla birlikte, DSİ PE teknik şartnamesi kapsamında boru ve üretiminde kullanılan hammaddeye ait MFR testleri ayrı ayrı yapılması ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir. İlgili şartnameye göre, bu iki değer arasındaki farkın ±%10'u aşması durumunda borular uygunsuz olarak değerlendirilmektedir. Bu daha sıkı kabul kriteri, hammadde ile nihai ürün arasındaki uyumun daha hassas şekilde denetlenmesini sağlayarak boru performansının ve uzun vadeli dayanımının güvence altına alınmasına katkı sağlamaktadır.

Bu nedenle MFR testi, yalnızca bir kalite kontrol aracı olmanın ötesinde, teknik şartnamelerde yer alması sayesinde idare açısından önemli bir doğrulama mekanizması işlevi görmektedir. Yüklenicinin, boru üretiminde kullanılan hammaddeden numune temin ederek idareye sunma yükümlülüğü, üretim zincirinin şeffaflığı açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan testlerin her biri, tek başına değerlendirildiğinde sınırlı bilgi sunmakla birlikte, birlikte yorumlandıklarında PE borularda kullanılan hammaddenin kalitesi, uygunluğu ve uzun dönem performans potansiyeli hakkında bütüncül bir değerlendirme yapılmasına olanak tanıdığından, kalite kontrol süreçlerinde bu testlerin entegre bir yaklaşımla ele alınması ve sonuçların standartlar çerçevesinde yorumlanması büyük önem taşımaktadır.

Fabrika Testleri ve Akredite Laboratuvar Sonuçları Işığında Boru Yeterliliğinin Değerlendirilmesi

Polietilen (PE) boru üretimi yapan firma sayısı, son yıllarda gelişen altyapı yatırımları ve piyasa talebindeki büyümeyle birlikte önemli ölçüde artmıştır. Bu artış, rekabet açısından olumlu bir tablo çizmekle birlikte, kalite denetim süreçlerinin eş zamanlı olarak güçlendirilmemesi durumunda, üretilen boruların performans sürekliliği bakımından çeşitli belirsizlikler doğurabilmektedir. Literatürde, üretici firmaların yalnızca kendi tesislerinde gerçekleştirdiği deney ve testlere dayalı değerlendirmelerin, özellikle yüksek ömür ve güvenilirlik beklentisi olan basınçlı boru sistemlerinde tek başına yeterli bir

kalite güvence mekanizması olarak kabul edilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır (American Water Works Association, 2006).

Ürün kalitesinin doğru biçimde değerlendirilmesi, üretici laboratuvarlarının teknik donanımı, ölçüm yetkinliği ve bağımsızlığı ile doğrudan ilişkilidir. Ancak çeşitli akademik çalışmalar ve uygulama raporları, bazı üretici laboratuvarlarının akreditasyon süreçlerini tamamlamamış olabildiğini ya da akredite olsalar bile ölçüm tarafsızlığını pratikte sürdüremeye bildiğini ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, deney cihazlarının kalibrasyonunun süreklilik arz etmemesi veya ölçümlerin izlenebilirliğinin yeterince sağlanamaması, test sonuçlarının güvenilirliğini azaltan önemli faktörler arasında değerlendirilmektedir (International Organization for Standardization, 2017; International Organization for Standardization, 2015a).

Saha gözlemleri ve literatürde yer alan değerlendirmeler, bazı durumlarda kalite kontrol süreçlerinin standartların öngördüğü çerçevenin dışına çıkabildiğine işaret etmektedir. ISO/IEC 17025 standardı, laboratuvar faaliyetlerinin tarafsızlık, tanımlanmış yöntemlere uygunluk ve sonuçların geçerliliğinin izlenmesi ilkeleri çerçevesinde yürütülmesini zorunlu kılmakta, bu ilkelerin ihlali durumunda test sonuçlarının güvenilirliğinin önemli ölçüde zayıflayacağını belirtmektedir ((International Organization for Standardization, 2017). Örneğin, PE boruların malzeme karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan erime akış hızı (MFR) testinde, sıcaklık ve yük gibi deney değişkenlerinin küçük sapmalar göstermesi dahi ölçüm sonuçlarında anlamlı farklılıklara yol açabilmektedir. Bu durum, testin standartta tanımlanan koşullara tam olarak uyulmadan gerçekleştirilmesi halinde, elde edilen verilerin malzemenin gerçek davranışını yansıtma kabiliyetini sınırlayabilmektedir (European Committee for Standardization, 2011).

Benzer bir durum, PE boruların oksidatif yaşlanmaya karşı direncinin değerlendirilmesinde kullanılan oksidasyon indüksiyon süresi (OIT) testleri için de geçerlidir. Test ortamındaki gaz bileşimi veya oksijen konsantrasyonunda meydana gelebilecek değişikliklerin, ölçülen OIT değerlerini doğrudan etkileyebildiği bilinmektedir. Bu nedenle, standart dışı test koşullarında elde edilen sonuçların, malzemenin uzun dönem servis ömrüne ilişkin güvenilir öngörüler sunma konusunda sınırlı kalabileceği literatürde vurgulanmaktadır (International Organization for Standardization, 2025; Frank vd., 2019).

Bu tür belirsizlikler, test raporlarında uygun olarak değerlendirilen ancak gerçek kullanım koşulları altında beklenen performansı sergileyemeyen PE boruların sahada yer almasına zemin hazırlayabilmektedir. Yapılan deneysel ve analitik çalışmalarda, malzeme özellikleri yeterince kontrol edilmemiş boruların uzun süreli iç basınç ve çevresel etkiler altında daha erken hasar geliştirme eğiliminde olduğu, çatlak oluşumu, gevrek kırılma veya bağlantı bölgelerinde ayrılma gibi arızaların daha yüksek sıklıkla gözlemlenebildiği rapor edilmiştir (Wang vd., 2024; Yadollahi & Piratla, 2025). Bu durum, laboratuvar ölçekli uygunluk testlerinin, AWWA gibi standart kuruluşların belirlediği kriterleri sağlamasına rağmen, saha koşullarındaki uzun dönem davranışı her zaman tam olarak temsil edemeyebileceğini ve malzeme karakterizasyonunun servis ömrü değerlendirmelerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir (American Water Works Association, 2018).

Bu çerçevede, PE boruların kabul süreçlerinin yalnızca üretici tarafından sunulan fabrika test raporlarına dayandırılması, güncel kalite güvence yaklaşımları açısından yeterli görülmemektedir. Nitekim, İdare tarafından yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, üretici beyanına dayalı test sonuçlarının tek başına kabul edilmesi yerine, bu sonuçların bağımsız doğrulama mekanizmalarıyla desteklenmesi gerekliliği ortaya konmuştur. Bu kapsamda, teknik şartnamede yapılan düzenleme ile üretim sonrasında rastgele yöntemlerle seçilen boru numunelerinin üreticiden tamamen bağımsız ve akredite laboratuvarlarda yeniden test edilmesi zorunlu hale getirilmektedir. Bu uygulama, kalite güvencesinin güçlendirilmesine yönelik etkili bir yöntem olup, ulusal ve uluslararası standartlarda tanımlanan kalite kontrol prensipleriyle de uyumludur. Böylece, boruların şantiyeye sevk edilmesinden önce teknik uygunluklarının objektif ve tarafsız biçimde doğrulanması mümkün olmaktadır ((International Organization for Standardization, 2017; European Committee for Standardization, 2011).

DSİ projelerinde kullanılacak borular, fabrika uygunluğu bulunan firmalardan temin edilmekte olup şartnamede öngörülen deneylerin tamamını akredite ve tarafsız kuruluşlar aracılığıyla gerçekleştirmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu kapsamda, akreditasyon şartlarını sağlamayan üreticilere uygunluk verilmemektedir.

DSİ PE teknik şartnamesinde yapılan değişiklik ile boru kabul sürecinde üretici tesislerinde yerinde muayene yapılmamakta, bunun yerine sahadan alınan boru numuneleri DSİ pilot bölge laboratuvarlarına veya üreticiden bağımsız akredite laboratuvarlara gönderilerek test edilmektedir. Uygunluk değerlendirmesi bu bağımsız test sonuçlarına göre yapılmakta olup, bu yaklaşım ölçüm güvenilirliğini ve tarafsızlığı temin ederek kalite güvencesi sisteminin temelini oluşturmaktadır.

HDPE 100 Boru Üretiminde Hammaddenin Önemi

HDPE 100 boruların üretiminde hammadde kalitesi, borunun saha performansı için belirleyici bir faktördür. Düşük kaliteli veya geri kazanılmış malzeme kullanımı, saha koşullarında çatlama, kırılma ve ek yerlerinden ayrılma gibi sorunlara yol açabilmektedir.

Boru üretiminde kritik parametreler arasında erime akış hızı, karbon siyahı miktarı ve dağılımı ile oksidasyon indüksiyon süresi testleri yer alır. Bu testler, kullanılan hammaddenin uygunluğunu değerlendirmek ve üretici beyanlarının doğruluğunu teyit etmek amacıyla uygulanır. Tarafsız ve akredite laboratuvarlarda gerçekleştirilen analizler, boruların gerçek performansının güvenilir ve doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanır.

Ayrıca, boruların üretiminde PE 100 Derneği'ne üye üreticilerden temin edilen belgeli hammaddelerin kullanılması, kalite güvence mekanizmasının etkin şekilde uygulanmasına katkıda bulunur. Bu yaklaşım, sulama projelerinde boru arızalarının önlenmesine ve sistemin uzun ömürlü çalışmasına doğrudan katkı sağlar.

PE Boru ve Hammaddesi Üzerinde Yapılan Erime Akış Hızı ve Karbon Siyahı Miktarı Deneylerine Ait Örnek

Kapalı basınçlı borulu sistem olarak projelendirilerek işletmeye alınan bir sulama şebekesinde, zamanla PE borularda meydana gelen patlamalar nedeniyle, sahada döşenmiş borulardan numuneler alınmış ve bu numuneler üzerinde çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir.

Erime Akış Hızı Deneyi:

Bu kapsamda, boruların ve üretiminde kullanıldığı beyan edilen hammaddenin erime akış hızı değerleri, tarafsız ve akredite bir laboratuvar ortamında belirlenmiş, sonuçlar sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 4. Hammadde üzerinde yapılan erime akış hızı deney sonucu

Numune	İstenen Özellik	Birimi	Erime Akış Hızı (Test sonucu)	Değerlendirme
Hammadde	0,2-1,4	g/10 dk.	0,30	Uygun

Tablo 5. Boru üzerinde yapılan erime akış hızı deney sonuçları

Numune	İstenen Özellik	Birimi	Erime Akış Hızı (Test sonucu)	Değerlendirme
1	Hammadde değ. +-%20	g/10 dk.	0,64	Uygun değil
2	Hammadde değ. +-%20	g/10 dk.	0,65	Uygun değil

PE boruların üretiminde kullanılan hammaddenin erime akış hızı (Vh) ile nihai ürün olan boruların erime akış hızı (Vb) değerleri, TS 418-1 EN 12201-1 standardına göre, bu iki değer arasında aşağıdaki bağıntı (1)'i sağlanmalıdır:

$$Vh - 0{,}20Vh < Vb < Vh + 0{,}20Vh \quad (1)$$

Yani boru malzemesinin erime akış hızı, kullanılan hammaddenin erime akış hızına göre ±%20 (değişen şartname öncesi) tolerans aralığında olmalıdır.

Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneylerde:

- Hammadde erime akış hızı (Vh): 0,30 g/10 dk olarak ölçülmüş olup, bu değer TS 418-1 EN 12201-1 standardında belirtilen 0,2–1,4 g/10 dk. aralığında yer aldığından, hammaddenin uygun olduğu değerlendirilmiştir.
- Boru erime akış hızı (Vb): 0,64 g/10 dk olarak belirlenmiştir. Bu değerin, kullanılan hammaddeye ait üst limit bağıntısının (2);

$$Vh + 0{,}20Vh = 0{,}30 + 0{,}06 = 0{,}36Vh \quad (2)$$

oldukça üzerinde, %213 ve %217 oranında olduğu tespit edilmiş olup sonuçlar Tablo 6' da sunulmaktadır.

Tablo 6. Boru erime akış hızı ile hammadde erime akış hızının mukayese sonuçları

Numune	İstenen Özellik	Birimi	Erime Akış Hızı (Test sonucu)	Sonuçlar %
1	Hammadde değ. +-%20	g/10 dk.	0,64	213
2	Hammadde değ. +-%20	g/10 dk.	0,65	217

Elde edilen sonuçlar, boru malzemesinin reolojik özelliklerinin, beyan edilen hammaddeye ait karakteristik değerlerle uyumlu olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Literatürde, termoplastik boru sistemlerinde erime akış hızının, polimerin molekül ağırlığı, molekül ağırlığı dağılımı ve kullanılan katkı maddeleri ile doğrudan ilişkili olduğu, bu parametrede meydana gelen yüksek oranlı sapmaların, genellikle malzeme bileşiminde değişiklik veya farklı hammadde kullanımına işaret ettiği belirtilmektedir (Peacock, 2000).

Bu bağlamda, gözlenen önemli sapma;

- Boruların, teknik şartnamede veya üretici beyanında belirtilen hammadde dışında farklı bir polimer malzeme kullanılarak üretilmiş olabileceği,
- Üretimde fiilen kullanılan hammadde ile İdare'ye bildirilen hammadde arasında farklılık bulunabileceği,
- Üretim sürecinde, ana hammaddeye ilave olarak katkı maddeleri, geri dönüşüm malzemeleri veya ikincil polimerlerin kullanılmış olabileceği,

ihtimallerini gündeme getirmektedir.

Değerlendirme ve Öneriler

Bu tespitler ışığında, boruların belirtilen standarda uygun hammaddeden üretilmediği ya da beyan edilen hammaddenin üretimde gerçekte kullanılmadığı sonucuna varmak mümkündür.

Bu tür uyumsuzlukların önlenebilmesi amacıyla, PE boru teknik şartnamesinin yanında, sözleşme eki özel teknik şartnamelerde aşağıdaki hususlara açık ve bağlayıcı şekilde yer verilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir:

- Yüklenicinin, boru üreticisi ile yapacağı anlaşmalar kapsamında, üretimde kullanılacak hammaddeye ait teknik veri föylerini (erime akış hızı, yoğunluk, minimum gerekli mukavemet sınıfı vb.) İdare'ye sunma zorunluluğunun açıkça tanımlanması,
- İdare tarafından gerekli görülmesi halinde, üretim sahasında kullanılan hammaddeden numune alınarak ilgili standartlara uygun deneylerin yapılabileceğine ilişkin hükümlerin açıkça yer alması.

Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca nihai ürün olan borunun değil, aynı zamanda boru üretiminde kullanılan hammaddenin de denetim altına alınması mümkün olacaktır. Boru ve hammadde arasında yapılacak deneysel karşılaştırmalar ile malzeme uygunluğunun daha güvenilir ve izlenebilir bir şekilde değerlendirilmesi sağlanabilecektir. Böylece, boru–hammadde ilişkisine dayalı kalite kontrol mekanizması güçlendirilmiş olacak ve standarda uygunluk daha etkin biçimde teminat altına alınacaktır.

Karbon Siyahı Miktarının Belirlenmesi

Polietilen boru sistemlerinde karbon siyahı miktarının belirlenmesi, borunun dış ortam koşullarına, özellikle ultraviyole (UV) ışınımına karşı dayanımının ve uzun süreli performansının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Karbon siyahı, polietilen matrisi içerisinde UV ışınlarını absorbe ederek polimer zincirlerinin bozunmasını geciktirmekte ve borunun servis ömrünü uzatmaktadır (Peacock, 2000; Brydson, 1999).

Bu örnekte, PE100 sınıfı DN110×6,6 PN10 siyah renkli boru numunesi üzerinde karbon siyahı miktarı tayini gerçekleştirilmiştir. Deney, poliolefin borular için karbon siyahı oranının belirlenmesine yönelik uluslararası bir yöntem olan ISO 6964 standardına uygun olarak uygulanmıştır (International Organization for Standardization, 2019b). Elde edilen deney sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Karbon siyahı miktarının tespiti

Numune	Test Standardı	Deney Adı	İstenen Özellik	Birimi	Sonuç
PE100, DN110x6.6 PN10 Siyah renk	ISO 6964	Karbon Siyahı Oranı	2-2,5	%	0,02

Tablo 7 incelendiğinde, numunede tespit edilen karbon siyahı oranının %0,02 olduğu görülmektedir. Bu değer, ilgili standartlarda ve literatürde PE100 borular için önerilen %2–2,5 aralığının oldukça altında kalmaktadır. ISO 6964 ve EN 12201 standartlarına göre polietilen borularda karbon siyahı miktarının bu aralıkta olması, borunun dış ortam koşullarına, özellikle güneş ışığı kaynaklı ultraviyole (UV) radyasyona karşı yeterli dayanımı gösterebilmesi açısından zorunludur.

Literatürde yapılan çalışmalar, karbon siyahı oranının yetersiz olması durumunda borularda erken yaşlanma, gevrekleşme, çatlak oluşumu ve mekanik özelliklerde hızlı bozulma gibi olumsuzlukların ortaya çıktığını göstermektedir (Peacock, 2000). Ayrıca karbon siyahı, polimer matris içerisinde UV ışınlarını absorbe ederek zincir kopmalarını azaltmakta ve borunun servis ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır.

Bu bağlamda, elde edilen deney sonucu, incelenen boru numunesinde kullanılan hammaddenin karbon siyahı içeriği bakımından standart gereklerini karşılamadığını ve dolayısıyla uzun süreli kullanım açısından uygun olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Söz konusu düşük karbon siyahı oranı, üretim aşamasında hammadde seçimi veya katkı maddesi dozajında ciddi bir uygunsuzluğa işaret etmektedir.

PE Borularda Gözlenen Yapısal ve Alın Kaynaklı Birleşim Problemlerinin İncelenmesi-Örnek

PE100 borular; ekonomik olarak belli çap aralığında, teknik yönüyle yüksek uzun dönem hidrostatik dayanımları ve sünek mekanik davranışları nedeniyle basınçlı sulama sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Peacock, 2000; International Organization for Standardization, 2019a).

Yaklaşık 200 hektarlık sulama alanına hizmet veren kapalı basınçlı sulama projesinde, iletim ve dağıtım şebekesi tamamen HDPE 100 borulardan teşkil edilmiştir. Sistem, 4-12,5 bar işletme basıncı aralığında çalışacak şekilde projelendirilmiş olup, boru çapları 110 mm ile 450 mm arasında değişmekte ve toplam boru uzunluğu yaklaşık 11 km'yi bulmaktadır.

Boru hatlarının döşenmesine başlanmadan önce, üretici firma tarafından gerçekleştirilen fabrika çıkış kalite kontrol ve uygunluk testlerinin ((PE boru teknik şartnamesinde yapılan değişiklik öncesi) ilgili standartlara uygun sonuçlar verdiği beyan edilmiştir. Saha imalatlarının tamamlanmasının ardından, şebeke genelinde hidrostatik basınç testleri uygulanmış ve bu testler başarıyla sonuçlanmıştır. Bu aşamayı takiben sistem işletmeye alınmıştır.

Sistemin belirli bir süre işletilmesinden sonra, özellikle işletme basıncının 8 bar ve üzerinde olduğu hat kesimlerinde ciddi yapısal arızalar meydana gelmiştir. Bu arızalar; boru cidarında ani patlamalar ile özellikle alın kaynaklı birleşim noktalarında açılma ve ayrışmalar şeklinde gözlemlenmiştir. Hasarların tekrarlayıcı nitelikte olması, rastlantısal bir uygulama hatasından ziyade, malzeme veya üretim kaynaklı sistematik bir soruna işaret etmektedir. Nitekim literatürde, fabrika çıkış testlerinin ve kısa süreli saha testlerinin, PE boruların uzun dönem performansını her zaman güvence altına almadığı vurgulanmaktadır (International Organization for Standardization, 2015b; ASTM International, 2020; McKeen, 2012).

İdare tarafından hazırlanan ve ihale dokümanına eklenen teknik şartnamede, projede kullanılacak HDPE 100 boruların üretiminde kullanılan hammaddenin PE 100 Association (PE100+) üyesi üreticilerden temin edilmesi zorunlu tutulmuş ve bu hususun belge ve sertifikalarla kanıtlanması gerektiği açıkça belirtilmiştir. Bu gereklilik, hammaddenin uzun dönem dayanım, çevresel gerilme çatlağı direnci ve sünek kırılma davranışı gibi kritik performans kriterlerini sağlamasını güvence altına almaya yöneliktir.

İşletme sürecinde meydana gelen arızalar üzerine, döşenmiş hat üzerinde belirli noktalarda kazı çalışmaları gerçekleştirilmiş ve alınan boru numuneleri tarafsız ve akredite bir laboratuvarda çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testler; karbon siyahı muhtevasının tayini, kopma uzaması oranının belirlenmesi ve alın kaynaklı birleşimlerin çekme mukavemeti ile hasar tipinin tespitini kapsamaktadır (International Organization for Standardization, 2019b; International Organization for Standardization, 2012).

Deney sonuçları, incelenen boru numunelerinin karbon siyahı muhtevası ve kopma uzaması değerlerinin ilgili standartlarda öngörülen limitleri karşılamadığını ortaya koymuştur. Karbon siyahı içeriğinin yetersiz olması, PE boruların UV dayanımı ve oksidatif yaşlanmaya karşı direncini olumsuz etkilemekte, bu durum özellikle uzun süreli servis koşullarında erken hasar riskini artırmaktadır (International Organization for Standardization, 2019b). Kopma uzaması değerlerinin düşük olması ise malzemenin sünek davranış

kabiliyetinin zayıf olduğunu ve kırılgan kırılmaya eğilimli bir yapı sergilediğini göstermektedir (International Organization for Standardization, 2012).

Alın kaynaklı birleşimlere yönelik çekme mukavemeti ve hasar tipi deneyleri de uygun sonuç vermemiştir. Deneyler sırasında, PE100 borularda beklenen sünek deformasyon ve boyun verme davranışı yerine ani ve kırılgan kopmalar meydana gelmiştir. Oysa literatürde, uygun özelliklere sahip PE100 hammaddesi kullanılması ve kaynak işlemlerinin standartlara uygun biçimde gerçekleştirilmesi durumunda, alın kaynaklı birleşimlerin mekanik dayanımının boru ana malzemesi ile eşdeğer veya daha yüksek olması gerektiği belirtilmektedir (Alhatti vd., 2025; Dağlı vd., 2023).

Kaynak işlemlerinin sahada standartlara uygun biçimde uygulanmış olmasına rağmen, birleşimlerin başarısız olması, kullanılan hammaddenin moleküler ağırlık dağılımı, eriyik akış özellikleri ve oksidatif stabilitesi açısından yetersiz olduğuna işaret etmektedir. Literatürde, standart dışı veya düşük kaliteli polietilen hammaddelerinde, alın kaynağı sırasında yeterli polimer zincir difüzyonunun sağlanamadığı, bunun sonucunda kaynak bölgesinde zayıf bir ara yüzey oluştuğu ve bu bölgelerin servis koşulları altında kırılgan hasara yatkın hale geldiği vurgulanmaktadır (Ge, 2012).

Alın ergitme kaynağıyla birleştirilen polietilen boru sistemlerinde uzun dönem performansı, proses parametrelerinin yanı sıra kullanılan hammaddenin viskoelastik özellikleri, moleküler ağırlık dağılımı ve termal davranışı tarafından belirlenmektedir (International Organization for Standardization, 2015b; International Organization for Standardization, 2009; Peacock, 2000).

İdare ile üretici firma arasında gerçekleştirilen görüşmelerde, üretimde kullanılan hammaddenin PE 100 Association üyesi üreticilerden tedarik edilip edilmediği sorgulanmış; firma yetkilisi, bu üreticilere ait hammaddelerin maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle üretimde farklı tedarikçilerden hammadde temin ettiklerini açıkça ifade etmiştir. Bu beyan, üretici firmanın sözleşme ve teknik şartname hükümlerine aykırı davrandığını açık biçimde ortaya koymaktadır.

Akredite ve tarafsız bir laboratuvar tarafından gerçekleştirilen deneyler ile üretici firma beyanları birlikte değerlendirildiğinde, boru üretiminde kullanılan hammaddenin teknik açıdan uygun nitelikte olmadığı ve uluslararası standartlara uyum sağlamadığı net biçimde tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda hukuki süreç kapsamında mahkeme, kullanılan hammaddenin sözleşme ve teknik şartname hükümlerine aykırı olduğu kanaatine varmış ve İdare'nin tazmin talebini haklı bularak kararını bu yönde tesis etmiştir.

4 Sonuçlar

DSİ, son yıllarda basınçlı sulama şebekelerinde, özellikle küçük çaplı hatlarda HDPE 100 boru türünü yaygın olarak kullanmaktadır. Ancak bir kısım projelerde, bu boruların döşenmesini takiben işletme sürecinde çatlama, kırılma, ek yerlerinde ayrışma ve kopma gibi çeşitli yapısal arızaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu tür hasarların, yalnızca ani aşırı yüklemelerden değil, çoğunlukla uzun süreli iç basınç, çevresel etkiler ve hammadde kaynaklı viskoelastik davranışlar sonucunda geliştiği bilinmektedir (Brydson,1999; Peacock, 2000).

Yapılan teknik incelemeler, söz konusu arızaların yalnızca işçilik hatalarından kaynaklanmadığını; esas belirleyici etkenin, boru üretiminde kullanılan hammaddenin nitelik açısından yetersizliği olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde de düşük molekül ağırlığına sahip veya katkı dengesi bozulmuş polietilen hammaddelerin, yavaş çatlak ilerlemesi ve sürünme kırılması mekanizmalarına karşı daha yüksek hassasiyet gösterdiği açıkça ifade edilmektedir (Frank vd., 2009; International Organization for Standardization, 2015b).

Bu durum, malzeme kalitesinin ve üretim sürecinde kullanılan girdilerin sistem performansı üzerindeki kritik etkisini açıkça göstermektedir. Nitekim EN 12201 ve AWWA M55 dokümanlarında, PE boruların uzun dönem hidrostatik dayanımının yalnızca geometrik ve basınç sınıfı parametreleriyle değil, doğrudan hammadde sınıfı ve kalite sürekliliği ile ilişkili olduğu vurgulanmaktadır.

Uluslararası literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar, PE borularda sahada gözlenen çatlama, kırılma ve ek yeri ayrışmalarının büyük ölçüde malzemenin uzun dönem viskoelastik davranışı ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle uzun süreli iç basınç altında meydana gelen sürünme ve yavaş çatlak ilerlemesi mekanizmalarının, boru hammaddesinin moleküler ağırlık dağılımı ile doğrudan bağlantılı olduğu vurgulanmaktadır.

Uzun dönem iç basınç deneyleri, düşük kaliteye sahip PE 100 hammaddelerinin, kısa süreli standart testleri başarıyla geçmelerine rağmen, uzun süreli hidrostatik yükleme altında erken hasar gösterebilmektedir.

Oksidatif indüksiyon süresi (OIT), PE boruların uzun dönem performansını değerlendirmede kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Güncel çalışmalarda, düşük OIT değerlerine sahip PE boruların, termal ve mekanik gerilmeler altında oksidatif bozunmaya daha yatkın olduğu ve bunun uzun dönem dayanımı olumsuz etkilediği gösterilmiştir (Celina, 2013; Celina vd., 2005). Örneğin, OIT değeri düşük olan PE malzemelerde antioksidan tüketiminin hızlandığı ve bunun sürünme çatlağı oluşum süresini kısalttığı bildirilmiştir (Celina, 2013). Bu bulgular, bu çalışmada sahada gözlenen erken dönem yapısal hasarların, yalnızca montaj koşullarıyla değil, hammadde kaynaklı oksidatif stabilite yetersizliğiyle de ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, PE boru üretiminde geri dönüştürülmüş hammadde kullanımının, özellikle uzun dönem mekanik davranış üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiğini ortaya koymaktadır. Geri dönüştürülmüş PE içeren boruların, kısa süreli mekanik testlerde kabul edilebilir sonuçlar vermesine rağmen, yavaş şekil değiştirme (creep) ve yavaş çatlak ilerlemesi direncinin anlamlı biçimde azaldığını göstermiştir.

Bu bağlamda, bu çalışmada geri dönüştürülmüş hammadde kullanımına izin verilmemesi yönündeki yaklaşım, yalnızca idari bir tercih değil, uzun dönem dayanım ve işletme güvenilirliği açısından literatürle uyumlu teknik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Bu tür malzeme kaynaklı risklerin önlenebilmesi için, sözleşme ve teknik şartnamelerde belirtilen, kullanılacak boruların hammaddesinin uluslararası standartlara uygunluğu ve onaylı üreticilerden temin edilme zorunluluğu hususu büyük önem taşımaktadır. Avrupa uygulamalarında bu amaçla geliştirilen PE 100+ Association kalite sistemi, hammadde üreticilerinin düzenli test ve denetimlere tabi tutulması yoluyla kalite sürekliliğini sağlamayı hedeflemektedir (PE 100+ Association, 2025).

Yüklenicilere, sözleşmeleri kapsamında PE boruların temini ve montajı karşılığında yapılan ödemelerin, sözleşme eki teknik şartnamelerde belirtilen ilgili standartlara uygun fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayan yüksek kaliteli HDPE 100 borular için yapıldığı dikkate alındığında; boru üreticisi firmalarla yapılacak ön anlaşma sürecinde, kullanılacak hammaddenin kaynağının doğrulanacağı ve bağımsız testlerle kontrol edileceğinin önceden bilinmesi, düşük kaliteli hammadde kullanımına yönelik riskleri önemli ölçüde azaltacaktır. Bu yaklaşım, altyapı projelerinde kalite yönetiminin temel unsurlarından biri olarak literatürde de önerilmektedir (British Plastics Federation, 2020).

British Plastics Federation (BPF) tarafından hazırlanan *Guidance on PE Pipe Quality and Material Selection* raporu, PE boru sistemlerinde malzeme seçimi, uygunluk değerlendirmesi, izlenebilirlik ve bağımsız doğrulama gibi kalite yönetimi uygulamalarını vurgulamaktadır; bu da hammadde kaynağının doğrulanması ve bağımsız testlerin önceden planlanmasının kalite risklerini azaltan temel bir yöntem olduğunu göstermektedir (British Plastics Federation, 2020).

Bu şekilde, uygun nitelikli hammadde kullanılarak üretilen boruların tercih edilmesi sayesinde, sahada döşenen borularda çatlama, kırılma ve ek yerlerinde ayrışma gibi yapısal sorunların yaşanmasının önüne geçilmesi mümkün olabilecektir. Bu değerlendirme, saha gözlemleri ile literatürde tanımlanan hasar mekanizmalarının birbiriyle örtüştüğünü göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler doğrultusunda ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

1- Basınçlı sulama şebekelerinde kullanılan PE borularda sahada gözlenen yapısal hasarların önemli bir bölümü**,** yalnızca montaj veya işletme hataları ile açıklanamamakta, bu hasarların, boru üretiminde kullanılan hammaddenin kalitesi ve bu kalitenin sürekliliği ile doğrudan ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Bu durum, PE boruların uzun süreli mekanik davranışlarının hammadde özelliklerine yüksek derecede duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

2- PE boruların kabul ve kalite kontrol süreçlerinde, üretici beyanları veya fabrika içi test sonuçları esas alınmamaktadır. DSİ polietilen boru teknik şartnamesi kapsamında borulara ilişkin deneyler, sahadan alınan numuneler üzerinden DSİ pilot laboratuvarlarında veya üreticiden bağımsız akredite laboratuvarlarda gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda kopma uzaması, sabit sıcaklık altında iç basınç mukavemeti, yoğunluk, erime akış hızı, yükseltgenme indüksiyon süresi, karbon siyahı miktarı ve dağılımı ile pigment dağılımı gibi asgari deneyler bu bağımsız laboratuvar koşullarında yapılmaktadır. Bu yaklaşım, ölçüm sonuçlarının tarafsızlığını ve güvenilirliğini sağlayarak kalite güvencesi sisteminin temelini oluşturmaktadır.

Bu deneylerin bağımsız laboratuvarlar tarafından yapılacağının**,** yüklenici ve boru üreticisi tarafından önceden bilinmesi, üretim sürecinde standart dışı uygulamalardan kaçınılmasını sağlayan caydırıcı bir unsur oluşturmaktadır. Aksi durumda, uygun olmayan boruların kullanılması idari, hukuki ve ekonomik açıdan telafisi güç sonuçlar doğurabilmektedir.

3- PE boruların uzun ömürlü ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi**,** büyük ölçüde üretimde kullanılan hammaddenin kalitesine bağlıdır. Bu nedenle boruların yalnızca nihai ürün olarak değil, üretimde kullanılan hammaddenin kaynağı ve niteliği açısından da denetlenmesi önem arz etmektedir.

4- Hammadde kaynağının belgelendirilmesi, kalite sürekliliğinin sağlanmasında temel bir unsurdur. HDPE 100 boru hammaddesinin, PE 100+ derneği üyesi üreticilerden temin edildiğinin belge ve sertifikalarla doğrulanması, hammadde kaynaklı kalite dalgalanmalarının önüne geçilmesine katkı sağlamaktadır.

5- Boru üreticisinin kullandığını beyan ettiği hammaddenin doğrulanabilmesine imkan tanıyan sözleşme ve şartname hükümleri, üretici ve yüklenicilerin düşük kaliteli veya standart dışı hammadde kullanımı yönünde risk almalarını önemli ölçüde azaltmaktadır.

6- Boru üretim tesislerinde, ilgili standartlarda belirtilen testlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli laboratuvar altyapısının bulunması ve bu testlerin akredite kuruluşlar tarafından yürütülmesi zorunlu hale getirilmiştir. DSİ teknik şartnameleri kapsamında, fabrika uygunluğu değerlendirmesi alan üreticilerin ilgili deneylerin tamamını akredite laboratuvarlar aracılığıyla gerçekleştirmesi şart olup akreditasyon şartını sağlamayan üreticilere uygunluk verilmemektedir. Bu yaklaşım, üretim sürecinde kalite güvence mekanizmalarının etkin ve denetlenebilir şekilde işletilmesini temin etmektedir.

7- Basınçlı sulama şebekelerinde kullanılan HDPE 100 boruların üretiminde yalnızca orijinal ve sertifikalı hammaddelerin kullanılması zorunludur. Geri dönüştürülmüş hammadde veya inorganik katkı maddesi kullanılmadığı, laboratuvar testlerinin yanı sıra üretim süreçlerinin yerinde denetimi, hammadde tedarik zinciri incelemeleri ve kalite kontrol kayıtlarının muayenesi ile de teyit edilebilmelidir.

8- Teknik şartnamelerde, boru ve ek parçaların kabulü öncesinde üretim partilerine ait testlerin uluslararası geçerliliğe sahip, akredite ve tarafsız laboratuvarlarda yapılmasının zorunlu tutulması, ürün kabul sürecinde objektif ve şeffaf bir değerlendirme mekanizması oluşturmaktadır.

9- İş sahasına sevk edilen borular için**,** döşeme öncesi ve sonrası belirli peryotlarda hammadde uygunluğunu teyit edici testlerin yapılması, özellikle erime akış hızı gibi parametre üzerinden tutarlılığın izlenmesi, kalite sürekliliğinin sağlanmasında etkili bir yöntemdir.

10- Bu çalışmada önerilen bütüncül kalite yaklaşımı, yüklenici, üretici ve idare arasında şeffaf, izlenebilir ve karşılıklı sorumluluğa dayalı bir denetim sistemi oluşturmaktadır. Bu sistem, üretimin başlangıcından saha uygulamalarına kadar tüm aşamalarda kalite kontrolünün etkinliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak**,** PE boru sistemlerinde karşılaşılan yapısal problemlerin azaltılmasının hammadde kalitesi, üretim süreci ve sözleşme-şartname düzenlemelerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesiyle mümkün olabileceği değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımın uygulanması, DSİ tarafından yürütülen basınçlı sulama projelerinde sistem güvenilirliğinin ve uzun vadeli işletme performansının artırılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu çalışmada, yukarıda değinildiği gibi, DSİ tarafından yürütülen basınçlı sulama projelerinde sahada gözlenen çatlama, kırılma, ek yeri ayrışması ve erken dönem mekanik hasar türleri, uluslararası literatürde PE boruların uzun dönem davranışını inceleyen benzer çalışmalarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Özellikle uzun süreli iç basınç etkisi altında gelişen sürünme (creep) ve yavaş çatlak ilerlemesi (slow crack growth) mekanizmalarının, boru hammaddesinin moleküler yapısı, oksidatif stabilitesi ve katkı sistemi ile doğrudan ilişkili olduğu, farklı ülkelerde gerçekleştirilen deneysel ve saha çalışmalarında da ortaya konulmuştur (Almomani vd., 2023). Bu yönüyle, DSİ uygulamalarına özgü saha bulgularının, uluslararası ölçekte tanımlanan hasar mekanizmalarıyla uyumlu olduğu ve elde edilen sonuçların genel geçer malzeme davranışları çerçevesinde değerlendirilebileceği görülmektedir.

Etik Beyan ve Teşekkür: Yazar, çalışmada kullanılan verilerin temini konusundaki desteği nedeniyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder. Makalede yer verilen tüm veriler Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait olup kurumun izniyle kullanılmıştır. Çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir kurum veya kuruluştan finansal destek alınmamış olup, yazar açısından herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalenin bilimsel içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazara aittir.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla

paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Alhatti, A. I., Barsoum, I., Hosny, A. I., & Deveci, S. (2025). Advancements in butt fusion jointing of HDPE pipes: A comprehensive review of fusion conditions and joint integrity assessment techniques. *Polymer Testing*, *150*, Article 108909. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108909

Almomani, A., Mourad, A. H. I., Deveci, S., Wee, J.-W., & Choi, B.-H. (2023). Recent advances in slow crack growth modeling of polyethylene materials. *Materials & Design*, *234*, Article 111720. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111720

American Water Works Association. (2006). *PE pipe — Design and installation* (Manual M55, 1st ed.).

American Water Works Association. (2018). *Polyethylene pressure pipe and fittings, 4 in. (100 mm) through 65 in. (1,650 mm), for water distribution and transmission* (ANSI/AWWA Standard C906-15).

American Water Works Association. (2020). *Polyethylene pipe design and installation* (AWWA Manual M55, 2nd ed.).

ASTM International. (2020). *Standard test method for slow crack growth in polyethylene (PE) pipe and resins* (ASTM Standard No. F1473-20).

British Plastics Federation. (2020). *Guidance on PE pipe quality and material selection*.

Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.

Celina, M. C. (2013). Review of polymer oxidation and its relationship with materials performance and lifetime prediction. *Polymer Degradation and Stability*, *98*(12), 2419–2429. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.024

Celina, M. C., Gillen, K. T., & Assink, R. A. (2005). Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes. *Polymer Degradation and Stability*, *90*(3), 395–404. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.05.004

Dağlı, M., Demirer, A., & Yumat, E. (2023). HDPE boruların alın kaynağında kaynak parametrelerinin birleşme mukavemetine etkisinin yüzey cevap metodu ile optimizasyonu. *International Journal of Engineering Technology and Applied Science*, *6*(2), 95–109. https://doi.org/10.5281/zenodo.10443428

European Committee for Standardization. (2011). *Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure — Polyethylene (PE) — Part 1: General* (EN Standard No. 12201-1:2011).

Frank, A., Pinter, G., & Lang, R. W. (2009). Lifetime prediction of polyethylene pipes based on an accelerated extrapolation concept for creep crack growth with fatigue tests on cracked round bar specimens. *ANTEC 2009: Proceedings of the 67th Annual Technical Conference*, 1851–1855. Society of Plastics Engineers.

Frank, A., Arbeiter, F. J., Berger, I. J., Hutař, P., Náhlík, L., & Pinter, G. (2019). Fracture mechanics lifetime prediction of polyethylene pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, *10*(1), 04018030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000350

Ge, T., Pierce, F., Perahia, D., Grest, G. S., & Robbins, M. O. (2012). Polymer welding: Strength through entanglements. *Physical Review Letters*, *108*(5), Article 058302. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.058302

Hoffman, G. J., Evans, R. G., Jensen, M. E., Martin, D. L., & Elliott, R. L. (Eds.). (2007). *Design and operation of farm irrigation systems* (2nd ed.). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

International Organization for Standardization. (2009). *Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications — Classification, designation and design coefficient* (ISO Standard No. 12162:2009). https://www.iso.org/standard/46215.html

International Organization for Standardization. (2012). *Plastics piping and ducting systems — Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation* (ISO Standard No. 9080:2012). https://www.iso.org/standard/51202.html

International Organization for Standardization. (2015a). *Quality management systems — Requirements* (ISO Standard No. 9001:2015). https://www.iso.org/standard/62085.html

International Organization for Standardization. (2015b). *Thermoplastics pipes — Determination of tensile properties — Part 1: General test method* (ISO Standard No. 6259-1:2015). https://www.iso.org/standard/62422.html

International Organization for Standardization. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* (ISO/IEC Standard No. 17025:2017). https://www.iso.org/standard/66912.html

International Organization for Standardization. (2019a). *Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure — Polyethylene (PE) — Part 1: General* (ISO Standard No. 4427-1:2019). https://www.iso.org/standard/70366.html

International Organization for Standardization. (2019b). *Polyolefin pipes and fittings — Determination of carbon black content by calcination and pyrolysis* (ISO Standard No. 6964:2019). https://www.iso.org/standard/74769.html

International Organization for Standardization. (2025). *Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 6: Determination of oxidation induction time (isothermal OIT) and oxidation induction temperature (dynamic OIT)* (ISO Standard No. 11357-6:2025). https://www.iso.org/standard/69526.html

Mays, L. W. (2010). *Water resources engineering* (2nd ed.). Wiley.

McKeen, L. W. (2012). *The effect of processing on plastics and elastomers.* William Andrew.

PE100+ Association. (2025). *PE100+ quality scheme and approved materials*. https://www.pe100plus.com

Peacock, A. J. (2000). *Handbook of polyethylene: Structures, properties, and applications.* CRC Press.

Plastics Pipe Institute. (2009). *Handbook of polyethylene pipe* (2nd ed.).

Rajput, R. K. (2012). *Engineering materials.* S. Chand.

Wang, H., Shah, J., Hawwat, S.-E., Huang, Q., & Khatami, A. (2024). A comprehensive review of polyethylene pipes: Failure mechanisms, performance models, inspection methods, and repair solutions. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, *4*(2), Article 100174. https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100174

Yadollahi, S. M., & Piratla, K. R. (2025). A state-of-the-art review on failure mechanisms in buried plastic pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *162*, Article 106672. https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106672

Yılmaz, F. (2009). *Su ve atıksu sistemlerinde kazısız teknolojiler ve malzemeler.* Su Vakfı.

DSİ Teknik Bülteni, Temmuz 2026, Sayı:148, p25-33 / Technical Bulletin of DSİ, July 2026, Issue: 148, p25-33

Araştırma Makalesi / Research Article

WEAP Modeli ile İklim Değişikliği Senaryoları Çerçevesinde Solöz Deresi Akım Projeksiyonu Kalibrasyon Sonuçlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Comparative Evaluation of the Calibration Results of Solöz Creek Streamflow Projections under Climate Change Scenarios Using the WEAP Model

Bihter SEZER GÜNEY[1]*, Feza ÖRÜÇ[2]

[1]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, 1. Bölge Müdürlüğü, Bursa
[2]Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: bihter@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 06.12.2025, Düzeltme (Revised): 18.05.2026, Kabul (Accepted): 04.06.2026

ÖZ

Günümüzde su, insan yaşamı, sağlığı ve ekosistemler için hayati önem taşımasının yanı sıra, ülkelerin kalkınması için de temel bir gerekliliktir. Su kıtlığı giderek daha belirgin ve yaygın bir sorun haline gelmektedir. WEAP (Su Değerlendirme ve Planlama Sistemi), mevcut su talebi ve arzı dinamiklerinin sürdürülebilirliğini ve uzun vadede alternatif senaryoları değerlendirmek için 1988 yılında oluşturulan esnek, entegre ve şeffaf bir planlama aracıdır (modeldir). Su kaynakları planlamasına, entegre yaklaşıma dayanan bir programdır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde şiddetli ısınma ve kuraklıkla karşı karşıya olan en savunmasız ülkelerden biri olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, iklim değişikliğinin en yoğun yaşandığı bölgelerden biri olan Türkiye'deki İznik Gölü havzasını besleyen Solöz Nehri için iklim tahminleri WEAP ve CMIP6 kullanılarak modellenmiştir. Model sonuçları 2100 yılına kadar tahmin edilmiş ve orta, kısa ve uzun vadeli sonuçlar yorumlanmıştır. Model sonuçları, gözlemlenen sonuçlarla karşılaştırılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. HadGEM3-GC31-MM değerlerini dikkate alarak yağışları en iyi simüle eden simülasyon sonuçları, NSE, NRMSE ve R2 değerlerine göre incelenmiştir. Gelecekteki projeksiyon anomalileri, IPCC değerlendirme raporu (AR6) referans yılı 1995-2014 temel alınarak (1995-2100) arası dönemleri içermektedir. Çalışmanın amacı, iklim değişikliği senaryosu dikkate alındığında Solöz Nehri Havzasındaki net su bütçesinin nasıl değiştiğini gözlemlemek ve Türkiye için en iyi sonuçları verdiği tespit edilen iklim değişikliği senaryosunun WEAP modeli kullanılarak projeksiyonu yapıldığında göl havzasını beslenen bir akarsuda ne gibi değişiklikler olacağını anlamaktır. Mantıksal çerçeve oluşturulurken, 1995-2002 yılları arasında elde edilen istatistiksel sonuçlar ile 2100 projeksiyonunun istatistiksel sonuçları karşılaştırılarak, iklim değişikliği senaryosunun ne kadar doğru bir şekilde projeksiyonlandığı istatistiksel analizlerle desteklenerek incelenmiştir. NSE (Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı): 1995–2002 için 0,82, 1995–2100 için 0,85. >0,75 "çok iyi" dir. R^2: Kısa vadede 0,98, uzun vadede 0,95. Her ikisi de "çok iyi – neredeyse mükemmel" aralığındadır; NRMSE (%): %49'den %45'e düşerek hata oranında göreceli bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın esası kalibrasyon ve doğrulama sonuçları ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: WEAP, iklim değişikliği, hidroloji, Solöz Deresi, akım projeksiyonu

ABSTRACT

Today, water is not only vital for human life and health and ecosystems, but also a basic necessity for the development of countries. Water scarcity is becoming an increasingly prominent and widespread problem. WEAP (Water Evaluation and Planning System) is a flexible, integrated, and transparent planning tool created in 1988 to assess the sustainability of current water demand and supply dynamics and evaluate alternative scenarios over long periods. It is a programme based on an integrated approach to water resources planning. Recent studies indicate that Turkey is one of the most vulnerable countries in the

Mediterranean region, facing severe warming and drought. In this study, climate projections for the Solöz River, which feeds the Iznik Lake basin in Turkey, a climate change hotspot, were modelled using WEAP and CMIP6. The model results were projected up to 2100, and the results for the medium, short and long term were interpreted. The model results were statistically analysed in comparison with the observed results. Simulation results, which best simulated precipitation by considering HadGEM3-GC31-MM values, were examined based on NSE, NRMSE, and R2 values. Future projection anomalies are based on the IPCC assessment report (AR6) reference year 1995–2014 and cover the period 1995–2100. The aim of the study is to observe how the net water budget in the Solöz River Basin changes when the climate change scenario is taken into account, and to understand what changes will occur in a stream feeding the lake basin when the climate change scenario that has been found to give the best results for Turkey is projected using the WEAP model. While establishing the logical framework, the focus was on examining the extent to which the climate change scenario was accurately projected by comparing the statistical results obtained between 1995 and 2002 with the statistical results of the 2100 projection, supported by statistical analysis. The model performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), the coefficient of determination (R^2), and the normalized root mean square error (NRMSE). The NSE values were calculated as 0.82 for the 1995–2002 period and 0.85 for the 1995–2100 period, both exceeding the threshold of 0.75, which indicates very good model performance. The R^2 values were 0.98 for the short-term period and 0.95 for the long-term period, suggesting a very strong to nearly perfect agreement between observed and simulated values. Furthermore, the NRMSE decreased from 49% to 45%, indicating a relative reduction in model error over the long-term simulation period. This study is supported by calibration and verification results.

Keywords: WEAP, climate change, hydrology, Solöz Stream, flow projection

1 Giriş

Günümüzde su, insan sağlığı ve ekosistemler için hayati önem taşımanın yanı sıra, ülkelerin kalkınması için de vazgeçilmez bir unsurdur. Su kıtlığı giderek daha belirgin ve yaygın bir sorun haline gelmektedir. Bu sorun, birçok sosyal ve ekonomik soruna yol açmaktadır. Doğal kaynaklarımızın korunması ve kullanımı, sürdürülebilir kalkınma için çok önemlidir. Tüm bu unsurlar ancak sürdürülebilir su yönetimi kapsamında değerlendirilebilir. Su kaynakları yönetimine yönelik mevcut yaklaşım, kaynakları havza bazında ve diğer doğal kaynaklarla "entegre" bir şekilde yönetmektir. Çevrenin bir unsuru olan; enerji, tarım ve sağlık gibi sosyo-ekonomik kalkınmanın önemli sektörleri için itici güç olan su kaynaklarının entegre yönetimi, sürdürülebilir kalkınmanın temel bileşenlerinden biridir. Su kaynaklarının verimli kullanımının yanı sıra, doğal yenilenme sürecine dayalı olarak gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da dikkate almak büyük önem taşımaktadır. Entegre havza yönetiminin temel amaçları, mevcut su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını teşvik etmek ve sağlamak, su ekosistemlerini ve bunlara bağlı diğer ekosistemleri iyileştirmek ve bunların tahribatını önlemektir.

Göller, karasal rezervlerin en önemli depolarından biri olarak kabul edilir. Göller, yüzey suyu ve bölgesel iklim düzenlemesi, ekosistem dengesi ve biyolojik çeşitliliğin korunmasında önemli bir rol oynar (Chen vd., 2021)

WEAP, su kaynakları planlamasına entegre bir yaklaşıma dayanan bir programdır ve mevcut su talebi ve arz dinamiklerinin sürdürülebilirliğini ve uzun vadeli alternatif senaryoları değerlendirmek için esnek, entegre ve şeffaf bir planlama aracı olarak 1988 yılında oluşturulmuştur (Stockholm Environment Institute, 2024).

Selek ve Aslan (2019), çalışmalarında WEAP programını şu şekilde tanıtmıştır. WEAP yazılımı, entegre su kaynakları yönetiminde havza su hidrolojisini verimli bir şekilde planlamayı amaçlamaktadır. Program kullanılarak, mevcut havza verileri programa girilerek su bütçeleri hesaplanabilir ve çeşitli senaryolara dayalı yönetim analizleri yapılabilir. Bu çalışmanın kapsamında, farklı modeller kullanılarak su bütçesi hesaplanacak, WEAP modeli kullanılarak su bütçesi hesaplanacak, sonuçlar karşılaştırılacak ve model doğrulanacaktır.

Goshime vd. (2021), WEAP modelini kullanarak Etiyopya'daki Rift Vadisi Göllerinin su bütçesini simüle etmiş, göllerde gözlenen akış sonuçlarını yağışlardan elde edilen akış sonuçlarıyla karşılaştırmış ve benzer sonuçlar elde edildiğini gözlemlemiştir. Model kullanılarak su ihtiyaçları hesaplanmış, talep akışı ve karşılanamayan akışlar bugün, kısa vadede ve gelecekte ayrı ayrı hesaplanmış, su bütçesi ve su seviyesi grafikleri karşılaştırmalı olarak hesaplanmış ve çalışma, su bütçesi alan değişikliği ve hacim değişikliği gibi verilerin hesaplanmasıyla sonlandırılmıştır.

WEAP (2024) modeli, su arzı ve talebini entegre etmek için Etiyopya ve Kenya'daki birkaç göl havzasına uygulanmıştır. WEAP, olası sonuçları değerlendirmek için kullanılmıştır. Örneğin, planlanan bir su kaynakları geliştirme (sulama ve su temini) projesinin Tana Gölü'nün su seviyesine etkisi incelenmiştir (Alemayehu vd., 2010). Ayrıca, yüzey sularının gelecekteki tahsisini simüle etmek için de kullanılmıştır.

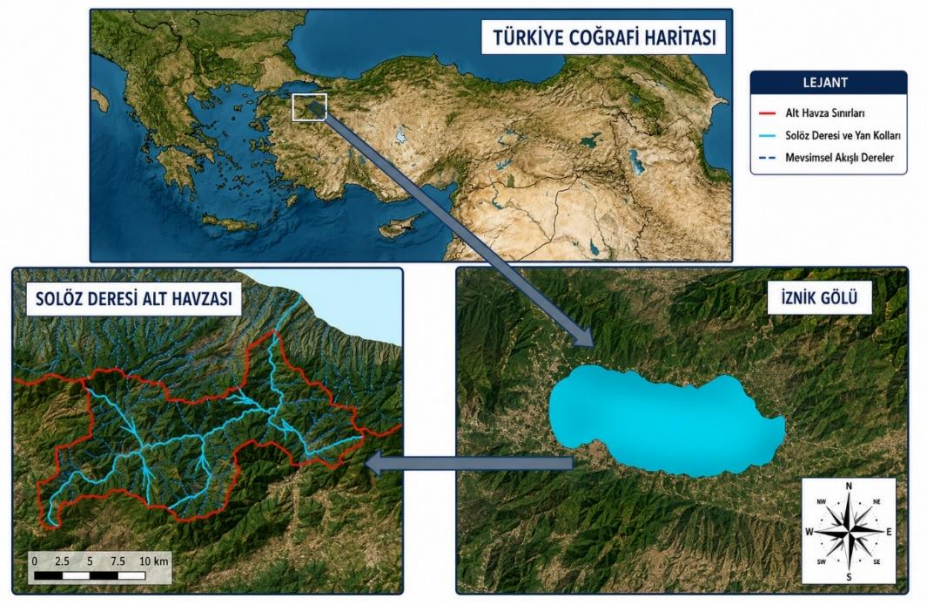
İznik Gölü ve Solöz Nehri üzerine yapılan önceki bir çalışmada (Sezer Güney ve Karaer, 2025), kaynak akışı olmayan nehirler için model sonuçlarının yalnızca yağışlardan elde edilen akışlardan nasıl elde edildiğine odaklanılmıştır.

Bu çalışmada ise, kaynak akışları dahil edilerek hesaplanan nehir su bütçesinin iklim değişikliği senaryolarından nasıl etkilendiğine odaklanılmıştır. İklim değişikliğinin en yoğun yaşandığı bölgelerden biri olan Türkiye'deki İznik Gölü havzasına su sağlayan Solöz Nehri için iklim tahminleri, WEAP ve CMIP6 kullanılarak modellenmiştir. Model sonuçları 2100 yılına kadar tahmin edilmiş ve orta, kısa ve uzun vadeli sonuçlar yorumlanmıştır. Model sonuçları, gözlemlenen sonuçlarla karşılaştırılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. HadGEM3-GC31-MM değerlerini dikkate alarak yağışları en iyi simüle eden simülasyon sonuçları, NSE, PBIAS ve R^2 değerlerine göre incelenmiştir. Çalışmanın amacı, iklim değişikliği senaryosu dikkate alındığında Solöz Nehri Havzasındaki net su bütçesinin nasıl değiştiğini gözlemlemek ve Türkiye için en iyi sonuçları verdiği tespit edilen iklim değişikliği senaryosu WEAP modeli kullanılarak yansıtıldığında göl havzasına beslenen bir akarsuda ne gibi değişiklikler olacağını anlamaktır. Mantıksal çerçeve oluşturulurken, 1995-2002 yılları arasında elde edilen istatistiksel sonuçlar ile 2100 projeksiyonunun istatistiksel sonuçları karşılaştırılarak, iklim değişikliği senaryosunun ne kadar doğru bir şekilde projeksiyonlandığı incelenmiştir. Bu çalışma iklim değişikliğinin sonuçlarına odaklanmakla birlikte, esasen bir kalibrasyon ve doğrulama çalışması olduğu göz ardı edilmemelidir.

2 Materyal Metod

2.1 Çalışma Alanı

Soloz Deresi, İznik Gölü Havzasında yer almaktadır ve İznik Gölü, Marmara Bölgesinin güneydoğusunda bulunmaktadır. Gemlik Körfezinin doğusundaki Karsak Eşiğinden başlayarak doğu-batı yönünde 32 km boyunca uzanır ve esas olarak Marmara Bölgesinin Güney Marmara kesiminde yer alır. Marmara Havzasının bir alt havzasıdır. Solöz Deresi havza alanı 7746 hektardır. Havza Sınırı ile Solöz Deresi Akış Haritası Şekil 1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. Solöz Deresi havzası ve yer bulduru haritası

2.2 WEAP ile Modelleme

WEAP, su havzalarını ve nehirleri otomatik olarak tanımlayabilir (dijital yükseklik verilerini kullanarak), arazi alanını hesaplayabilir (yükseklik bandı ve arazi örtüsüne göre ayrıştırılmış olarak), her su havzası için geçmiş iklim verilerini (yükseklik bandına göre) indirebilir ve iklim özeti arka plan harita katmanı oluşturabilir. Bu, su toplama havzası hidrolojisinin oluşturulması ve modellenmesi sürecini büyük ölçüde basitleştirir. WEAP, gerektiğinde yükseklik, arazi örtüsü ve iklim için küresel veri setlerini otomatik olarak indirebilir. Bu model, sadece bir hidroloji modeli içermesi nedeniyle değil, aynı zamanda su kullanımını da tahmin edebilmesi nedeniyle seçilmiştir. Birçok hidroloji modeli kullanılmaktadır ve planlama için modeller de mevcuttur. Ancak, her iki özelliği de bir araya getiren bu model, sadece iyi sonuçlar vermekle kalmaz, aynı zamanda kullanım açısından da çok pratiktir.

İklim veri seti, kara yüzeyi modellerini ve diğer karasal modelleme sistemlerini çalıştırmak için yüzeye yakın meteorolojik veriler (Tmin, Yağış, Rüzgar) sağlar. Yeniden analiz verilerini gözlemlerle birleştirir ve bunları zaman ve uzayda (aylık ve 0,25 derece enlem/boylam) ayrıştırır. Princeton Üniversitesi Karasal Hidroloji Grubu tarafından oluşturulmuştur.

İklim değişikliği için diğer veri seti ise CMIP 6 HadGEM3-GC31-MM'dir. NEX-GDDP-CMIP6 veri seti, Birleşik Model Karşılaştırma Projesi Aşama 6 (CMIP6) kapsamında yürütülen Genel Dolaşım Modeli (GCM) çalıştırmalarından ve Ortak Sosyoekonomik Yollar (SSP) olarak bilinen dört “Tier 1” sera gazı emisyon senaryosundan ikisinde elde edilen küresel ölçek indirgenmiş iklim senaryolarından oluşur. CMIP6 GCM çalıştırmaları, Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli' nin (IPCC AR6) Altıncı Değerlendirme Raporu'nu desteklemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu veri seti, günlük senaryoların üretildiği ve Earth System Grid Federation aracılığıyla dağıtıldığı Senaryo MIP model çalıştırmalarından elde edilen küçültülmüş projeksiyonları içerir. Bu veri setinin amacı, daha ince ölçekli iklim gradyanlarına duyarlı süreçler ve yerel topografyanın iklim koşulları üzerindeki etkileri üzerinde iklim değişikliğinin etkilerini değerlendirmek için

kullanılabilecek, küresel, yüksek çözünürlüklü, önyargı düzeltilmiş bir dizi iklim değişikliği projeksiyonu sağlamaktır.

Bu modelin seçilmesinin iki nedeni bulunmaktadır. İlki modelin hidrolojik bütçeyi ve su tahsisini aynı zamanda modelleyebilmesidir. Diğeri ise su bütçesine yönelik devam niteliğinde çalışmalara devam edilmesi yönündeki planlamadır.

2.3 İklim Senaryosu CMIP 6 HadGEM3-GC31-MM

İklim değişikliğinin etkisiyle, havanın su tutma kapasitesindeki artışa bağlı olarak dünyanın kara yüzey alanının büyük bir bölümünde yüzeye yakın sıcaklığın ve buna bağlı olarak yağışın artması beklenmektedir. Akdeniz bölgesi , iklim projeksiyonlarına göre yağışta önemli bir azalma yaşayacak istisnai alanlardan biridir. Bu nedenle Akdeniz bölgesi iklim değişikliği sıcak noktası olarak kabul edilmektedir; dolayısıyla bölgede daha yüksek risk altındaki alanların iklim koşullarını değerlendirmek kritik öneme sahiptir. Son zamanlarda yayınlanan çalışmalar, Türkiye'nin Akdeniz'de şiddetli ısınma ve kuraklık yaşayacak en savunmasız ülkelerden biri olduğunu göstermektedir. Ancak, bu çalışmalar CMIP'nin önceki sürümü (CMIP5) temel alınarak yürütülmüştür. Bu noktada, iklim değişikliği sıcak noktası olan Türkiye üzerindeki iklim projeksiyonlarını CMIP5 ve CMIP6 kullanarak karşılaştırmalı ve kapsamlı bir şekilde izlemek, herhangi bir iyileşme ve/veya değişim olup olmadığını görmek esastır. Özellikle, Türkiye'nin çeşitli ve benzersiz iklimi ile makro modellerin performans değerlendirmesi, iklim değişikliği sıcak noktasındaki nispeten küçük veya mezo ölçekli bölgeler için modellerin kısmi doğruluğunu ortaya çıkarabilir. Türkiye'nin güney kesimlerinin daha az yağış alması söz konusudur. Öngörüldüğü gibi Akdeniz havzasında artan sıcaklıklar ve azalan yağışların, su kaynakları açısından zaten riskler taşıyan bölgeyi gelecekte daha kırılgan hale getirmesi muhtemeldir. CMIP6' nın katma değerleri ışığında, Akdeniz bölgesinin en kırılgan ülkelerinden biri olan Türkiye'nin iklim değişikliği koşullarının yeniden değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Son 40 yılda yapılan gözlemlere göre, Türkiye'de ortalama sıcaklık yaklaşık 1,5 °C artmış olup, sıcak dönem uzamaktadır. Türkiye'de ortalama sıcaklıklarda belirgin bir artış görülmekte olup, özellikle yaz sıcaklıklarında belirgin bir artış görülmektedir. Öte yandan, şu ana kadar Türkiye üzerinde CMIP5 ve CMIP6 (2016'dan beri) modelleri arasındaki performans farkını ayrıntılı olarak inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. HadGEM3-GC31-MM son MR değerlerini dikkate alarak yağışı en iyi şekilde simüle ediyor ve ayrıca kalibrasyon sonuçlarında da en üst sırada yer alıyor (Bağçacı vd., 2021).

3 Sonuçlar

Bu çalışma ile 1995-2002 veri seti ile 1995-2100 veri setlerinin karşılaştırmalı kalibrasyon ve doğrulaması yapılmıştır. 2002 veri setinin seçilme sebebi bu tarihlerde Solöz Deresi ölçüm sonuçlarının eksiksiz oluşudur. Öncelikle eksik veri olmayan veri setinde kalibrasyon sonuçları çalışılmış, sonrasında 2100' e kadar modellendiğinde bu kalibrasyon sonuçlarında ne gibi değişimler olduğu yani modelin uzun dönem senaryosunda da doğru çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçların bilimsel açıdan faydalı olduğu düşünülmektedir. Sonuçlar leteratürde kabul görmüş NSE, NRMSE ve R^2 makul aralıklarında hesaplanmıştır. Model kalibrasyonunun başarısı, literatürde yaygın olarak kullanılan istatistiksel performans göstergeleri olan Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE), belirlilik katsayısı (R^2) ve normalize edilmiş kök ortalama kare hata (NRMSE) ile değerlendirilmiştir. NSE değeri teorik olarak $-\infty$ ile 1 arasında değişmekte olup, 0.50 ve üzerindeki değerler kabul edilebilir, 0.65–0.75 arası iyi, 0.75'in üzerindeki değerler ise çok iyi model performansı olarak sınıflandırılmaktadır. NSE'nin 0'ın altında olması, model tahminlerinin gözlemlerin ortalamasından daha kötü olduğunu göstermektedir (Moriasi vd., 2007; Moriasi, 2015) Belirlilik katsayısı (R^2), model çıktıları ile gözlenen veriler arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ifade etmekte olup, 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Hidrolojik modelleme çalışmalarında $R^2 \geq 0.50$ değerleri genellikle kabul edilebilir, 0.70 ve üzeri değerler iyi, 0.85 ve üzeri değerler ise çok iyi uyum olarak değerlendirilmektedir (Santhi vd., 2001; Van Liew vd., 2007).

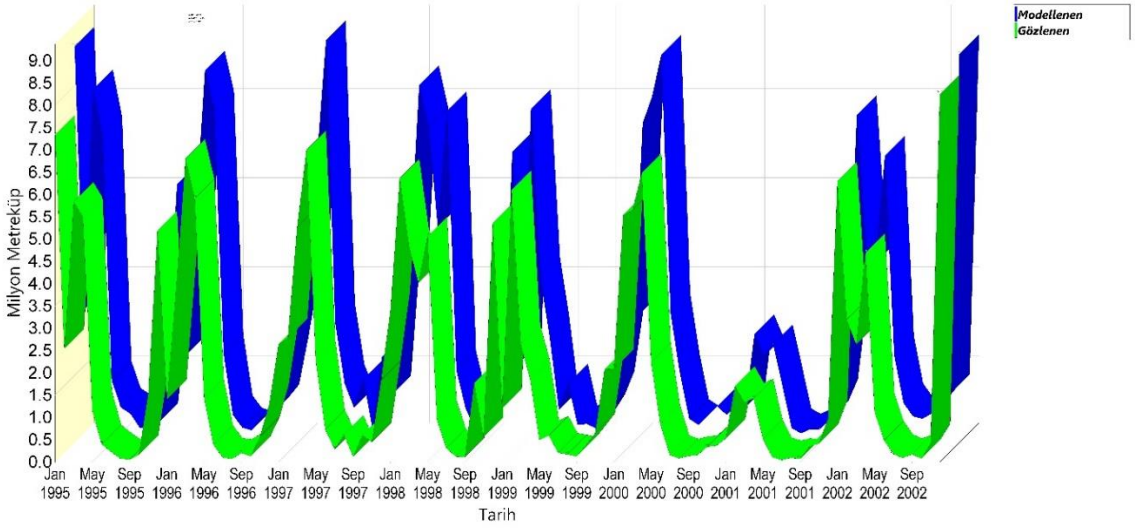
NRMSE ise model hatasının gözlenen verilerin ölçeğine göre normalize edilmiş bir ölçüsü olup, daha düşük değerler daha iyi performansı ifade etmektedir. Literatürde evrensel bir eşik bulunmamakla birlikte, hidrolojik ve çevresel modelleme çalışmalarında %30'un altındaki NRMSE değerleri kabul edilebilir, %20'nin altındaki değerler ise iyi model performansı olarak yorumlanmaktadır (Legates & McCabe, 1999).

Bu kapsamda, elde edilen performans göstergeleri birlikte değerlendirildiğinde, modelin gözlenen hidrolojik süreçleri tatmin edici düzeyde temsil ettiği ve kalibrasyonun literatürde önerilen kabul edilebilir

sınırlar içerisinde olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuçlara ilişkin daha detaylı bilgiye aşağıda yer verilmektedir.

3.1 İstatistiksel Değerler

Şekil 2' de yeşil renk ile ifade edilen gözlemlenen değerleri; mavi renk ile ifade edilen modelden türetilen değerleri göstermektedir. Elde edilen kalibrasyon değerleri; NSE = 0,82 ile güçlü, ancak Şekil 3' teki grafikten biraz daha düşük verimlilik katsayısı elde edilmiştir. NRMSE' de ise %49 ile oldukça düşük bir hata oranı elde edilmiştir. R^2 = 0,98 mükemmel korelasyonu belirtir. Şekil 2 için, model değerleri genel olarak gözlenen değerleri yakından takip etmektedir.

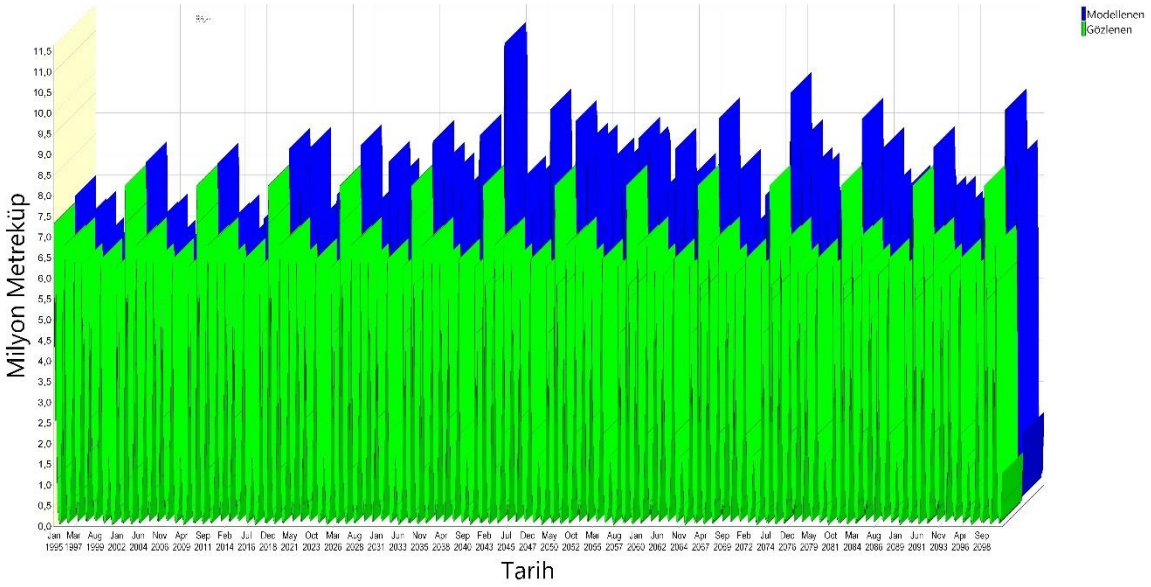


Şekil 2. Solöz Deresi 1995-2002 arası WEAP ile modellenen sonuçlar ile gözlenen değerler arasındaki ilişki

Şekil 3, zaman serisi boyunca 1995 ile 2100 arasında aylık akış miktarlarını göstermektedir. Yeşil ile ifade edilen gözlenen değerler; Mavi ile ifade edilen modellemeden elde edilen değerlerdir. Elde edilen istatistiksel sonuçlara, yani kalibrasyon sonuçlarına baktığımızda NSE (Nash-Sutcliffe Verimliliği) = 0,85 modelin oldukça iyi verimlilikle çalıştığını göstermektedir. NRMSE (Normalleştirilmiş Kök Ortalama Kare Hatası) = %45, hata oranının düşüklüğünü ifade eder ve R^2 = 0,95 ile oldukça güçlü korelasyon sonuçları elde edilmiştir.

Modelde, özellikle yüksek akış dönemlerinde (Piklerde) küçük sapmalar bulunmaktadır. 1995' ten 2100' e kadar olan simülasyonda, model uzun vadeli eğilimleri korumaktadır. İstatistiksel olarak, oldukça verimli sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2, 1995 ile 2002 arasındaki gözlemlenen ve modellenen sonuçları karşılaştırmaktadır. Gözlemlenen ve modellenen akım pikleri zaman içinde daha belirgindir.

Şekil 3 için, Modelleme, pik değerlerinde daha belirgin sapmalar göstermektedir (bazı yıllarda model pik noktaları daha yüksek veya daha düşüktür). Modellemenin başarı oranı, düşük akış dönemlerinde artmaktadır. Özellikle yüksek akış dönemlerinde (ilkbahar/sel), model eğrisi gözlemlenen değerden sapabilir. Model Tutarlılığı 1995–2100 arasında daha istikrarlı; 1995–2002 arasındaki grafikte piklerde önemli sapmalar mevcuttur. Düşük Akım Başarısı; 1995–2100 arasında iyi; 1995–2002 arasındaki grafikte mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. Model her iki dönemde de "çok iyi" performans göstermektedir; uzun vadeye (1995–2100) geçildiğinde, NSE hafifçe iyileşir (0,82 → 0,85), NRMSE azalır (49% → 45%) ve R^2 hala çok yüksek kalır (0,98 → 0,95). Bu, modelin genel eğilimi ve değerleri iyi bir şekilde yakaladığını ve uzun vadede genelleştirilebilirliğini koruduğunu göstermektedir



Şekil 3. Solöz Deresi 1995-2100 arası WEAP ile modellenen sonuçlar ile gözlenen değerler arasındaki ilişki

3.2 Ayrıntılı Karşılaştırma

Çizelge 1' de yer alan bilgiler doğrultusunda, NSE (Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı): 1995–2002 için 0,82, 1995–2100 için 0,85. Tablo eşiklerine göre, >0,75 "çok iyi" dir; bu nedenle model, her iki dönem için de hataya göre çok yüksek bir açıklayıcı güce sahiptir. Uzun vadede küçük ama pozitif bir artış vardır.

R^2: Kısa vadede 0,98, uzun vadede 0,95. Her ikisi de "çok iyi – neredeyse mükemmel" aralığındadır; uzun vadede küçük bir düşüş beklenmektedir. Model, korelasyon yapısını korumaktadır. NRMSE (%): %49'den %45'e düşerek hata oranında göreceli bir azalma olduğunu göstermektedir. Tablodaki NRMSE sınıflandırması metin olarak biraz tutarsız görünse de (eşikler karıştırılmıştır), genel prensip olarak daha düşük NRMSE daha iyi uyum anlamına gelir ve burada uzun vadede bir iyileşme vardır.

Tablo 1. Kalibrasyon parametreleri ve kabul edilebilir aralıkları

Kalibrasyon Parametresi	Model Sonuçları ve Gözlemlenen Değerlerin Karşılaştırılmasıyla Elde Edilen Değer (1995-2002)	Model Sonuçları ve Gözlemlenen Değerlerin Karşılaştırılmasıyla Elde Edilen Değer (1995-2100)	Kabul Edilebilir Aralık
NSE	0.82	0.85	<0.5 zayıf 0.75 - 1 çok iyi 1 mükemmel
R2	0.98	0.95	< 0.5 zayıf 0.7-0.9 çok iyi 1 mükemmel
NRMSE (%)	49	45	100-80 zayıf 50-80 kabul edilebilir < 50 çok iyi

3.3 Genel Değerlendirme

2100 yılına kadar elde edilen model sonuçlarını gösteren grafik, uzun vadeli ve istikrarlı modelleme için daha başarılıdır. 1995 ile 2002 yılları arasındaki sonuçları gösteren grafik, daha ayrıntılı zamansal çözünürlükle (ör. sel analizi) çalışmak için uygundur; ancak model, bu ayrıntı düzeyinde bazı pikleri yakalamakta zorlanmaktadır. Modelleme başarısı genel olarak yüksektir, ancak zamansal çözünürlük arttıkça hatalar da artabilir (beklendiği gibi) (Şekil 2 ve Şekil 3).

Genelleştirilebilirlik: Uzun vadede NSE' deki artış ve NRMSE' deki azalma, modelin kalibrasyon dönemine sadece “aşırı uyum” sağlamadığını, daha uzun bir doğrulama ufku boyunca hatayı azaltabildiğini göstermektedir.

R^2' deki küçük düşüş: Çok yüksek değerlerden (0,98) yüksek değerlere (0,95) düşüş, modelin varyansı açıklama yeteneğinin hala oldukça yüksek olduğunu ve uzun vadede süreç belirsizliğindeki doğal artışla tutarlı olduğunu gösterir.

Bağçacı vd. (2021), yaptıkları çalışmada literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi Akdeniz havzasındaki kuraklığa değinmişlerdir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak yağışlarda azalma değil düzensizlik olabileceği, pikler görülebileceği, kalibrasyon ve doğrulama sonuçlarının bu denli iyi oluşuyla desteklenmiştir.

Neticede 1995-2100 arası projeksiyona baktığımızda akım değerlerinde iklim değişikliğine bağlı azalmanın aksine düzensiz ve pik debiler olacağı modellenmekte ve öngörülmektedir. Bu doğrultuda elde edilen sonuçlardan anlaşılıyor ki bilhassa pik debilerin gözlendiği ani yağış durumları için, ki bunları önceden tahmin etmek oldukça güç, tedbir alınması gerekmektedir. Bu noktada taşkına yönelik baraj ve gölet projelerinin uygulanmasının olası taşkın durumuna karşı tedbir olurken aynı zamanda düzensiz yağışlarla akışa geçerek denizlere ulaşan akımların su yapıları (baraj ve gölet) ile tutularak yağışın az olduğu kurak dönemlerde insan kullanımı açısından da faydalı olacağı kanaatine varılmıştır. Taşkın yapılarının yapılmasının uzun vadede çözüm üretebileceği öngörülmektedir. Ancak tek başına dere ıslah çalışmalarının yeterli olmayacağı, taşkın tedbiri amaçlı su yapılarının (baraj ve gölet) da yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Etik Beyan, Katkı Belirtme ve Teşekkür: Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FGA-2025-1987 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, çalışmaya sağladığı katkılardan dolayı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder. Makalenin hazırlanması sürecinde yalnızca dil ve anlatım düzenlemesi amacıyla ChatGPT kullanılmış; üretilen tüm içerik yazarlar tarafından kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır. Yazarlar açısından herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalenin bilimsel içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazarlara aittir.

Yazarların Katkısı: Bu çalışmada Bihter SEZER GÜNEY: Kavramsallaştırma, metodoloji, yazılım, doğrulama, biçimsel analiz, araştırma, veri düzenleme, yazım-ilk taslak hazırlama, son versiyonun yazımı, gözden geçirme, düzenleme ve görselleştirme, denetim; Feza ÖRÜÇ: Kavramsallaştırma, metodoloji, yazılım, biçimsel analiz, araştırma, veri düzenleme, yazım-ilk taslak hazırlama, son versiyonun yazımı, gözden geçirme, düzenleme ve görselleştirme, denetim konularında katkı sağlamışlardır.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni’nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni’nde yayımlanan herhangi bir araştırma makalesinin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Alemayehu, T., McCartney, M., & Kebede, S. (2010). Modelling to evaluate the water resource implications of planned infrastructure development in the Lake Tana subbasin, Ethiopia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *10*(2–4), 211–221. https://doi.org/10.2478/v10104-011-0017-7

Bağçacı, S. Ç., Yücel, İ., Düzenli, E., & Yılmaz, M. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, *256*, Article 105576. https://doi.org/10.1016/j.atmres.2021.105576

Chen, T., Song, C., Ke, L., Wang, J., Liu, K., & Wu, Q. (2021). Estimating seasonal water budgets in global lakes by using multi-source remote sensing measurements. *Journal of Hydrology*, *593*, Article 125781. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125781

Goshime, D. W., Haile, A. T., Rientjes, T., Absi, R., Ledesert, B., & Siegfried, T. (2021). Implications of water abstraction on the interconnected Central Rift Valley Lakes sub-basin of Ethiopia using WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *38*, Article 100969. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100969

Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, *35*(1), 233–241. https://doi.org/10.1029/1998WR900018

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. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, *58*(6), 1763–1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, *37*(5), 1169–1188. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x

Selek, Z., & Aslan, C. (2019). Utilization of WEAP model in integrated water resources management: The case of Lake Burdur basin. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, *5*(1), 54–64. https://doi.org/10.30855/gjes.2019.05.01.007

Sezer Güney, B., & Karaer, F. (2025). Estimation of Solöz River water balance components and rainfall runoff pattern with WEAP model. *Water*, *17*(8), Article 1129. https://doi.org/10.3390/w17081129

Stockholm Environment Institute. (2024). *Water Evaluation and Planning System (WEAP)* (Version 2024) [Bilgisayar yazılımı]. https://www.weap21.org

Van Liew, M. W., Veith, T. L., Bosch, D. D., & Arnold, J. G. (2007). Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, *12*(2), 173-189.https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173

DSİ Teknik Bülteni, Temmuz 2026, Sayı:148 p34-47 / Technical Bulletin of DSİ, July 2026, Issue: 148, p34-47

Araştırma Makalesi / Research Article

Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) Makine Öğrenmesi Modeli ile Akım Tahmini: Filyos Havzası Örneği

Flow Forecasting Using a Long Short-Term Memory (LSTM) Machine Learning Model: The Filyos Basin Example

Salih BABAGİRAY[1*], Önder KARAGÖZ[2], Muhammet Bahattin AVCUOĞLU[3]

[1]*Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Yenilenebilir Enerji Dairesi Başkanlığı, Ankara*
[2]*Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Bilgi Teknolojileri Dairesi Başkanlığı, Ankara*
[3]*Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Taşkın Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara*

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: salihbabagiray@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 12.12.2025, Düzeltme (Revised): 03.06.2026, Kabul (Accepted): 11.06.2026

ÖZ

Bu çalışmada, Filyos Çayı için günlük akım değerlerinin tahmininde Makine Öğrenmesi tabanlı bir yöntem olan Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) modeli kullanılmıştır. Model, 2016-2020 yılları arasındaki beş yıllık döneme ait 27 noktadan elde edilen OMGİ (Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu) verileri, ERA5 alansal yağış verileri ve havza çıkışındaki Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) verileri kullanılarak eğitilmiştir. Veri seti kronolojik yapıyı koruyacak şekilde eğitim (ilk 3 yıl), doğrulama ve test dönemlerine ayrılmış; veri temizliği, normalizasyon ve gecikmeli girişlerin oluşturulması gibi önemli ön işleme adımları uygulanmıştır. Model performansı Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE), RMSE ve MAE gibi yaygın metriklerle değerlendirilmiş ve eğitim döneminde NSE = 0.790, test döneminde ise NSE = 0.603 değerleri elde edilmiştir. Hidrograf karşılaştırmaları, modelin özellikle düşük ve orta debi koşullarında yüksek doğrulukla tahmin yaptığını göstermiştir. Ayrıca model, farklı debi aralıklarındaki zamansal değişimleri başarılı bir biçimde izleyerek akım rejiminin genel dinamiğini tutarlı şekilde yansıtmıştır. Sonuçlar, LSTM yönteminin Filyos Havzası gibi karmaşık hidrolojik sistemlerde akım tahmini için uygulanabilir ve güçlü bir alternatif sunduğunu; ayrıca DSİ'nin sorumluluğunda bulunan baraj işletme, taşkın yönetimi ve su kaynakları planlaması gibi süreçlerde önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: LSTM, akım tahmini, makine öğrenmesi, filyos çayı havzası, hidrolojik modelleme

ABSTRACT

In this study, a Long Short-Term Memory (LSTM) model, a machine learning-based approach, was used to predict daily streamflow for the Filyos River. The model was trained using five years (2016-2020) of hydrometeorological data, including 27 point-based observations from Automatic Meteorological Observation Stations (AWOS), spatial ERA5 precipitation data, and discharge records from the basin outlet Streamflow Gauging Station (SGS). The dataset was divided chronologically into training (first 3 years), validation, and test periods, and several preprocessing steps-such as data cleaning, normalization, and the construction of lagged inputs-were applied. Model performance was evaluated using common hydrological accuracy metrics, including the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), RMSE, and MAE. The LSTM model achieved NSE = 0.790 in the training period and NSE = 0.603 in the test period, indicating satisfactory predictive capability. Hydrograph comparisons show that the model performs particularly well under low and medium flow conditions and is able to capture temporal variations across different flow ranges, effectively reflecting the overall dynamics of the basin. The results demonstrate that LSTM provides a strong and applicable alternative for streamflow forecasting in complex hydrological systems such as the Filyos Basin, and that it can support various operational tasks administered by the General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ), including reservoir operation, flood management, and water resources planning.

Keywords: LSTM, streamflow forecasting, machine learning, filyos river basin, hydrological modeling

1 Giriş

Akım tahmini, hidroloji ve su kaynakları mühendisliğinin temel çalışma alanlarından biri olup, havza ölçeğindeki su döngüsünün daha iyi anlaşılmasına ve su yönetimi süreçlerinin etkin şekilde yürütülmesine önemli katkılar sağlar. Depolamalı tesislerin işletme süreçleri, hidroelektrik kaynaklı enerji üretiminde optimizasyon, sulama suyu arz-talep dengelemesi, kuraklık risk yönetimi ve taşkın kontrolü gibi birçok uygulama, geleceğe yönelik güvenilir akım tahminlerine ihtiyaç duyar. Bu nedenle akım tahmini, yalnızca bilimsel bir ilgi alanı değil, aynı zamanda doğrudan kamu güvenliği ve ekonomik planlama açısından kritik öneme sahip bir mühendislik problemidir (Shamseldin, 1997). Şüphesiz ki; uygulamacılar için su kaynaklarının planlanması ve projelendirilmesi aşamasında güvenilir akımlarla çalışılması kadar, karar vericiler için işletme aşamasında güvenilir akım tahminlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır. Tam da bu noktada, hidrolojik modellerin kullanılması ile suyun kalite ve miktarının zaman-alan yayılımının simülasyonu taşkın kontrolü ve içme suyu teminine kadar birçok alanda öngörü sağlayacaktır (Avcuoğlu, 2023).

Hidrolojik süreçlerin yüksek karmaşıklığı tahmin problemlerini zorlaştıran en önemli faktörlerden biridir. Yağış, buharlaşma, infiltrasyon, yeraltı suyu hareketi, yüzey akışı ve kanal hidrolikleri gibi birbirine bağlı çok sayıda fiziksel süreç, uzaysal ve zamansal değişkenlik gösterir. Bu süreçler çoğu zaman doğrusal olmayan ilişkilere sahip olduğundan, klasik istatistiksel tahmin yöntemleri ve deterministik fizik tabanlı modeller bu ilişkileri tam olarak yakalamakta güçlük çekebilir. Özellikle parametre sayısının fazla olması, veri yetersizliği, model kalibrasyonunun zaman alması ve bazı kabullerin gerçek sistem davranışıyla uyumlu olmaması gibi nedenlerle fizik tabanlı modeller uygulamada sınırlı performans gösterebilmektedir (Beven, 2001).

Bu bağlamda son yirmi yılda, özellikle makine öğrenmesi gibi veri odaklı yaklaşımlar, hidrolojik modelleme alanında önemli bir yer edinmiştir. Makine öğrenmesi, sistem davranışını doğrudan ölçülmüş verilerden öğrenme üzerine kurulu olup, fiziksel süreçlerin tamamının matematiksel olarak tanımlanmasına gerek duymaz. Bu özelliği sayesinde karmaşık, doğrusal olmayan ilişkilerin yoğun olduğu hidrolojik zaman serilerinde başarılı tahminler üretebilmektedir (Solomatine & Ostfeld, 2008). Bu tür zaman serilerinde geçmiş bilgilerin ve gecikmeli etkilerin doğru şekilde temsil edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, söz konusu gereksinimi karşılayabilen ve uzun dönemli bağımlılıkları öğrenme kapasitesi ile öne çıkan makine öğrenmesi yöntemlerinden biri olan Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM, Long Short-Term Memory) modeli tercih edilmiştir.

LSTM, özellikle zaman serisi verilerindeki uzun süreli bağımlılıkları öğrenme kapasitesi ile öne çıkan bir yapıdır. Klasik tekrarlayan sinir ağlarında (RNN, Recurrent Neural Network, Tekrarlayan Sinir Ağı) eğitim sırasında karşılaşılan temel sorunlardan biri, geriye yayılım algoritmasının gradyan sönümlenmesi (vanishing gradient) problemi olarak bilinen durumla karşılaşmasıdır (Bengio vd., 1994). Bu problem, ağın geçmiş zaman adımlarına ait bilgileri geri yayılım sürecinde yeterince öğrenememesine neden olur; çünkü gradyanlar zaman içinde geriye doğru ilerlerken üstel biçimde küçülür ve ağ uzun dönemli ilişkileri hatırlamakta zorlanır. Bu nedenle klasik RNN yapıları, kısa dönemli ilişkileri öğrenebilirken uzun dönemli hidrolojik süreçlerdeki gecikmeli etkileri (örneğin bir yağışın günler sonra akıma dönüşmesi) yakalamakta yetersiz kalır.

LSTM ise bu sınırlamayı aşmak üzere geliştirilmiş özel bir mimaridir (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). LSTM hücresi içinde yer alan kapı mekanizmaları (gate mechanisms), bilginin hangi bölümünün tutulacağına, hangi bölümünün unutulacağına ve hangi bölümünün çıktıya aktarılacağına karar veren kontrol yapılarıdır (Gers vd., 2000). Bu yapılar sayesinde LSTM, bilgi akışını zaman içinde düzenli ve kontrollü şekilde yöneterek gradyan sönümlenmesi problemini büyük ölçüde azaltır. Böylece model, uzun dönemli bağımlılıkları koruyarak; mevsimsel akım döngüleri, gecikmeli yağış-akış ilişkileri veya kar erimesinin zamansal etkileri gibi hidrolojik süreçlerdeki karmaşık ilişkileri etkili biçimde öğrenir. Bu nedenle LSTM, akım tahmini gibi geçmiş verilerin sistem davranışını güçlü biçimde etkilediği problemlerde oldukça başarılı bir araç olarak kullanılmaktadır (Hochreiter & Schmidhuber, 1997).

Bu bağlamda LSTM tabanlı modeller, son yıllarda akım tahmini ve yağış–akış modellemesi alanında yaygın olarak kullanılmakta; özellikle farklı havza ölçeklerinde, günlük ve saatlik zaman adımlarında, klasik yapay sinir ağları ve istatistiksel yöntemlere kıyasla daha yüksek tahmin doğruluğu sağladığı birçok çalışmada gösterilmektedir (Kratzert vd., 2018; Kratzert vd., 2019). Literatürde LSTM'nin hem büyük ölçekli havzalarda hem de veri sınırlı koşullarda akım sürekliliğini ve taşkın hidrograflarının zamansal evrimini başarıyla temsil edebildiği tespit edilmiştir (Shen, 2018; Feng vd., 2020).

Akım tahmininin yanı sıra taşkın tahmini ve erken uyarı sistemleri de LSTM ve benzeri veri odaklı modellerden önemli ölçüde yararlanmaktadır. Taşkınlar, ani gelişen ve yüksek hasar potansiyeli taşıyan doğa olayları olduğu için kısa vadeli ve doğru akım tahmini toplum güvenliği açısından hayati rol oynar. Makine öğrenmesi yöntemleri, gözlem istasyonlarından elde edilen gerçek zamanlı veri akışlarını kullanarak taşkın oluşumunu önceden işaret eden eğilimleri yakalayabilmekte ve tahmin doğruluğunu artırabilmektedir (Mosavi vd., 2018). Bu bağlamda LSTM modelleri, hem akım sürekliliğinin hem de ani yükselişlerin karakterize edildiği taşkın hidrograflarını öğrenme konusunda umut verici sonuçlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, akım tahmini problemi için makine öğrenmesi tabanlı LSTM yöntemi ele alınarak; veri hazırlığı, model kurulumu, eğitim (train)–doğrulama (validation)-test verilerinin düzenlenmesi ve son olarak da performans analizi adımları anlatılmaktadır. Son bölümde ise geliştirilen model ile elde edilen bir debi hidrografı sunularak yöntemin hidrolojik uygulamalardaki potansiyeli tartışılmaktadır.

2 Makine Öğrenmesi Metoduna Genel Bir Bakış

2.1 Makine Öğrenmesi Nedir?

Makine öğrenmesi (Machine Learning); bilgisayar sistemlerinin, mevcut verilerdeki örüntüleri ve ilişkileri öğrenerek tahmin veya sınıflandırma yapmasını sağlayan yöntemler bütünüdür (Mitchell, 1997). Geleneksel algoritmalar belirli kuralların kullanıcı tarafından tanımlanmasını gerektirirken, makine öğrenmesi yöntemleri sistemin bu kuralları doğrudan veriden çıkarmasını amaçlar. Bu nedenle karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkilere sahip süreçlerin modellenmesinde son yıllarda giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Makine öğrenmesi genel olarak üç ana öğrenme yaklaşımı altında incelenir:

- **Denetimli öğrenme (supervised learning)**: Giriş–çıkış çiftlerinin bilindiği veri setleri kullanılır. Akım tahmini gibi problemlerde; yağış, sıcaklık, buharlaşma vb. veriler giriş, akım değerleri ise çıktı olarak kullanılır.
- **Denetimsiz öğrenme (unsupervised learning)**: Model yalnızca giriş verilerine dayanarak veri içindeki yapıları ve kümeleri keşfetmeye çalışır. Hidrolojide veri kümeleme ve benzer hidrolojik yılların belirlenmesi gibi amaçlarla kullanılır.
- **Pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning)**: Model, çevresi ile etkileşime girerek ödül–ceza mekanizmasına göre karar verme sürecini öğrenir. Su dağıtım sistemlerinin optimizasyonunda kullanıldığı örnek çalışmalar mevcuttur (Sutton & Barto, 2018).

Bu çalışma kapsamında akım tahmini için kullanılan yöntem denetimli öğrenme sınıfına girmektedir.

2.2 Yaygın Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Makine öğrenmesi, farklı veri türleri ve modelleme ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilmiş geniş bir yöntem yelpazesine sahiptir. Bu yöntemler hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilme kapasiteleri sayesinde hidrolojik süreçlerin modellenmesinde sıkça tercih edilmektedir. En temel makine öğrenmesi yöntemlerinden biri regresyon modelleridir. Doğrusal regresyon, değişkenler arasındaki ilişkilerin belirli bir doğrusal denklem ile ifade edildiği basit bir yöntemdir; ancak hidrolojide karmaşık etkileşimlerin yaygın olması nedeniyle çoğu durumda doğrusal olmayan regresyon, polinom regresyon veya kernel tabanlı regresyon gibi daha gelişmiş türleri kullanılmaktadır (Mitchell, 1997).

Bir diğer önemli yöntem grubu karar ağaçlarıdır (decision trees). Karar ağaçları, veriyi belirli kurallara göre dallara ayırarak tahmin yapan hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Yorumlanabilirliği yüksek olduğundan mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılır; ancak tek bir karar ağacı çoğu zaman aşırı öğrenme (overfitting) sorununa eğilimlidir. Bu nedenle rastgele orman (Random Forest, RF) gibi topluluk yöntemleri geliştirilmiştir. Rastgele orman, çok sayıda karar ağacının oluşturduğu bir topluluk yapısı olup, her ağacın farklı veri alt örnekleri ve değişken alt kümeleri ile eğitilmesi sayesinde daha dengeli ve genellenebilir sonuçlar üretir (Breiman, 2001). Hidrolojik tahmin çalışmalarında rastgele ormanlar, özellikle girdiler arasında doğrusal olmayan ilişkilerin yoğun olduğu durumlarda başarılı performans göstermektedir.

Makine öğrenmesinde yaygın kullanılan bir diğer yöntem ise Destek Vektör Makineleri (SVM, Support Vector Machines)'dir. SVM, veriyi en iyi ayıran veya açıklayan hiper düzlemi bulmayı amaçlar ve özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde güçlü bir performans sergiler. Kernel fonksiyonlarının (radial basis,

polynomial vb.) kullanılması, yöntemin doğrusal olmayan ilişkileri de etkili biçimde modelleyebilmesini sağlar (Cortes & Vapnik, 1995). Akım tahmini, buharlaşma tahmini ve yağış sınıflandırma gibi birçok hidrolojik problemde SVM tabanlı modellerin başarılı sonuçlar verdiği bilinmektedir.

Bu yöntemlerin yanında k-en yakın komşu (kNN), yapay sinir ağları (ANN) ve gradyan artırma yöntemleri (Gradient Boosting, XGBoost) gibi modeller de yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle boosting algoritmaları, hata azaltma performansları ve yüksek tahmin doğrulukları nedeniyle hidrolojik literatürde giderek daha fazla yer bulmaktadır. Bu çalışmada akım tahmini amacıyla yalnızca LSTM modelinin kullanılmasının temel nedeni, LSTM'nin hidrolojik zaman serilerinde yaygın olarak karşılaşılan gecikmeli ve uzun dönemli bağımlılıkları diğer klasik makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla daha etkin biçimde temsil edebilmesidir. ANN, RF ve SVM gibi yöntemler, güçlü doğrusal olmayan modelleme kapasitelerine sahip olmakla birlikte, zaman bilgisini genellikle gecikmeli girişler veya öznitelik mühendisliği yoluyla dolaylı olarak modele dahil etmektedir. Buna karşın LSTM mimarisi, bellek hücreleri ve kapı mekanizmaları sayesinde geçmiş zamandaki bilgiyi doğrudan ve dinamik biçimde taşıyabilmekte; böylece yağış-akış dönüşümünde görülen gecikmeler, mevsimsel döngüler ve hidrografın zamansal evrimi daha tutarlı biçimde öğrenilebilmektedir (Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Gers vd., 2000). Literatürde LSTM'nin akım tahmini ve taşkın öngörüsü gibi hidrolojik uygulamalarda ANN, RF ve SVM gibi yöntemlere kıyasla özellikle zamansal genelleme başarısı açısından üstünlük sağladığını gösteren çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Mosavi vd., 2018; Song vd., 2020). Bu çalışmada farklı modeller arasında karşılaştırmalı bir analiz yapılmamış; bunun yerine, DSİ uygulamaları açısından zamansal sürekliliği yüksek, operasyonel olarak uygulanabilir ve literatürde başarısı kanıtlanmış bir yaklaşım olan LSTM modelinin ayrıntılı biçimde kurulması ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

2.3 Hidrolojik Uygulamalarda Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi yöntemleri hidroloji ve su kaynakları mühendisliğinde giderek daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Bu yöntemlerin öne çıktığı başlıca hidrolojik uygulamalar aşağıda özetlenmiştir:

- **Yağış-akış tahmini:** Havzalarda yağışın akıma dönüşüm süreçleri oldukça karmaşıktır. Makine öğrenmesi, doğrusal olmayan bu ilişkileri veri üzerinden öğrenebilme kapasitesi sayesinde literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Shamseldin, 1997).
- **Taşkın erken uyarı sistemleri:** Gerçek zamanlı izleme verileri ile makine öğrenmesi modellerinin bütünleştirilmesi, taşkın oluşumunu işaret eden ani değişimlerin tespit edilmesinde önemli bir avantaj sağlar. LSTM ve benzeri zaman serisi modelleri bu alanda yüksek doğruluklar sunmaktadır (Mosavi vd., 2018).
- **HES (Hidroelektrik Santral) işletme optimizasyonu:** Akım tahmini, hidroelektrik üretimin planlanması açısından kritik öneme sahiptir. Günlük veya saatlik akım tahminlerinin doğruluğunun artması, enerji üretim planlarının daha verimli yapılmasını sağlar (Solomatine & Ostfeld, 2008).
- **Su kalitesi ve buharlaşma modelleme:** Su sıcaklığı, çözünmüş oksijen, bulanıklık ve buharlaşma gibi dinamik süreçler de makine öğrenmesiyle modellenebilmektedir. Bu tür uygulamalarda klasik modellerin yoğun parametre gereksinimi yerine veri odaklı yaklaşımlar daha pratik çözümler sunmaktadır (Beven, 2001).

Bu uygulamalar, makine öğrenmesinin hidrolojide geniş bir yelpazede kullanılabilirliğini göstermektedir.

2.4 Neden Makine Öğrenmesi?

Makine öğrenmesi yöntemlerinin hidrolojide tercih edilmesinin temel nedenleri birkaç başlık altında özetlenebilir:

- **Karmaşık ve doğrusal olmayan süreçleri öğrenebilme kapasitesi:** Hidrolojik süreçlerde yağış, topografya, toprak nemi ve havza özellikleri gibi birçok değişken etkileşim hâlindedir. Bu ilişkilerin tümünü fiziksel olarak tanımlamak çoğu zaman mümkün değildir. Makine öğrenmesi, bu karmaşık ilişkileri doğrudan veriden öğrenebilme yeteneğine sahiptir (Solomatine & Ostfeld, 2008).
- **Fiziksel modele ihtiyaç duymadan veri üzerinden tahmin yapabilme:** Fizik tabanlı modeller yüksek sayıda parametre gerektirebilir, kalibrasyon süreci zaman alıcı olabilir ve eksik veri koşullarında başarısı düşebilir. Makine öğrenmesi ise fiziksel süreçlere dair detaylı kabullere gerek duymadan veri üzerinden tahmin üretir (Beven, 2001).

- **Zamansal bağımlılıklara uygun algoritmaların varlığı:** Hidrolojik zaman serileri mevsimsellik, trend, ani yükselişler ve gecikmeli ilişkiler içerir. LSTM gibi zaman serisi odaklı yapılar, uzun dönemli bağımlılıkları öğrenebilme kapasiteleri sayesinde akım tahmini ve taşkın tahmini gibi uygulamalarda önemli üstünlük sağlamaktadır (Hochreiter & Schmidhuber, 1997).

Sonuç olarak makine öğrenmesi, hidrolojik süreçlerin karmaşık ve dinamik yapısını temsil etmek için güçlü bir alternatif modelleme yaklaşımı sunmaktadır.

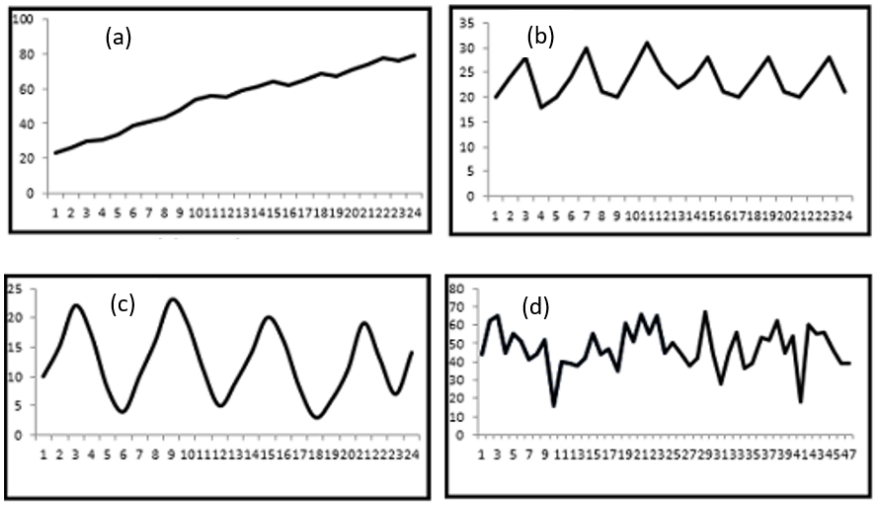
3 Zaman Serileri ve LSTM Modeli

3.1 Zaman Serilerinin Yapısı

Hidrolojik zaman serileri; mevsimsellik, trend, ani değişimler, yüksek akım olayları, kurak (düşük akım) dönemleri gibi birçok bileşeni aynı anda barındıran karmaşık veri dizileridir. Örneğin bir nehirde ilkbahar–yaz aylarında kar erimesiyle artan akım değerleri belirgin bir mevsimsellik oluştururken, ani sağanak yağışlar kısa süreli fakat yüksek debili piklere neden olabilir (Box & Jenkins, 1976).

Bu nedenle zamanı dikkate almayan klasik regresyon modelleri bu tür karmaşık örüntüleri yeterince temsil edemez. Regresyon modelleri çoğunlukla doğrusal varsayımlar içerdiği için gecikmeli etkileri, ani değişimleri ve mevsimsel döngüleri yakalamada yetersiz kalmaktadır (Beven, 2001). Hidrolojik süreçlerde yağış–akış dönüşümü, toprak nemi ve yeraltısuyu etkileşimleri gibi birçok süreç doğrusal olmayan yapıya sahip olduğundan zaman serisi modellerine ihtiyaç duyulur.

Aşağıdaki şekilde bazı zaman serilerine önekler verilmiştir (Şekil 1).

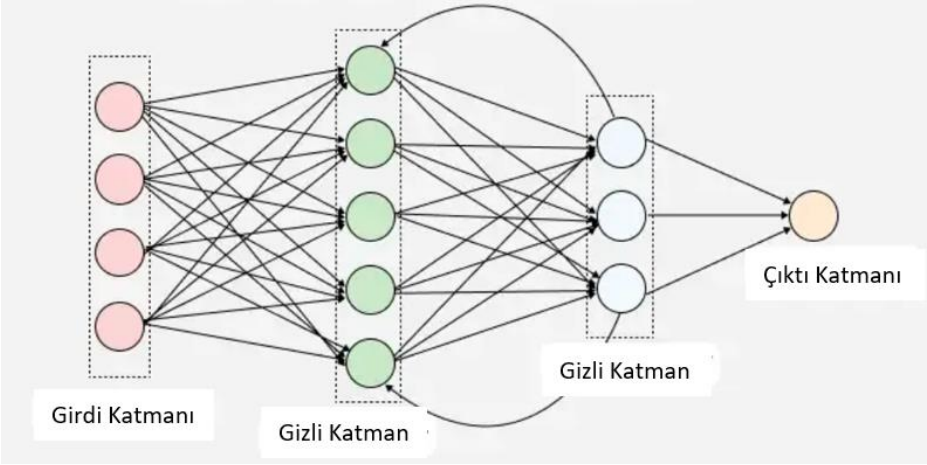


Şekil 1. Zaman serisi örnekleri; a) Trend, b) Mevsimsel, c) Döngüsel, d) Düzensiz

3.2 RNN (Tekrarlayan Sinir Ağı) Mantığı

Makine öğrenmesi yöntemlerinin temeli, tekrarlayan sinir ağı (RNN) mantığıdır. Zaman serilerinde ardışık veriler arasında doğal bir bağımlılık bulunduğundan, klasik yapay sinir ağları bu ilişkileri doğrudan temsil edemez. RNN'ler ise geçmiş bilgiyi ağ içinde dolaştırarak bir tür "zaman belleği" oluşturan ilk yapı olarak geliştirilmiştir. Bu nedenle LSTM mimarisinin neden ortaya çıktığını, hangi problemi çözdüğünü ve neden hidrolojik zaman serilerinde tercih edildiğini anlamak için RNN yaklaşımının temel prensiplerinin anlaşılması önemlidir.

RNN, zaman serilerini modellemek için geliştirilmiş yapılardır. RNN'in temel fikri, bir zaman adımındaki gizli durumun (hidden state) bir sonraki adıma aktarılmasıdır (Şekil 2). Böylece model, geçmişten gelen bilgiyi bir "hafıza" şeklinde taşır (Rumelhart vd., 1986).



Şekil 2. Tekrarlayan Sinir Ağı

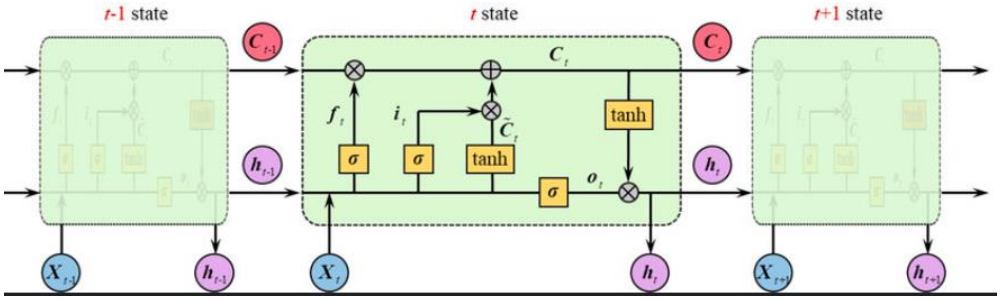
Ancak klasik RNN'ler, eğitim sırasında ortaya çıkan vanishing gradient (gradyan sönümlenmesi) problemi nedeniyle uzun dönemli bağımlılıkları öğrenmekte zorlanır (Bengio vd., 1994). Bu durumda, modele uzak geçmişten gelen bilgi, gradyanların yok olması nedeniyle etkisiz hale gelir. Hidrolojik zaman serilerinde ise özellikle mevsimsel döngüler, kar erimesi gecikmesi, bir yağışın günler sonra akıma etkisi gibi uzun dönemli ilişkilere ihtiyaç duyulduğundan RNN çoğu zaman yeterli değildir.

3.3 LSTM'nin Özellikleri

LSTM, RNN'lerde görülen uzun dönemli bağımlılık problemlerini çözmek üzere geliştirilmiş gelişmiş bir mimaridir (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). LSTM hücresi, bilgi akışını kontrol eden üç kapı mekanizmasına sahiptir. Bu kapılar sayesinde LSTM, klasik RNN'lere göre çok daha güçlü bir uzun dönemli bellek oluşturarak hidrolojik süreçlerin temel karakteristiklerini öğrenebilir.

- **Unutma kapısı (forget gate)**: Hücredeki mevcut bilginin hangisinin korunacağına veya silineceğine karar verir.
- **Giriş kapısı (input gate)**: Yeni bilginin hücre durumuna ne ölçüde dahil edileceğini belirler.
- **Çıkış kapısı (output gate)**: Hücre belleğinin hangi kısmının bir sonraki zaman adımına aktarılacağına karar verir (Gers vd., 2000).

LSTM hücresinde yer alan kapı mekanizmaları bilgi akışını düzenleyen temel bileşenlerdir. Unutma kapısı (forget gate, f_t), σ (sigma) aktivasyon fonksiyonu ile gösterilen ve önceki hücre durumunun (C_{t-1}) ne kadarının korunacağına karar veren yapıdır. Giriş kapısı (input gate, i_t) ise iki parçadan oluşur: σ fonksiyonu ile gösterilen ve yeni bilginin ne kadarının kabul edileceğini belirleyen i_t bileşeni ve tanh fonksiyonu ile üretilen aday hücre durumu $\tilde{C}_t$. Çıkış kapısı (output gate, o_t), tanh (C_t) ile çarpılan sigma düğümüyle tanımlanır ve hücre durumunun ne kadarının çıktı olarak (h_t) aktarılacağını belirler. Tüm bu mekanizmaların üzerinde çalıştığı hücre durumu (cell state, C_t), şeklin ortasından yatay şekilde uzanan kalın çizgi ile gösterilir ve LSTM'nin uzun dönemli belleğini taşıyan temel yapıdır (Şekil 3).



Şekil 3. LSTM bellek hücresinin iç yapısı (Song vd., 2020)

LSTM'nin akım tahmini için uygun olmasının temelinde, hidrolojik süreçlerde sıkça karşılaşılan zamansal bağımlılıkları etkili biçimde öğrenebilme yeteneği bulunmaktadır. Akarsularda yağışın akışa dönüşmesi çoğu zaman gecikmeli gerçekleştiği için LSTM, bu gecikmeli yağış etkilerini bellek yapısı sayesinde modelleyebilir. Aynı şekilde mevsimsellik ve uzun dönemli döngüler gibi hidrolojik zaman serilerinin karakteristik bileşenleri de LSTM'nin hücre yapısında tutularak temsil edilebilir. LSTM, ani yükselen pik akımlar ile taşkın hidrografları gibi hızlı değişen olayları da klasik istatistiksel modellere kıyasla daha başarılı bir şekilde yakalayabilmektedir. Ayrıca hidrolojik gözlem verilerinin çoğu zaman gürültülü, eksik veya düzensiz olması, LSTM'nin bu tür veri koşullarında dahi kararlı tahminler üretebilme avantajını ön plana çıkarmaktadır (Mosavi vd., 2018).

3.4 LSTM Modelinin Girdi (Input) Yapısının Oluşturulması

LSTM modelleri zaman serilerindeki ardışık bağımlılıkları değerlendirebildiğinden, modelin uygun şekilde eğitilebilmesi için girdi verilerinin belirli bir pencere yapısına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada pencere yapısı oluşturulurken gecikmeli girişler (lag-1, lag-3, lag-7) kullanılmıştır. Böylece yağışın akıma dönüşme sürecindeki doğal zaman gecikmesi modele yansıtılmıştır. Başka bir ifadeyle, model her günün tahminini yaparken geçmiş 1, 3 ve 7 günün verilerini aynı anda giriş olarak kullanmış ve yağış–akış ilişkisini bu gecikmelerle birlikte öğrenmiştir.

LSTM tek bir günün değerini değil, bir zaman aralığını birlikte değerlendirerek çalıştığı için veriler üç boyutlu bir yapıya dönüştürülmüştür. Bu kapsamda her bir eğitim örneği "zaman penceresi × değişken sayısı" biçiminde modele aktarılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde model, akım değerlerini yalnızca anlık girişlere göre değil, günler boyunca biriken hidrolojik sürecin eğilimine göre öğrenebilmiştir.

3.5 Model Mimarisinin Tanımlanması

Model, ardışık zaman adımlarından öğrenebilmek amacıyla Sequential yapı kullanılarak oluşturulmuştur. LSTM katmanları, veri setinin karmaşıklığı ve havza dinamiklerinin öğrenilmesi dikkate alınarak belirlenmiştir. İlk LSTM katmanı 128 bellek hücresi ile yapılandırılmış olup, *"return_sequences=True"* parametresi kullanılarak bir sonraki LSTM katmanına zaman bilgisi aktarılmıştır. Modelin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimini azaltmak amacıyla her LSTM katmanından sonra %40 oranında Dropout uygulanmıştır.

Tam bağlantılı bir Dense katmanı (32 nöron, ReLU aktivasyon fonksiyonu) modelin son çıkıştan önce daha soyut bir temsil öğrenmesini sağlamıştır. Etkinliği kanıtlanmış bir optimizasyon algoritması olan Adam kullanılmış ve öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. Adam, parametre güncellemelerinde adaptif öğrenme adımları kullanarak modelin hem hızlı hem de kararlı şekilde yakınsamayı gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır. Model kayıp fonksiyonu olarak Ortalama Kare Hatası (MSE) kullanılmıştır.

Modelin eğitimi sırasında aşırı öğrenmeyi engellemek ve gereksiz epoch çalışmasını önlemek amacıyla Early Stopping mekanizması uygulanmıştır. Bu teknikte, doğrulama kaybında iyileşme görülmediğinde eğitim otomatik olarak durdurulmaktadır. Bu çalışmada *"patience"* değeri 50 olarak seçilmiş, yani model 50 epoch boyunca gelişme göstermediği takdirde eğitim sonlandırılmış ve en iyi doğrulama skoruna sahip ağırlıklar geri yüklenmiştir. Model toplamda 500 epoch eğitim olanağına sahip olmakla birlikte, erken durdurma sayesinde eğitim süresi optimize edilmiştir.

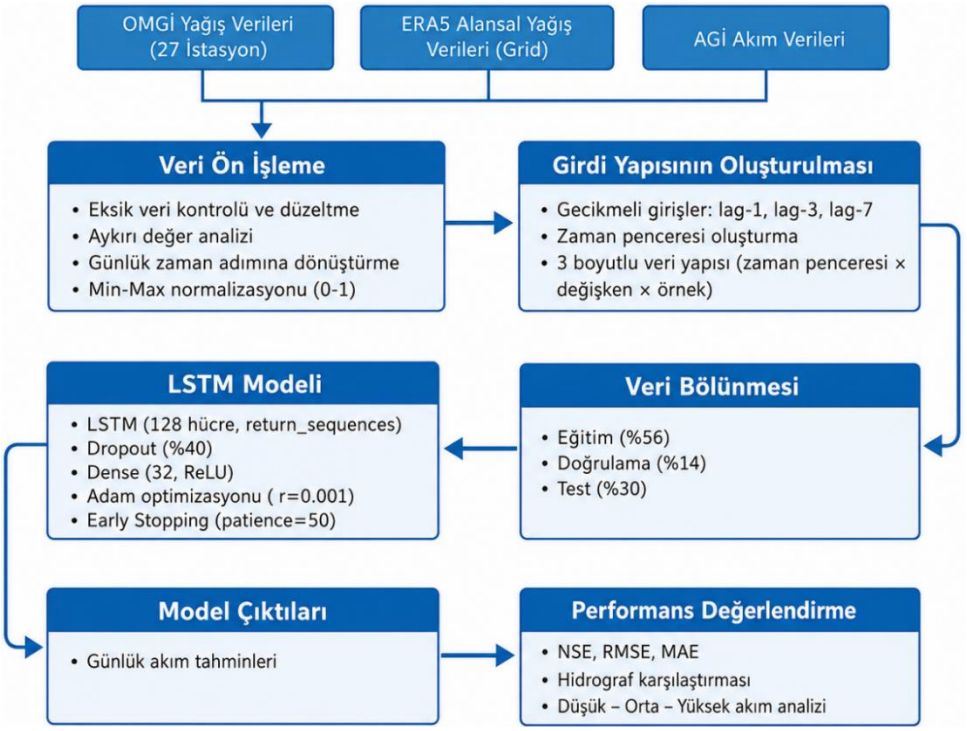
3.6 Performans Değerlendirme

Model performansı hem eğitim sürecinde hem de test döneminde çeşitli hata metrikleri ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE) kullanılmıştır; NSE değeri 1'e yaklaştıkça modelin gözlenen akımı daha doğru temsil ettiği kabul edilir. Bunun yanında hata büyüklüklerini değerlendirmek amacıyla Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) hesaplanmıştır. RMSE büyük hatalara daha duyarlı olduğu için modelin yüksek debili dönemlerdeki başarısını ortaya koyarken, MAE gözlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki ortalama farkı gösteren daha dengeli bir metriktir.

Modelin gerçek performansı, test döneminde gözlenen akım serisi ile tahmin edilen akım serisinin karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiş; hidrograflar üzerinden modelin yüksek akım dönemlerini, ani değişimleri ve düşük akım koşullarını yakalama kapasitesi analiz edilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında,

düşük, orta ve yüksek akım rejimlerinin daha sistematik biçimde incelenebilmesi amacıyla, test döneminde gözlenen en düşük ve en yüksek akım değerleri arasındaki aralık üç eşit bölüme ayrılmış; alt üçte birlik kısım düşük akım, orta bölüm orta akım ve üst üçte birlik kısım ise yüksek akım rejimi olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde modelin hem taşkın hem de kurak dönemlerdeki davranışı bütüncül ve karşılaştırılabilir bir çerçevede ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan veri seti, ön işleme adımları, model yapısı ve performans değerlendirme süreci Şekil 4'te verilen iş akışı şeması ile özetlenmiştir.

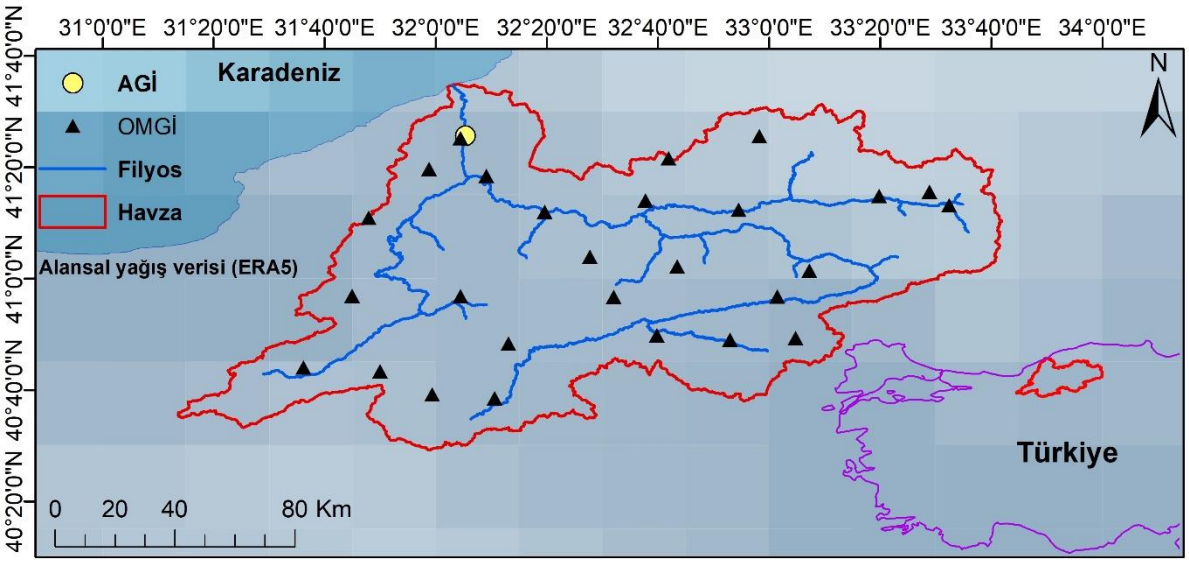


Şekil 4. LSTM tabanlı akım tahmini çalışmasında izlenen veri ve modelleme iş akışı

4 Veri Seti ve Ön İşleme

4.1 Kullanılan Veri Türleri

Bu çalışmada LSTM tabanlı akım tahmini modeli, havza alanı 13.353 km^2 olan Filyos Çayı'na ait günlük gözlem verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Filyos havzası, Ülkemizin kuzey batısında yer alan Batı Karadeniz havzası içerisinde yer almaktadır (Şekil 5). Veri seti olarak 2016-2020 yılları arasındaki beş yıllık dönem kullanılmıştır.



Şekil 5. Filyos Havzasının konumu ve istasyonlar

Modelde yağış verisi olarak iki farklı veri kaynağı birlikte değerlendirilmiştir. ERA5 ve OMGİ verileri için herhangi bir ön alansal veya zamansal ortalama işlemi uygulanmamıştır. Alansal ERA5 verileri matris yapısı korunarak, noktasal OMGİ verileri ise düzenli zaman serisi formatında ve birlikte doğrudan LSTM modeline girdi olarak verilmiştir. Bu yaklaşımda, farklı veri kaynaklarından gelen mekânsal ve noktasal bilgilerin temsilinin ön işlem aşamasında sadeleştirilmesi yerine, modelin bu veriler arasındaki ilişkileri kendi öğrenme mekanizması aracılığıyla algılaması hedeflenmiştir. Akım verisi olarak da havza çıkışındaki Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) kullanılmıştır.

(1) **Noktasal hidro-meteorolojik veriler (Otomatik meteoroloji gözlem istasyonu, OMGİ)**: Havza içerisinde yer alan ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen 27 adet OMGİ'den (Şekil 5) günlük toplam yağış verisi alınmıştır (mm).

(2) **Alansal yağış verileri (ERA5):** Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) tarafından üretilen ve çözünürlüğü 0.25° × 0.25° olan ERA5 yeniden analiz veri setinden elde edilmiş ve çalışma alanına giren 34 adet gridin (Şekil 5) günlük yağış verileri kullanılmıştır (mm).

(3) **Akım verisi:** Havza çıkışındaki, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından işletilen E13A035 numaralı AGİ'den (Şekil 5) alınan günlük akım ölçümleri kullanılmıştır (m^3/s).

Noktasal ve alansal verilerin birlikte kullanılması, yağış-akış ilişkisinin hem yerel hem de bölgesel bileşenlerinin modele yansıtılmasını sağlamaktadır. Böylece model, yalnızca tek bir istasyona bağlı ölçümlere kıyasla daha geniş mekânsal kapsamı temsil edebilmekte ve havza yanıtlarını daha bütüncül biçimde öğrenebilmektedir.

4.2 Veri Temizliği

Ham verilerin doğrudan modele verilmesi genellikle hatalı sonuçlara yol açtığından, veri seti üzerinde çeşitli ön işleme adımları uygulanmıştır. Öncelikle, OMGİ ve AGİ'den elde edilen zaman serilerinde eksik veri kontrolü yapılmış, kısa süreli boşluklar lineer enterpolasyon yöntemiyle doldurulmuştur. Uzun süreli eksiklik içeren istasyonlar ise model performansını olumsuz etkilememesi için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Ayrıca, ölçüm hatalarından veya sensör arızalarından kaynaklanabilecek aykırı değerler tespit edilmiş ve ilgili değerler fiziksel tutarlılık sınırları dikkate alınarak düzeltilmiştir. ERA5 yağış verileri için de benzer kalite kontrol adımları uygulanmış, grid değerleri ile OMGİ istasyon verileri arasında önemli tutarsızlıklar gözlendiğinde gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Bu aşama, modelin yalnızca güvenilir veri üzerinden öğrenmesini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

4.3 Normalizasyon

Makine öğrenmesi ve özellikle derin öğrenme yaklaşımlarında girdi değişkenlerinin farklı ölçeklerde olması, eğitimi olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle tüm noktasal ve alansal değişkenler modele verilmeden önce 0-1 aralığına ölçeklenen min-maks normalizasyonu ile dönüştürülmüştür. Bu yöntem, özellikle yağış ve akım gibi farklı büyüklükteki değişkenlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesini sağlamakta ve modelin gradyan tabanlı optimizasyon süreçlerinde daha hızlı ve kararlı şekilde öğrenmesine katkı sunmaktadır.

Modelin geleceği bilmeden öğrenmesini sağlamak için normalizasyon katsayıları yalnızca eğitim dönemindeki minimum ve maksimum değerlere göre hesaplanmıştır. Eğer normalizasyon tüm veri seti (eğitim + test) kullanılarak yapılırsa, test dönemine ait bilgiler eğitim aşamasında modele sızmış olur. Örneğin, test dönemindeki en yüksek akım değerini bilip buna göre bir ölçekleme yapmak, modele geleceğe dair ipucu vermek anlamına gelir. Böylece model, "bilmemesi gereken" geleceğe ait bilgiyi dolaylı olarak öğrenmiş olur. Bu duruma veri sızıntısı (data leakage) denir ve modelin güvenilirliğini önemli ölçüde azaltır.

4.4 Eğitim - Doğrulama - Test Ayrımı

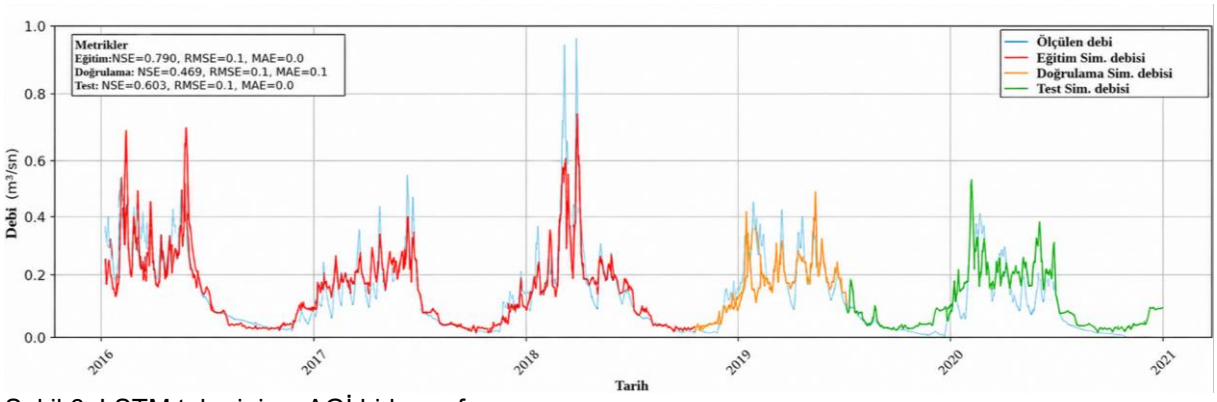
Model, eğitim aşamasında veri seti kronolojik sırayı koruyacak şekilde iki ana bölüme ayrılmıştır: ilk %70'lik kısım eğitim (train)–doğrulama (validasyon), son %30'luk kısım ise test dönemi olarak kullanılmıştır. Zaman serilerinde rastgele veri karıştırılması bağımlılığı bozacağından, veri ayrımı tamamen ardışık zaman düzeni korunarak yapılmıştır. Eğitim döneminin %20'si (toplam veri setinin %14'ü) validasyon verisi olarak ayrılmıştır. Validasyon verisi, modelin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimini izlemek ve eğitim sürecinde hiperparametre ayarlarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Test döneminde ise modelin daha önce hiç görmediği veriler üzerindeki gerçek tahmin gücü değerlendirilmiştir.

Model performansını ölçmek amacıyla Nash–Sutcliffe Etkinlik Katsayısı (NSE) amaç fonksiyonu olarak seçilmiş; bunun yanında Hata Karekök Ortalama Hatası (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) gibi ek değerlendirme metrikleri de analiz edilmiştir. Bu metriklerin hesaplanması ve yorumlanması Bölüm 5'te model performansı kapsamında ayrıntılı şekilde sunulacaktır.

5 Sonuç ve Öneriler

5.1 LSTM Modeli ile Üretilen Hidrograf

Şekil 6'da verilen hidrograf, Filyos Havzası için geliştirilen LSTM modelinin eğitim, doğrulama ve test dönemlerinde ürettiği akım tahminleri ile gözlenen akımların (ölçülen debi) karşılaştırmasını göstermektedir. Akım değerleri 0-1 aralığına normalize edilmiş olup, 1.0 değeri 400 m³/s debiye karşılık gelmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. LSTM tahmini ve AGİ hidrografı

Hidrograf incelendiğinde modelin özellikle orta debi rejimlerinde oldukça yüksek uyum sağladığı görülmektedir. Akım artış ve azalış eğilimleri, mevsimsel döngüler ve düşük akım dönemleri LSTM tarafından güçlü biçimde temsil edilmiştir. Eğitim döneminde (Eğitim simülasyon debisi, mavi çizgi) elde edilen NSE = 0.790, modelin havza davranışını başarılı şekilde öğrendiğini göstermektedir. Doğrulama

döneminde (Doğrulama simülasyon debisi, turuncu çizgi) NSE'nin 0.469'a düşmesi, modelin aşırı öğrenmeye karşı duyarlı olduğunu ancak erken durdurma tekniği sayesinde bu eğilimin kontrol altında tutulduğunu göstermektedir. Test döneminde (Test simülasyon debisi, yeşil çizgi) NSE'nin 0.603 seviyesine yükselmesi, modelin yeni verilerde de tatmin edici genelleme sağladığını doğrulamaktadır.

Yüksek akım pikleri de ayrıca değerlendirilmiş ve en yüksek beş pik olayı özelinde yapılan değerlendirmede, modelin pik büyüklüklerinde ortalama mutlak sapması yaklaşık %25 düzeyinde kaldığı görülmüştür. Çalışma dönemi içerisindeki en yüksek gözlenen pik incelendiğinde; gözlenen değer 380 m^3/s debiye karşılık gelirken, aynı olay için model tahmini 232 m^3/s olarak okunmuştur. Bu da; modelin, gözlenen değeri yaklaşık %39 oranında düşük tahmin ettiğini göstermektedir. Buna karşın bazı piklerde model gözlenen değerlere oldukça yakın sonuçlar üretmiş, özellikle 2016 yılındaki belirgin piklerde sapma düşük kalmıştır. Genel olarak LSTM modelinin yüksek akım olaylarının zamanlamasını ve hidrograf üzerindeki yükselme-azalma eğilimini yakaladığı, ancak pik debi büyüklüklerinde olaydan olaya değişen sapmalar ürettiği görülmektedir. Bu sapmaların günlük veri çözünürlüğü, yağışın havza içindeki mekânsal heterojenliği ve ekstrem olayların sınırlı sayıda temsil edilmesiyle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.

5.2 Modelin Güçlü ve Zayıf Yönleri

LSTM modelinin güçlü yönleri arasında, uzun dönemli bağımlılıkları öğrenme kapasitesi sayesinde mevsimsellik ve düşük akım rejimlerini başarılı bir biçimde temsil edebilmesi öne çıkmaktadır. Model; özellikle orta debi koşullarında hem eğitim hem test dönemlerinde yüksek uyum sağlamış, düşük ve yüksek akım koşullarında da umut verici sonuçlar üretmiştir. Ayrıca OMGİ ve ERA5 gibi farklı kaynaklardan elde edilen veri türlerinin aynı model içerisinde etkin biçimde işlenebilmesi, LSTM'nin karmaşık ve çok kaynaklı hidrolojik veri setleriyle uyumlu çalışabildiğini göstermektedir.

Buna ek olarak LSTM modelinin önemli bir avantajı, fiziksel tabanlı modellerde gerekli olan kapsamlı kalibrasyon süreçlerine ihtiyaç duymadan hızlı bir şekilde kurulabilmesidir. Model veri odaklı bir yaklaşım izlediğinden, fiziksel parametre ayarlamaları veya kapsamlı hassasiyet analizlerine gerek duyulmamakta; böylece eğitim süreci klasik hidrolojik modellere kıyasla çok daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Ayrıca ağ mimarisinin esnek yapısı, farklı veri türlerinin (noktasal veya alansal) kolayca modele entegre edilebilmesini mümkün kılarak uygulama hızını ve pratikliğini artırmaktadır.

Modelin zayıf yönleri, özellikle yüksek pik akımların büyüklüğünü tahmin etmede oransal olarak bir miktar düşük kalmasıdır. Ani ve kısa süreli yoğun yağışların neden olduğu hızlı akım yükselişlerinin büyüklüğü, günlük zaman çözünürlüğü kullanılması nedeniyle modele sınırlı ölçüde yansıyabilmekte; bu durum pik debilerin sönümlenmesine yol açabilmektedir. Bununla birlikte model, bu tür olayların zamansal oluşumunu ve hidrograf üzerindeki genel eğilimini büyük ölçüde doğru şekilde yakalayabilmiştir. Yüksek debi piklerinin büyüklük olarak düşük tahmin edilmesi; yağış verisinin havza içerisindeki mekânsal heterojenliğinin günlük ve grid tabanlı veri setleri ile tam olarak temsil edilememesi, zaman adımının saatlik yerine günlük olması ve veri setinin yalnızca beş yıllık bir dönemi kapsaması nedeniyle ekstrem olay örneklerinin sınırlı sayıda bulunması gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir. Bu eksikliklerin giderilebilmesi için; giriş veri çeşitliliğinin artırılması (yağışa ek olarak sıcaklık, buharlaşma, toprak nemi vb. değişkenlerin eklenmesi), veri seti süresinin uzatılması (on yıl veya daha fazla), veri setinin zamansal hassasiyetinin artırılması (saatlik) ve model mimarisinin daha hassas şekilde optimize edilmesi (LSTM bellek hücresi sayısı, dropout oranı, öğrenme oranı gibi parametrelerin farklı kombinasyonlarla test edilmesi) önerilmektedir.

5.3 DSİ Uygulamaları için Önerileri

Bu çalışma, LSTM tabanlı veri odaklı yöntemlerin DSİ tarafından yürütülen su yönetimi süreçlerine entegre edilebileceğini göstermektedir. Model özellikle şu alanlarda uygulanabilir niteliktedir:

- **Barajların işletme planları:** Günlük akım tahminleri rezerv yönetimini daha güvenilir hâle getirebilir.
- **Taşkın tahmini ve erken uyarı sistemleri:** Ani akım yükselişlerinin eğilimlerini yakalama kapasitesi, taşkın risk yönetimini destekler.
- **Enerji üretim planlaması:** Orta vadeli akım tahminlerinin doğruluğu, hidroelektrik üretim optimizasyonuna katkı sağlar.

- **Kuraklık yönetimi:** Düşük akım koşullarının başarılı temsil edilmesi, su tahsisi planlamalarında kullanılabilir.

5.4 Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürde LSTM tabanlı akım tahmini uygulamalarına ilişkin rapor edilen sonuçlarla genel olarak uyumludur. Özellikle mevsimsel akım değişimlerinin ve düşük-orta debi rejimlerinin başarılı biçimde temsil edilmesi, farklı havza ve iklim koşulları için yapılan önceki çalışmalarda bildirilen LSTM performanslarıyla örtüşmektedir (Kratzert vd., 2018; Feng vd., 2020). Bununla birlikte, yüksek debi piklerinin büyüklük olarak temsilinde bazı sınırlılıklar görülmüştür. Bu durum; günlük zaman çözünürlüğünün ani akım tepkilerini tam olarak yansıtamaması, yağışın havza içindeki mekânsal heterojenliğinin mevcut veri kaynaklarıyla sınırlı düzeyde temsil edilmesi ve ekstrem yüksek akım olaylarının veri setinde sınırlı sayıda bulunmasıyla ilişkilendirilebilir (Mosavi vd., 2018; Shen, 2018).

Çalışmanın önemli sınırlılıklarından biri, modelin yalnızca 2016-2020 dönemini kapsayan beş yıllık günlük veri seti ile geliştirilmiş olmasıdır. Bu veri uzunluğu, LSTM gibi veri güdümlü ve parametre sayısı görece yüksek derin öğrenme modellerinin farklı hidrolojik yılları, mevsimsel değişkenliği ve ekstrem akım olaylarını yeterli çeşitlilikte öğrenmesi açısından sınırlı kabul edilmelidir. Nitekim derin öğrenme tabanlı yağış-akış modelleme çalışmalarında daha uzun süreli ve/veya çok havzalı veri setlerinin kullanılması, modelin genelleme kapasitesini artıran önemli bir unsur olarak vurgulanmaktadır (Kratzert vd., 2018; Kratzert vd., 2019; Shen, 2018). Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen sonuçlar LSTM yaklaşımının Filyos Havzası için uygulanabilirliğini göstermesi bakımından umut verici olmakla birlikte, model performansının daha uzun gözlem dönemleri, farklı hidrolojik koşullar ve bağımsız veri setleri ile yeniden test edilmesi gerekmektedir.

Genel olarak LSTM modeli, Filyos Havzası için gerçekleştirilen akım tahmini uygulamasında başarılı sonuçlar vermiştir. Mevsimsel döngüleri doğru takip edebilmesi, düşük ve orta debi koşullarında yüksek doğruluk sağlaması ve eğitim-test dönemlerinde kabul edilebilir NSE değerlerine erişmesi modelin pratikte kullanılabilirliğini göstermektedir.

Modelin gelecekte geliştirilebilmesi için şu öneriler yapılabilir:

- Daha uzun veri setlerinin kullanılması,
- Saatlik veri ile çalışılması,
- Eğitim, doğrulama ve test periyotları zamansal olarak değiştirilerek farklı denemeler yapılması,
- Toprak nemi, sıcaklık, PET (Potansiyel buharlaşma) gibi ek hidrolojik değişkenlerin modele entegre edilmesi,
- Daha yüksek mekânsal çözünürlüklü yağış verilerinin (radar, GSMaP vb.) değerlendirilmesi,
- GRU, CNN-LSTM ve Transformer tabanlı zaman serisi modelleriyle karşılaştırmalı performans analizleri yapılması.

Sonuç olarak bu çalışma, LSTM'nin hidrolojik akım tahmini alanında yüksek potansiyele sahip olduğunu ve veri odaklı yöntemlerin DSİ tarafından yürütülen planlama ve işletme süreçlerinde etkin bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Etik Beyan, Katkı Belirtme ve Teşekkür: Bu çalışma, TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı kapsamında sağlanan destek ile Kaliforniya Üniversitesi, Irvine'da, Prof. Dr. Amir AghaKouchak danışmanlığında yürütülen araştırma faaliyetleri sırasında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, sağladığı finansal destek ve araştırma imkânları için TÜBİTAK'a; teknik destekleri için İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Mehmet Cüneyd Demirel'e ve Eskişehir Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Aynur Şensoy Şorman'a teşekkür eder. Çalışmada kullanılan akım gözlem istasyonu (AGİ) verileri Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nden, otomatik meteoroloji gözlem istasyonu (OMGİ) verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup, yazarlar veri desteği için her iki kuruma da teşekkürlerini sunar. Yazarlar açısından herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalenin bilimsel içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazarlara aittir. Yazarlardan Bahattin Avcuoğlu Yayın Kurulu üyesi olmakla birlikte, bu makalenin editoryal değerlendirme ve hakemlik süreçlerine herhangi bir katkısı ve bu süreçlerle

ilgili bilgisi olmamıştır. Derginin etik kuralları ve çift kör hakemlik sistemi bu makale için de titizlikle uygulanmıştır.

Yazarların Katkısı: Bu çalışmada tüm yazarlar eşit katkı sağlamıştır.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Avcuoğlu, M. B. (2023). *Fizik tabanlı tam yayılı hidrolojik modellerin kalibrasyonunda uydu tabanlı verilerin kullanılması* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İTÜ Polen Kurumsal Akademik Arşiv.

Bengio, Y., Simard, P., & Frasconi, P. (1994). Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult. *IEEE Transactions on Neural Networks*, *5*(2), 157–166. https://doi.org/10.1109/72.279181

Beven, K. J. (2001). *Rainfall-runoff modelling: The primer*. John Wiley & Sons.

Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1976). *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden-Day.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, *20*(3), 273–297. https://doi.org/10.1007/BF00994018

Feng, D., Fang, K., & Shen, C. (2020). Enhancing streamflow forecast and extracting insights using long short-term memory networks with data integration. *Water Resources Research*, *56*(9), Article e2019WR026793. https://doi.org/10.1029/2019WR026793

Gers, F. A., Schmidhuber, J., & Cummins, F. (2000). Learning to forget: Continual prediction with LSTM. *Neural Computation*, *12*(10), 2451–2471. https://doi.org/10.1162/089976600300015015

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, *9*(8), 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735

Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K., & Herrnegger, M. (2018). Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(11), 6005–6022. https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018

Kratzert, F., Klotz, D., Shalev, G., Klambauer, G., Hochreiter, S., & Nearing, G. (2019). Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(12), 5089–1110. https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019

Mitchell, T. (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.

Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K.-W. (2018). Flood prediction using machine learning models: A review. *Water*, *10*(11), Article 1536. https://doi.org/10.3390/w10111536

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, *323*(6088), 533–536. https://doi.org/10.1038/323533a0

Shamseldin, A. Y. (1997). Application of a neural network technique to rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, *199*(3–4), 272–294. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03332-5

Shen, C. (2018). A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists. *Water Resources Research*, *54*(11), 8558–8593. https://doi.org/10.1029/2018WR022643

Solomatine, D. P., & Ostfeld, A. (2008). Data-driven modelling: Some past experiences and new approaches. *Journal of Hydroinformatics*, *10*(1), 3–22. https://doi.org/10.2166/hydro.2008.025

Song, T., Ding, W., Wu, J., Liu, H., Zhou, H., & Chu, J. (2020). Flash flood forecasting based on long short-term memory networks. *Water*, *12*(1), Article 109. https://doi.org/10.3390/w12010109

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* (2nd ed.). MIT Press.

Dolusavak Kanallarında Kavitasyon Riskini Azaltmaya Yönelik Mineral Katkılı Beton Tasarımı: Ilısu Barajı Örneği

Mineral Admixture-Based Concrete Design for Mitigating Cavitation Risk in Spillway Chutes: A Case Study of the Ilısu Dam

Aydın SAĞLIK[1], İnan GÜNDÜZ[2], Hüseyin DEMİR[1]*

[1]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Ankara
[2]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, DSİ 1. Bölge Müdürlüğü, Bursa

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: huseyindemir@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 14.05.2026, Düzeltme (Revised): 26.06.2026, Kabul (Accepted): 02.07.2026

ÖZ

Barajlarda özellikle savak gibi yapılarda yüksek hızlı su akışına bağlı olarak gelişen kavitasyon erozyonu, yapı yüzeyinde ilerleyici hasara yol açan kritik bir mühendislik sorunudur. Bu çalışmada, maksimum akım hızının 35 m/s'ye ulaşabileceği ve bu hıza göre kavitasyon indeksinin σ = 0,18 olarak belirlendiği Ilısu Barajı dolusavak kanalında kavitasyon riskinin azaltılmasına yönelik mineral katkılı beton tasarımı, laboratuvar deneyleri ve saha uygulaması bir arada ele alınmıştır. Portland kompoze çimento, uçucu kül ve silis dumanı (Mikrosilika) kullanılarak oluşturulan üçlü bağlayıcı sistemde iki farklı kaynaktan temin edilen silis dumanı ile toplam 12 farklı karışım tasarımı incelenmiştir. Laboratuvar deneyleri kapsamında taze beton işlenebilirliği, sertleşmiş beton basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımı, elastisite modülü ile su geçirimsizliği belirlenmiş,bağlayıcı bileşimlerinin hidratasyon ısısı davranışı izotermal kalorimetre ile karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 90 günlük küp basınç dayanımı 54,6-73,1 MPa, 28 günlük yarmada çekme dayanımı 3,31-4,08 MPa ve elastisite modülü 32,7-36,0 GPa aralığında ölçülmüştür. Tüm karışımlarda C25/30 beton sınıfı için öngörülen hedef dayanım değeri aşılmıştır. Saha numunelerinden elde edilen maksimum su işleme derinliği değerleri geçirimsiz beton eşiğinin altında kalmıştır. Kullanılan uçucu kül ve silis dumanı kombinasyonu, hidratasyon ısısını referans çimentoya kıyasla belirgin bir biçimde azaltmış, saha ısılçift ölçümleri merkez-yüzey sıcaklık farkının şartname sınırını hiçbir kademede aşmadığını doğrulamıştır. Bütünleşik değerlendirme sonucunda 308,3 kg/m³ çimento, 46,3 kg/m³ uçucu kül ve 15,4 kg/m³ silis dumanından oluşan 370 kg/m³ toplam bağlayıcı dozajı ile 0,49 etkili su/çimento oranına sahip karışım belirlenmiş, bu karışımın saha 28 günlük küp basınç dayanımı 50,1 MPa ile C40/50 sınıfı gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür. Bu betonun 90 günlük sonucu ise 63 MPa civarında elde edilmiştir. Bulgular, uçucu kül ve silis dumanı içeren üçlü bağlayıcılı betonun kavitasyon riski yüksek dolusavak kanallarında uygun bir tasarım yaklaşımı olarak uygulanabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kavitasyon erozyonu, dolusavak kanalı, mikrosilika, uçucu kül, mineral katkılı, Ilısu Barajı

ABSTRACT

Cavitation erosion induced by high-velocity water flow in spillway chutes represents a critical engineering challenge that leads to progressive deterioration of concrete surfaces. This study presents a comprehensive investigation of the effects of mineral additives on the properties of concrete mix designs aimed at especially mitigating cavitation risk, laboratory testing, and field application for the spillway chute of Ilısu Dam, where the maximum flow velocity reaches 35 m/s and the cavitation index for this flow speed was determined as σ = 0.18. A ternary binder system comprising Portland composite cement, fly ash, and silica fume sourced from two different suppliers was evaluated through 12 mix designs. Fresh concrete workability, compressive

strength, splitting tensile and flexural strength, elastic modulus, and water impermeability were systematically determined in laboratory tests, while the heat of hydration behavior of the binder combinations was characterized by isothermal calorimetry. The 90-day cube compressive strengths ranged from 54.6 to 73.1 MPa, 28-day splitting tensile strengths from 3.31 to 4.08 MPa, and elastic moduli from 32.7 to 36.0 GPa. The target compressive strength for the C25/30 concrete class was exceeded in all mix designs. Maximum water penetration depths obtained from field specimens remained well below the impermeability threshold. The fly ash and silica fume combination significantly reduced the heat of hydration relative to the reference cement, and field thermocouple measurements confirmed that the center-to-surface temperature differential never exceeded the specification limit at any casting stage. Based on the integrated evaluation, the mix design comprising 308.3 kg/m³ cement, 46.3 kg/m³ fly ash, and 15.4 kg/m³ silica fume at a total binder content of 370 kg/m³ with an effective water-to-binder ratio of 0.49 was determined. The field 28-day cube compressive strength of this mix reached 50.1 MPa, satisfying the requirements of the C40/50 concrete class. The findings demonstrate the applicability of ternary-binder concrete incorporating fly ash and silica fume as a suitable design approach for spillway chutes with high cavitation risk.

Keywords: Cavitation erosion**,** spillway chute, silica fume, fly ash, mineral admixture concrete, Ilısu Dam

1 Giriş

Hidrolik yapılar, su kaynaklarının kontrol altına alınması, taşınması ve dağıtılması süreçlerinde temel işlevler üstlenen mühendislik yapılarıdır. Sulama, taşkın kontrolü, içme ve kullanma suyu temini ile hidroelektrik enerji üretimi gibi birbirinden farklı işlevleri tek bir yapı bünyesinde toplayabilen barajlar, su kaynaklarının uzun yıllar boyunca yönetilmesinde başvurulan başlıca yapılardır. Söz konusu yapıların tasarım ve işletme aşamalarında ortaya çıkabilecek herhangi bir eksiklik, yalnızca altyapısal kayıplarla sınırlı kalmayıp insan güvenliğini ve ekosistemi de doğrudan tehdit eden sonuçlar doğurabilmektedir. Hidrolik tasarım parametrelerinin ve işletme koşullarının optimizasyonu ile uygun malzeme seçiminin birlikte değerlendirilmesi, hasar riskini ve buna bağlı bakım gereksinimlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu anlayış, güvenli işletim, maliyet etkinliği ve sürdürülebilir altyapı yönetimi bakımından paydaşlara ve genel olarak topluma somut katkılar sağlamaktadır (Liu vd., 2024).

Barajların taşkın koşullarında zarar görmesini engellemek amacıyla dolusavaklar vazgeçilmez bir mühendislik bileşeni olarak öne çıkmaktadır. Rezervuarın maksimum depolama kapasitesine ulaşması durumunda fazla suyun güvenli biçimde tahliyesini sağlayan dolusavaklar, baraj güvenliğinin korunmasında merkezi bir işlev üstlenmektedir (Zanial vd., 2024). Herhangi bir baraj projesinin toplam maliyeti içinde önemli bir paya sahip olan bu yapıların bir kısmı yalnızca istisnai hidrolojik koşullarda ve tasarım debisinin çok altında çalışırken, diğerleri tasarım kapasitesine yakın değerlerde görece sık biçimde işletilmektedir (Kells ve Smith, 1991). Ancak iklim değişikliğiyle birlikte yağış rejimlerinde gözlemlenen köklü dönüşümler, ekstrem hidrolojik olayların sıklığını ve şiddetini artırmaktadır. Bu durum, havzalardaki taşkın debilerinin yükselmesine ve dolayısıyla mevcut barajlardaki dolusavak yapılarının daha yoğun işletme koşullarına maruz kalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle dolusavak güvenliği ve performansı, su yapıları mühendisliği açısından giderek daha kritik bir öneme kavuşmaktadır.

Kavitasyon erozyonu, dolusavak yapılarının beton dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını tehdit eden en kritik mühendislik sorunlarının başında gelmektedir. Dolusavak kanalı boyunca gerçekleşen yüksek hızlı su akışı sırasında yerel basıncın buhar basıncına kadar düşmesiyle oluşan buhar kabarcıklarının yüzey yakınında ani olarak çökmesi kavitasyon erozyonuna yol açmaktadır. Söz konusu süreç, pek çok taşkın tahliye yapısında beton yüzeyinde aşamalı bir bozunma biçiminde kendini göstermektedir. Yüksek barajların sayısındaki artışa bağlı olarak tahliye yapılarında gözlemlenen akım hızlarının yükselmesi ve iklim değişikliğiyle birlikte gelen öngörülemezlik dolusavak betonlarının kavitasyon erozyonuna karşı direncini zorlamakta ve hasar riskini artırmaktadır (Lu vd., 2023; Li vd., 2025). Çin'de taşkın tahliye ve enerji sönümleme yapılarının yaklaşık %70'inin erozyon, oyulma ve kavitasyon erozyonu gibi çeşitli hasar mekanizmalarına maruz kaldığı tespit edilmiş olup bu hasar türleri arasında kavitasyon erozyonunun payının yaklaşık %32,8 düzeyinde olduğu belirlenmiştir (National Energy Administration, 2021). Kavitasyona karşı alınan önlemler iki ana kategoride değerlendirilmektedir: (1) aeratör, havalandırma bacası ve basamaklı kanal gibi hidrolik çözümler ve (2) yüksek dayanımlı beton kullanımıyla yüzey kalitesinin artırılması. Aeratör sistemleri, büyük ölçekli dolusavaklarda standart uygulama haline gelmiş olsa da beton üretiminde kullanılacak uygun malzemelerle kavitasyon riski ve aşınma etkileri tasarım aşamasında minimize edilebilir. Bu gelişmeler dolusavak yapılarında yüksek performanslı ve erozyon dirençli malzemelerin kapsamlı olarak araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

ACI 207.6R-17 teknik dokümanına göre hasar görmüş yapıların onarım sürecinde kavitasyonun azaltılması veya giderilmesi çoğu zaman hem teknik açıdan güç hem de ekonomik açıdan maliyetli bir süreç olduğundan en pratik alternatif çözüm, hasar görmüş beton yüzeylerin erozyon direnci daha yüksek malzemelerle yenilenmesidir (American Concrete Institute. 2017). Buna göre uygun malzeme seçimi, betonun kavitasyon erozyonuna karşı direncini artırabilir. Geleneksel betonun kavitasyon erozyonuna karşı direnci yüksek dayanım, düşük porozite değerleri, agrega özellikleri ve agrega-çimento matriksi arayüzü (ITZ) kalitesi gibi çok sayıda parametreye bağlıdır (Zakrzewska ve Krella, 2019). Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi tamamlayıcı çimentolu malzemelerin beton karışımına dahil edilmesinin, bağlayıcının kohezif dayanımını artırmak suretiyle kavitasyon erozyonu direncini olumlu yönde etkilediği çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Kumar vd., 2018). Bu çalışma, Türkiye'nin güneydoğusunda Dicle Nehri üzerinde inşa edilen Ilısu Barajı dolusavak kanalında kavitasyon riskinin azaltılmasına yönelik uygulanan mineral katkılı betonun tasarım sürecini, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini ve saha kalite kontrol sürecini bir bütün olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır. Mineral katkılı yüksek dayanımlı dolusavak betonları literatürde ağırlıklı olarak laboratuvar koşullarında incelenmiştir. Bu çalışma ise söz konusu betonların tasarım, laboratuvar performansı ve saha kalite kontrol sürecini gerçek bir baraj uygulamasında bir arada ele alarak benzer projeler için uygulanabilir bir referans sunmaktadır. Çalışmada kavitasyon erozyonu

doğrudan bir deneyle ölçülmemiş, kavitasyon açısından uygunluk, betonun kavitasyon direncini belirleyen basınç ve çekme dayanımı, elastisite modülü ve su geçirimsizliği gibi mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Ancak, uygulama sırasında işçilik hataları araştırmanın dışında tutulmuştur.

2 Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmada sunulan veriler, DSİ TAKK Dairesi Raporları ile DSİ 16. Bölge Müdürlüğü, Ilısu Projesi teknik ekibi tarafından hazırlanan teknik uygulama raporu esas alınarak derlenmiştir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013). Çalışma, Türkiye'nin güneydoğusunda Dicle Nehri üzerinde Mardin iline bağlı Dargeçit ilçesi yakınlarında inşa edilen Ilısu Barajı dolusavak kanalını kapsamaktadır. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipinde tasarlanan barajın talvegden yüksekliği 130 m, kurulu gücü 1200 MW ve yıllık ortalama enerji üretimi 4,120 GWh'dir. Dolusavak yapısı sağ sahilde konumlanmış olup 6 adet 16 m × 17 m boyutlu radyal kapağa sahiptir. Tasarım deşarj kapasitesi 14.799 m³/s olan dolusavakta taşkın koşullarında maksimum su akış hızının 35 m/s'ye ulaşabileceği hidrolik analizlerle belirlenmiş olup bu durum kavitasyon erozyonu açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır.

2.1.1 Kavitasyon İndeksi Değerlendirmesi

Dolusavak kanalında yüksek akım hızlarına bağlı olarak oluşabilecek kavitasyon riskinin belirlenmesi amacıyla kavitasyon indeksi (σ) hesaplanmıştır. Kavitasyon indeksi (cavitation index veya Thoma sayısı), akışkan içindeki basıncın buharlaşma basıncına ne kadar yakın olduğunu gösteren boyutsuz bir parametredir. Hidrolik yapılarda, türbinlerde, savaklarda, vanalarda ve pompalarda kavitasyon riskini değerlendirmek için kullanılır.

Temel mekanizma şudur: Suyun yerel basıncı çok düşerse buhar kabarcıkları oluşur, bu kabarcıklar daha yüksek basınç bölgesinde aniden çöker, yüzeylerde ciddi aşınma, titreşim, gürültü ve beton/çelik hasarı meydana gelir. (Falvey, 1990; U.S. Bureau of Reclamation, 1987):

$$\sigma = (Po - Pv) / (\rho Vo^2/2) \quad (1)$$

Burada Po toplam basıncı (Pa + Pg = 101,0 + 9,8 kPa), Pv su buhar basıncını (10°C'de 1,23 kPa), ρ su yoğunluğunu (999,7 kg/m³) ve Vo maksimum akış hızını (35 m/s) ifade etmektedir. Söz konusu parametreler yerine konulduğunda kavitasyon indeksi:

$$\sigma = (101,0 + 9,8 - 1,23) \times 10^3 / (999,7 \times 35^2/2) \approx 0,18$$

olarak elde edilmektedir. Falvey (1990)'a göre σ değerinin 0,2 ile 0,5 arasında olması kavitasyon hasarı potansiyelinin varlığına, 0,2'nin altına düşmesi ise bu riskin kritik düzeye ulaştığına işaret etmektedir. Hesaplanan σ = 0,18 değeri kritik eşiğin altında kalmakta olup dolusavak kanalı beton tasarımında kavitasyon ve aşınma etkilerine karşı özel malzeme tedbirlerinin alınmasını zorunlu kılmaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013).

2.2 Kullanılan Malzemeler

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 (2012) standardına uygun, şantiyeye coğrafi yakınlığı nedeniyle tercih edilen Mardin Çimento Sanayi (MÇS) üretimi CEM II/A-M(P-LL) 42,5R sınıfı Portland kompoze çimento kullanılmıştır. Agrega olarak Koçyurdu köyü bazalt ocağından temin edilen ve 0-4 mm, 4-12,7 mm ve 12-31,5 mm olmak üzere üç farklı sınıfta boyutlandırılan bazalt agrega tercih edilmiştir. Beton karma suyu olarak şantiye bünyesinde kullanılan TS EN 1008 (2003)'e uygun Haşiki Tepe kaynak suyu kullanılmış, işlenebilirliği artırmak amacıyla Sikament RMC-310 W kodlu polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı eklenmiştir. Mineral katkı olarak hidratasyon ısısını sınırlamak amacıyla İskenderun Sugözü Termik Santrali üretimi F sınıfı uçucu kül ve betonun kavitasyon erozyonuna karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla Finnfjord ve Elkem firması üretimi mikrosilika (silis dumanı) kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ilişkin genel bilgiler Tablo 1'de sunulmakta olup tüm malzemelerin

uygunluk değerlendirmeleri DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Beton Laboratuvarı tarafından ilgili standartlar kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malzemelere ilişkin bilgiler

Malzeme	Tür / Sınıf	Değerlendirmede Kullanılan Standart	Temin Edildiği Yer
Çimento	CEM II/A-M(P-LL) 42,5R	TS EN 197-1 (2012)	Mardin Çimento Sanayi (MÇS)
İnce Agrega	Bazalt, 0-4 mm	TS 706 EN 12620+A1, ASTM C 33 (2024)	Koçyurdu Köyü Bazalt Ocağı
İri Agrega	Bazalt, 4-12 mm	TS 706 EN 12620+A1, ASTM C 33 (2024)	Koçyurdu Köyü Bazalt Ocağı
İri Agrega	Bazalt, 12-30 mm	TS 706 EN 12620+A1, ASTM C 33 (2024)	Koçyurdu Köyü Bazalt Ocağı
Karma Suyu	İçilebilir kaynak suyu	TS EN 1008 (2003)	Haşiki Tepe Kaynak Suyu
Kimyasal Katkı	Süper akışkanlaştırıcı-Polikarboksilat esaslı	TS EN 480-6 (2024)	Sikament RMC-310 W
Uçucu Kül	F sınıfı uçucu kül	TS EN 450-1 (2013), ASTM C618 (2025)	Sugözü Termik Santrali
Mikrosilika	Silica Class 1	TS EN 13263-1 (2010), ASTM C 1240 (2020)	FINNFJORD ve ELKEM Firması (Norveç)

2.3 Beton Karışım Tasarımı

Dolusavak kanalı beton karışım tasarımı, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Beton Laboratuvarı tarafından yürütülen kapsamlı ön deney çalışmaları kapsamında oluşturulmuştur. Tasarım sürecinde toplam bağlayıcı dozajı 340-380 kg/m³ arasında değişen kombinasyonlar incelenmiş; uçucu kül oranı çimento kütlesine göre %10, %15 ve %20, silis dumanı oranı ise %5 ve %10 olarak belirlenmiştir. Silis dumanının iki farklı firma ürününden (FINNFJORD ve Elkem) temin edilmesi nedeniyle her kombinasyon ayrı ayrı değerlendirilmiş ve toplam 12 farklı karışım tasarımı laboratuvarda hazırlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Ilısu Barajı dolusavak kanalı beton tasarımında incelenen 12 farklı karışım tasarımına ilişkin bileşen miktarları ve oranları

Karışım Kodu	Toplam Bağlayıcı (kg/m³)	Çimento (kg/m³)	Uçucu Kül (kg/m³)	Silis Dumanı (kg/m³)	Uçucu Kül/Çimento Oranı	Silis Dumanı/Çimento Oranı	Karışım Suyu (kg/m³)	Toplam S/Ç Oranı	Etkili S/Ç Oranı
DS-FA15-SF10-A-1	350	280,0	42,0	28,0	%15	%10	177	0,51	0,50
DS-FA15-SF10-E-1	350	280,0	42,0	28,0	%15	%10	177	0,51	0,50
DS-FA15-SF10-A-2	360	288,0	43,2	28,8	%15	%10	180	0,50	0,50
DS-FA15-SF10-E-2	360	288,0	43,2	28,8	%15	%10	180	0,50	0,50
DS-FA10-SF10-A-3	340	283,3	28,3	28,3	%10	%10	177	0,52	0,50
DS-FA10-SF10-E-3	340	283,3	28,3	28,3	%10	%10	177	0,52	0,50
DS-FA15-SF10-A-4	375	300,0	45,0	30,0	%15	%10	180	0,48	0,48
DS-FA15-SF10-E-4	375	300,0	45,0	30,0	%15	%10	180	0,48	0,48
DS-FA20-SF10-A-5	360	277,0	55,4	27,7	%20	%10	180	0,50	0,51
DS-FA20-SF10-E-5	360	277,0	55,4	27,7	%20	%10	180	0,50	0,51
DS-FA15-SF5-A-6	380	316,7	47,5	15,8	%15	%5	177	0,47	0,48
DS-FA15-SF5-E-6	380	316,7	47,5	15,8	%15	%5	177	0,47	0,48

E: Elkem firma ürünü mikrosilika, A: FINNFJORD firması ürünü mikrosilika

Karışım seçim sürecinde basınç dayanımı, etkili su/bağlayıcı oranı, hidratasyon ısısı kontrolü ve taze beton işlenebilirliği kriterleri birlikte değerlendirilmiştir. ACI 210R teknik şartnamesi kapsamında 15 m/s'yi aşan akım hızlarına maruz yapılarda su/bağlayıcı oranının 0,50'yi geçmemesi esas alınmıştır (American Concrete Institute, 2017). Ayrıca otojenik ve plastik büzülme çatlaklarının önlenmesi amacıyla silis dumanı kullanım oranının %10'u aşmaması ilkesi tasarım sürecine dahil edilmiştir. Kütle betonu kapsamında değerlendirilen dolusavak kanalı döşeme bloklarında hidratasyon ısısı kontrolü de kritik bir parametre olarak ele alınmış, beton içindeki merkez-yüzey sıcaklık farkının 20°C'yi aşmaması şartı gözetilmiştir.

2.4 Deney Yöntemleri

Çalışma kapsamında taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesinde ilgili Türk ve uluslararası standartlarda tanımlanan deney yöntemleri uygulanmış olup uygulanan deney yöntemlerine ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 3'te sunulmaktadır.

Taze beton kıvamı TS EN 12350-2 (2019) standardına göre çökme (slump) deneyi ile belirlenmiş, ölçümler döküm öncesinde ve 10 dakika sonrasında olmak üzere iki kez gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş beton mekanik özellikleri kapsamında basınç dayanımı TS EN 12390-3 (2019), yarmada çekme dayanımı TS EN 12390-6 (2024) ve eğilmede çekme dayanımı TS EN 12390-5 (2019) standardına göre 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda 150×150×150 mm küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Elastisite modülü TS EN 12390-13 (2021) standardına göre 28 günlük yaşta, su geçirimsizliği ise TS EN 12390-8 (2019) standardına göre maksimum su işleme derinliği tayini yöntemiyle değerlendirilmiştir.

Bağlayıcı malzemelerin hidratasyon ısısı davranışı, ASTM C 1702 (2024) standardına göre izotermal kalorimetre cihazı ile 72 saat süresince incelenmiştir. Saha koşullarında ise hidratasyon sürecinde beton kütlesinin sıcaklık gelişimi, döşeme anosunun merkezine ve memba kenarına yerleştirilen termoçiftler aracılığıyla döküm tamamlandıktan sonra 130 saat boyunca izlenmiştir.

Tablo 3. Çalışmada uygulanan deney yöntemleri

Deney	Beton Durumu	Uygulanan Standart	Numune Boyutu	Deney Yaşı / Süresi
Çökme (Slump)	Taze beton	TS EN 12350-2 (2019)	-	Döküm öncesi ve 10 dk. sonra
Basınç Dayanımı	Sertleşmiş beton	TS EN 12390-3 (2019)	150×150×150 mm küp	7, 28, 90 gün
Yarmada Çekme Dayanımı	Sertleşmiş beton	TS EN 12390-6 (2024)	150×150×150 mm küp	7, 28, 90 gün
Eğilmede Çekme Dayanımı	Sertleşmiş beton	TS EN 12390-5 (2019)	Prizma numune	28, 90 gün
Elastisite Modülü	Sertleşmiş beton	TS EN 12390-13 (2021)	150×150×150 mm küp	28 gün
Su İşleme Derinliği	Sertleşmiş beton	TS EN 12390-8 (2019)	150×150×150 mm küp	28 gün
Çimento Hidratasyon Isısı (İzotermal Kalorimetre)	Çimento/Bağlayıcı	ASTM C1702 (2024)	-	72 saat
Hidratasyon Sıcaklığı İzleme (Saha)	Taze/sertleşen beton	Thermo Couple (ısılçift)	Beton kütlesi içi	130 saat (döküm sonrası)

3 Bulgular ve Tartışma

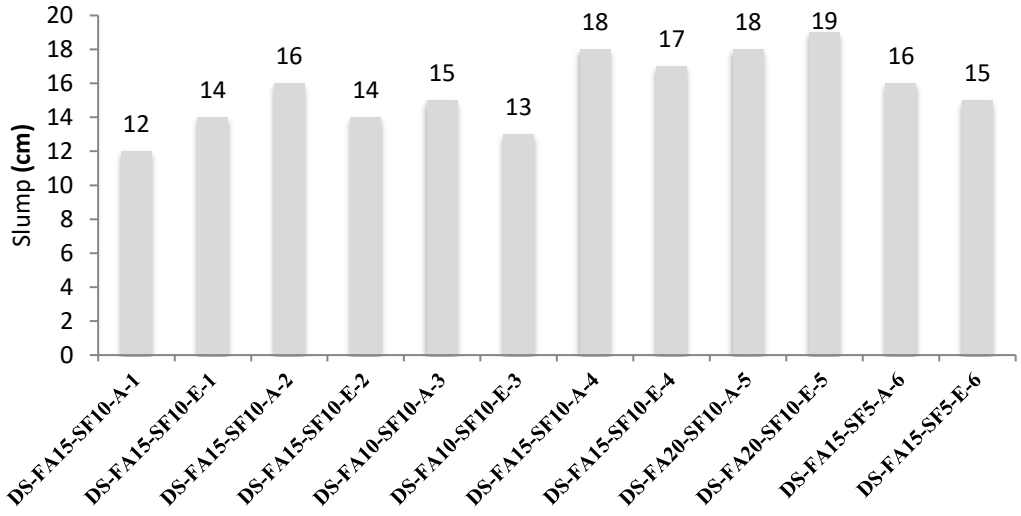
3.1 Taze Beton Özellikleri

İncelenen 12 farklı karışım tasarımına ait taze beton işlenebilirlik değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ilk slump değerlerinin 12–19 cm arasında değiştiği görülmektedir (Tablo 4 ve Şekil 1). Tüm karışımlarda etkili su/bağlayıcı oranının 0,49–0,52 aralığında tutulmasına karşın slump değerleri arasında gözlemlenen farklılığın esas olarak mineral katkı türü, oranı ve kimyasal katkı dozajına bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

Uçucu kül ve silis dumanının taze beton işlenebilirliği üzerindeki etkileri birbirinden farklı bir nitelik taşımaktadır. Uçucu külün küresel tane morfolojisi, taze betonda mikro bilya etkisi yaratarak işlenebilirliği olumlu yönde etkilemekte ve su ile süper akışkanlaştırıcı ihtiyacını azaltmaktadır. Buna karşın yüksek özgül yüzeye sahip silis dumanının karışıma katılması, belirli bir kıvam için gerekli su ihtiyacını artırma eğiliminde olup bu etkiyi telafi etmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Benzer şekilde literatürde de silis dumanı içeriğinin artmasıyla birlikte slump değerlerinde belirgin bir düşüş gözlemlendiği, bu olumsuz etkinin polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanımıyla giderilebileceği ortaya konmuştur (Šoukal vd., 2023; Lekhya ve Kumar,2024; Padavala vd.,2025).

Bu çalışmada da polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkının çimento kütlesinin %1'i oranında kullanılmasıyla taze beton işlenebilirliği proje şartname sınırları dahilinde başarıyla sağlanmıştır. Üretim sürecinde kimyasal katkının aşırı dozajına ilişkin herhangi bir olumsuz bulguya-taze betonda çiçeklenme veya renk değişimi gibi-rastlanılmamıştır. Silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımı, taze betonun homojen ve segregasyona karşı dirençli bir yapı kazanmasını sağlamış, boşluk oranının minimize edilmesiyle yüksek kompasiteli bir beton elde edilmiştir.

Saha döküm koşullarında ortalama çevre sıcaklığının 19,3-20°C, bağıl nem oranının ise %55-65 aralığında seyrettiği koşullarda döküm gerçekleştirilmiştir. Beton, mansap yönünden memba yönüne doğru pompa ile 50 cm'lik tabakalar halinde yerleştirilmiştir. Her döküm kademesi için farklı işlenebilirlik hedefleri belirlenmiş, birinci ve üçüncü tabakada slump değeri 110-150 mm, ikinci tabakada ise 140-150 mm aralığında tutulmuştur (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013).



Şekil 1. Karışım tasarımlarına ait slump değerleri

Tablo 4. Ilısu Barajı dolusavak kanalı beton karışım tasarımlarından elde edilen 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme, eğilme dayanımı ve slump deney sonuçları

Karışım Kodu	Toplam Bağlayıcı (kg/m³)	Çimento (kg/m³)	Uçucu Kül (kg/m³)	Silis Dumanı (kg/m³)	Karışım Suyu (kg/m³)	Etkili S/Ç	İlk Slump (cm)	10 dk. Slump (cm)	Gün	Basınç Dayanımı Silindir (MPa)	Basınç Dayanımı Küp (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yarmada Çekme (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
DS-FA15-SF10-A-1	350	280	42	28	177	0,50	12	8	7	27.8	32	-	-	-
									28	44.8	51.5	35.4	3.94	6.06
									90	60.4	69.5	-	5.32	8.18
DS-FA15-SF10-E-1	350	280	42	28	177	0,50	14	8	7	26.5	30.5	-	-	-
									28	41.1	47.3	34.4	3.99	6.14
									90	55.5	63.8	-	5.39	8.29
DS-FA15-SF10-A-2	360	288	43.2	28.8	180	0,50	16	10	7	28.4	32.7	-	-	-
									28	45	51.8	35.5	3.84	5.9
									90	60.8	69.9	-	5.18	7.97
DS-FA15-SF10-E-2	360	288	43.2	28.8	180	0,50	14	9	7	28	32.2	-	-	-
									28	42.2	48.5	34.7	3.85	5.92
									90	56.9	65.5	-	5.19	7.99
DS-FA10-SF10-A-3	340	283.3	28.3	28.3	177	0,50	15	9	7	27.6	31.7	-	-	-
									28	41.6	47.8	34.6	3.79	5.82
									90	56.1	64.5	-	5.11	7.86
DS-FA10-SF10-E-3	340	283.3	28.3	28.3	177	0,50	13	8	7	26.7	30.7	-	-	-
									28	42.3	48.7	34.8	3.81	5.86
									90	57.2	65.7	-	5.15	7.92
DS-FA15-SF10-A-4	375	300	45	30	180	0,48	18	14	7	29.8	34.3	-	-	-
									28	45.9	52.8	35.7	3.84	5.9
									90	62	71.3	-	5.18	7.97
	375	300	45	30	180	0,48	17	12	7	30	34.5	-	-	-

Karışım Kodu	Toplam Bağlayıcı (kg/m³)	Çimento (kg/m³)	Uçucu Kül (kg/m³)	Silis Dumanı (kg/m³)	Karışım Suyu (kg/m³)	Etkili S/Ç	İlk Slump (cm)	10 dk. Slump (cm)	Gün	Basınç Dayanımı Silindir (MPa)	Basınç Dayanımı Küp (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yarmada Çekme (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
DS-FA15-SF10-E-4									28	47.1	54.1	36	4.08	6.27
									90	63.5	73.1	-	5.5	8.47
DS-FA20-SF10-A-5	360	276.9	55.4	27.7	180	0,51	18	13	7	23.8	27.4	-	-	-
									28	39.5	45.4	34	3.31	5.1
									90	53.4	61.4	-	4.47	6.88
DS-FA20-SF10-E-5	360	276.9	55.4	27.7	180	0,51	19	12	7	22.5	25.9	-	-	-
									28	35.1	40.4	32.7	3.67	5.64
									90	47.4	54.6	-	4.95	7.62
DS-FA15-SF5-A-6	380	316.7	47.5	15.8	177	0,48	16	9	7	31	35.6	-	-	-
									28	45.8	52.7	35.7	3.8	5.84
									90	56	64.4	-	-	-
DS-FA15-SF5-E-6	380	316.7	47.5	15.8	177	0,47	15	10	7	29	33.4	-	-	-
									28	44.2	50.8	35.3	3.38	5.19
									90	54.6	62.7	-	-	-

3.2 Sertleşmiş Betonun Mekanik Özellikleri

İncelenen 12 karışım tasarımına ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü deney sonuçları Tablo 4'te verilmektedir.

3.2.1 Basınç Dayanımı

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 7 günlük küp basınç dayanımı değerlerinin 25,9-35,6 MPa, 28 günlük değerlerin 40,4-54,1 MPa ve 90 günlük değerlerin ise 54,6-73,1 MPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 2). Tüm karışım tasarımlarında 90 günlük küp basınç dayanımının C25/30 beton sınıfı için ACI 318 (2025) 'de 28 günlük hedef dayanım için belirtilen 38,5 MPa hedef dayanımını önemli ölçüde aştığı belirlenmiştir. Bu durum, uçucu kül ve silis dumanının birlikte kullanımının dolusavak kanalı betonu için öngörülen mekanik performans kriterlerini yalnızca karşılamakla kalmayıp hedef değerin üzerine çıktığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde literatürde uygun karışım tasarımıyla silis dumanlı betonlarda 28 günlük basınç dayanımının geleneksel betonlara kıyasla %20-50 oranında artış gösterdiği, bu artışın hem fiziksel dolgu etkisine hem de ikincil puzolanik reaksiyonla oluşan ilave C-S-H fazına dayandığı bildirilmiştir. Silis dumanının erken yaştaki hidratasyon hızlandırıcı etkisi ve ileri yaşlarda gerçekleşen ikincil puzolanik reaksiyonu sayesinde hem erken hem de uzun vadeli dayanım gelişimine katkı sağladığı önceki çalışmalarda da gösterilmiştir (Smarzewski, 2023; Padavala vd.,2025).

Karışımlar arasındaki karşılaştırmalı değerlendirme yapıldığında, uçucu kül oranının %20'ye çıkarıldığı DS-FA20-SF10 serisi karışımların (A-5 ve E-5) diğer serilerle kıyaslandığında tüm yaşlarda daha düşük basınç dayanımı değerleri sergilediği görülmektedir. 7 günlük küp basınç dayanımı bu seride 25,9-27,4 MPa ile tüm karışımlar arasında en düşük değerleri alırken 90 günlük dayanım değerleri de 54,6-61,4 MPa aralığında kalmıştır. Bu bulgu, yüksek uçucu kül ikame oranlarının erken yaş dayanım gelişimini düşürme etkisiyle olumsuz etkilediğine ilişkin literatür bulgularıyla örtüşmektedir. Uçucu külün puzolanik reaktivitesi mikrosilika'ya kıyasla düşük olduğundan, hidratasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$ ile ikincil reaksiyona ancak ileri yaşlarda etkin biçimde girebilmektedir. Uçucu külün erken yaş dayanım gelişimini kısıtlamakla birlikte 90 günlük ve sonraki yaşlarda puzolanik reaksiyonların hızlanmasıyla birlikte uzun vadeli dayanım gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır (Lekhya & Kumar, 2024).

Toplam bağlayıcı dozajının en yüksek olduğu DS-FA15-SF10-A-4 ve E-4 karışımları (375 kg/m³), 90 günlük küp basınç dayanımı açısından sırasıyla 71,3 ve 73,1 MPa ile tüm seriler arasında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu sonuç, optimum uçucu kül (%15) ve silis dumanı (%10) oranlarının yüksek bağlayıcı dozajıyla bir arada kullanılması durumunda birbirini güçlendirn bir puzolanik etki oluştuğunu ve uzun vadeli dayanım gelişiminin ileri yaşlarda hızlandığını göstermektedir. Silis dumanının agrega-çimento matriksi ara yüzeyini (ITZ) güçlendirerek hem basınç hem de çekme özelliklerini iyileştirdiği göz önünde bulundurulduğunda bu sonuç mekanik açıdan tutarlıdır (Kumar vd., 2018; Wang vd., 2023).

Öte yandan, FINNFJORD (A serisi) ve Elkem (E serisi) firmalarından temin edilen mikrosilikaların aynı karışım oranlarındaki sonuçları karşılaştırıldığında, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının iki seride birbirine çok yakın kaldığı (farklar sırasıyla en çok 0,48 ve 0,74 MPa) görülmektedir. Küp basınç dayanımında ise ileri yaşlarda A serisi lehine bir miktar daha yüksek değerler eğilimi gözlenmiş; farklar çoğunlukla 5 MPa civarında (en çok 6,8 MPa) kalmıştır. Bu farklar, her iki kaynağın da öngörülen beton sınıfı ve hedef dayanım kriterlerini karşılamasını değiştirmemekte olup Silica Class 1 kalite sınıfını sağlayan her iki silis dumanı kaynağı da dolusavak kanalı betonu için uygun bulunmuştur.

Dolusavak kanalı bağlamında değerlendirildiğinde, elde edilen basınç dayanımı sonuçları açısından dikkat çekici bir nokta gündeme gelmektedir: Şartname gereği C25/30 olarak belirlenen beton sınıfı için tasarlanan DS-FA15-SF5 karışımından elde edilen 28 günlük küp basınç dayanımı 52,7 MPa ile C40/50 beton sınıfı gereksinimlerini fiilen karşılar düzeye ulaşmıştır. Bu sonuç, mineral katkıların beton matrisini nasıl köklü biçimde dönüştürebildiğini somut olarak ortaya koymaktadır.

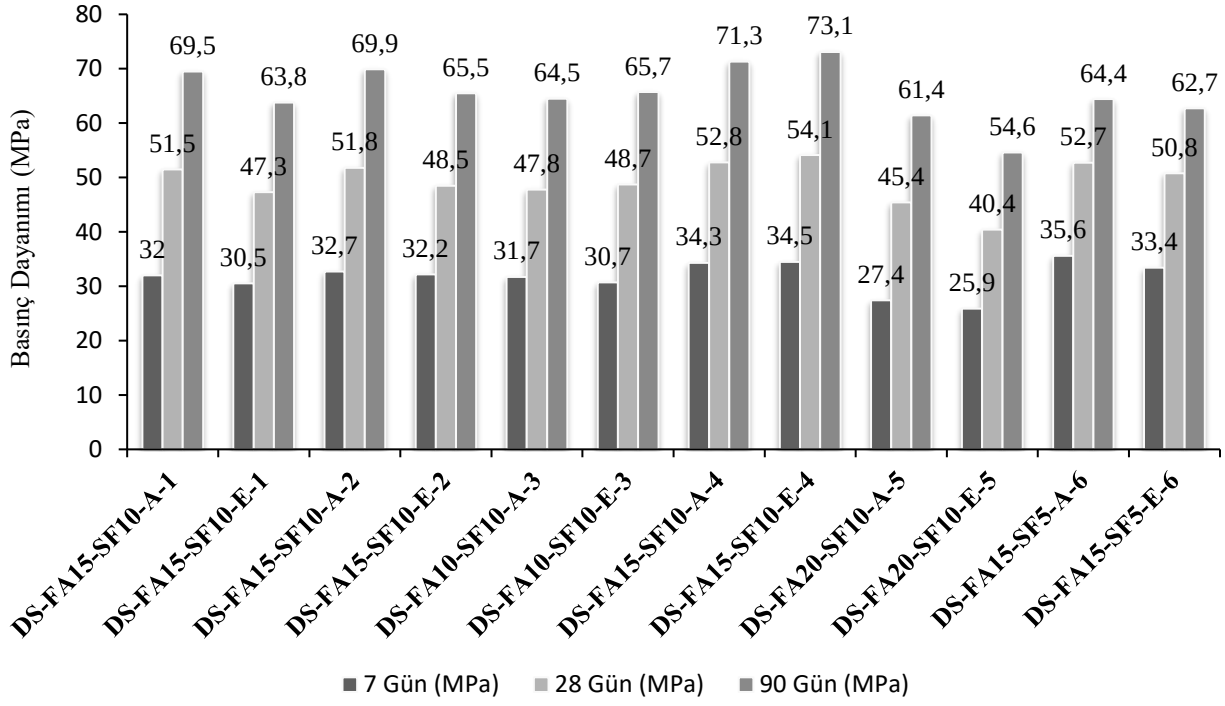
3.2.2 Yarmada Çekme ve Eğilme Dayanımı

28 günlük yarmada çekme dayanımı 3,31–4,08 MPa, 90 günlük değerler ise 4,47–5,50 MPa arasında ölçülmüştür. Eğilme dayanımı değerleri 28 günde 5,10–6,27 MPa, 90 günde ise 6,88–8,47 MPa aralığında elde edilmiştir (Şekil 3 ve 4). En yüksek çekme ve eğilme dayanımı değerlerine DS-FA15-SF10-E-4 karışımında ulaşılmış olup bu sonuç söz konusu karışımın basınç dayanımındaki üstünlüğüyle örtüşmektedir. Uçucu kül oranının %20'ye çıkarıldığı FA20 serisi karışımlar yarmada çekme ve eğilme

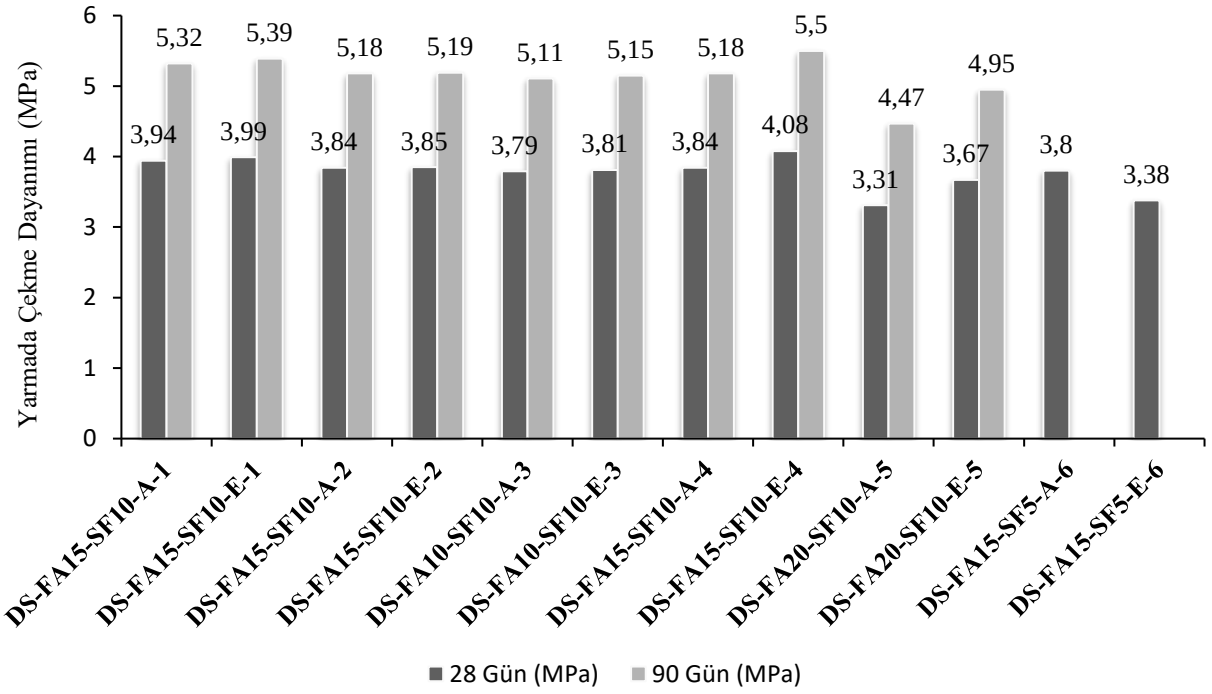
dayanımı açısından da görece daha düşük değerler sergilemiş; bu örüntü basınç dayanımı sonuçlarıyla tutarlı bir davranış sergilemiştir. Dolusavak kanalı açısından kritik öneme sahip olan yüzey çekme ve koparma dayanımının, kavitasyon kaynaklı darbe etkilerine karşı betonun direncini doğrudan etkilediği dikkate alındığında, SF10 serisi karışımların dolusavak uygulamaları için daha avantajlı bir mekanik profil sunduğu değerlendirilmektedir. Silis dumanı katkısıyla betonun yüksek basınç ve eğilme dayanımına erişmesi ve agregalar ile çimento pastası arasındaki bağ dayanımının güçlenmesinin, yüksek hızlı akıma maruz kalan hidrolik yapılarda kavitasyon direncine doğrudan katkı sağladığı literatürde de belgelenmiştir (Kumar vd., 2018).

3.2.3 Elastisite Modülü

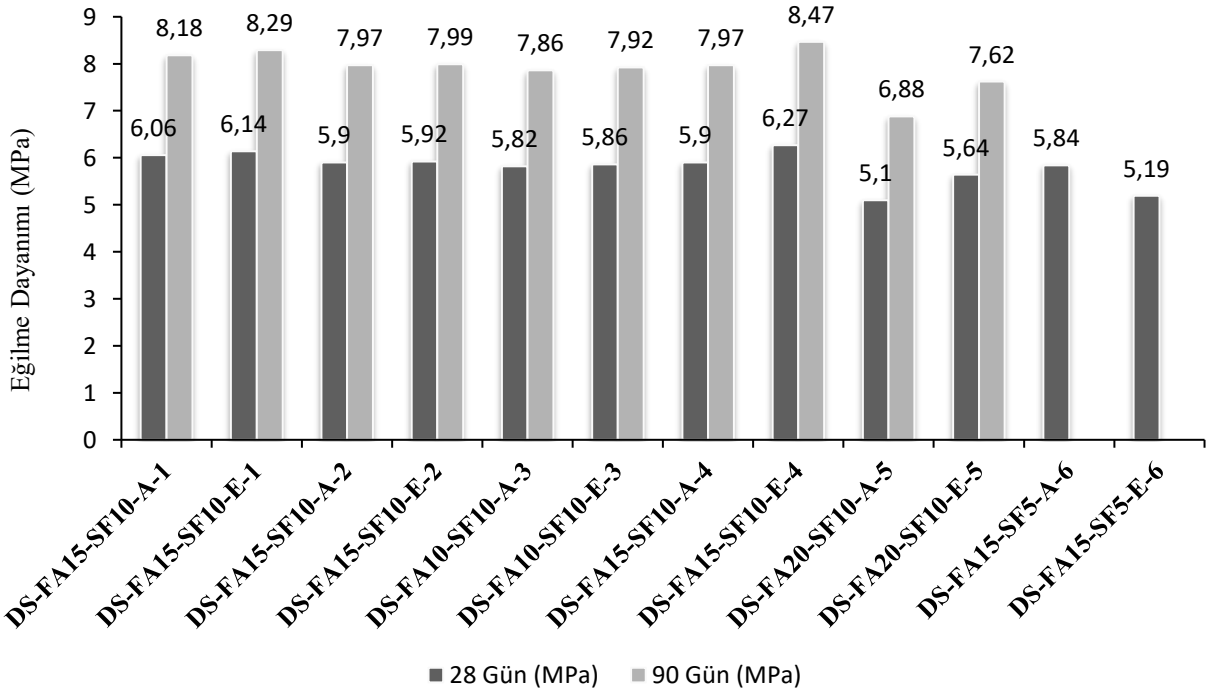
28 günlük elastisite modülü değerleri 32,7–36,0 GPa arasında ölçülmüştür. DS-FA20-SF10-E-5 karışımı 32,7 GPa ile en düşük, DS-FA15-SF10-E-4 karışımı ise 36,0 GPa ile en yüksek elastisite modülü değerini vermiştir (Şekil 5). Elastisite modülü değerlerinin basınç dayanımıyla tutarlı bir ilişki içinde seyrettiği, yüksek dayanımlı karışımlarda sertlik ve rijitliğin de arttığı gözlemlenmektedir. Bu ilişki, silis dumanının beton matrisindeki boşlukları doldurarak yarattığı kompaktlığın hem dayanım hem de rijitlik üzerinde eş zamanlı olumlu etkisini desteklemektedir (Smarzewski,2023; Chen vd., 2024). Dolusavak kanalı bağlamında yüksek elastisite modülü, kavitasyon kaynaklı darbe yüklerine karşı betonun elastik deformasyonunu sınırlayarak yüzey hasarına karşı direnci artıran önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır.



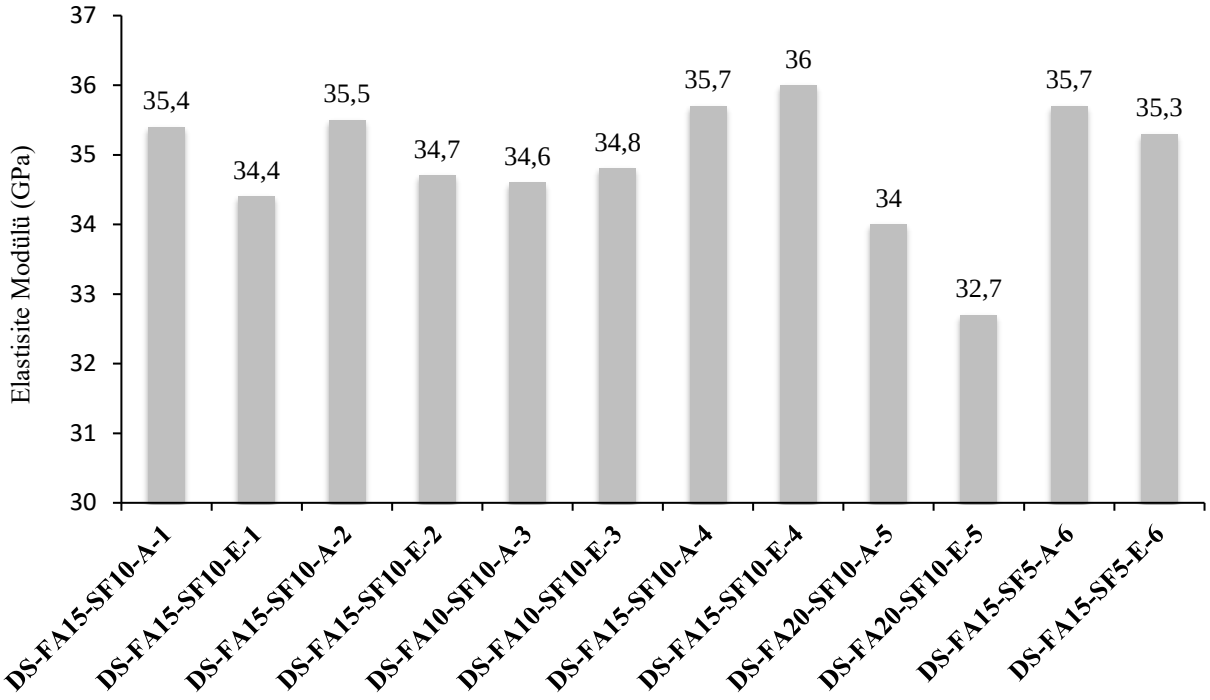
Şekil 2. Karışım tasarımlarına göre küp basınç dayanımları



Şekil 3 Karışım tasarımlarına göre yarmada çekme dayanımları



Şekil 4. Karışım tasarımlarına göre eğilme dayanımları



Şekil 5. Karışım tasarımlarına göre elastisite modülü değerleri

3.2.4 Su Geçirimsizliği

Sürekli su temasına ve yüksek hidrostatik basınca maruz kalan dolusavak kanallarında betonun geçirimsizliği, yapının uzun vadeli dayanıklılığını doğrudan etkileyen başlıca tasarım parametrelerinden biridir. Bu çalışmada DS-FA15-SF5 karışım tasarımıyla üretilen sahadan alınan numuneler üzerinde TS EN 12390-8 (2019) ve TS 13515 (2025) standardı esas alınarak (150×150×150) mm boyutlarındaki 12 adet küp numune üzerinde maksimum su işleme derinliği tayini gerçekleştirilmiştir. Deneyler 41 ve 53 günlük numune yaşlarında iki farklı seri halinde yürütülmüş olup elde edilen maksimum su işleme derinliği değerleri 20-31 mm arasında değişmektedir (Tablo 5).

TS EN 12390-8 (2019) standardı kapsamında su işleme derinliğinin 50 mm'nin altında kalması geçirimsiz beton sınıfına karşılık gelirken, DSİ değerlendirme kriterleri çerçevesinde 30 mm'nin altındaki değerler zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton sınıfını ifade etmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 53 günlük 139 serisi numunelerin 24–29 mm, 41 günlük 180 serisi numunelerin ise 20–31 mm arasında değerler sergilediği görülmektedir. 180-3 numaralı numunede ölçülen 31 mm değeri DSİ sınır değerine yaklaşmakla birlikte, tüm numunelerin 50 mm geçirimsiz beton eşiğinin altında kaldığı görülmektedir. Bu bulgular, DS-FA15-SF5 karışım tasarımıyla üretilen mineral katkılı betonun dolusavak kanalı gibi agresif su koşullarına maruz kalan yapılar için öngörülen geçirimsizlik kriterlerini genel olarak karşıladığını ortaya koymaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013).

Elde edilen bu geçirimsizlik performansının mekanizması, silis dumanı ve uçucu külün beton mikro yapısı üzerindeki birleşik etkisiyle açıklanabilmektedir. Silis dumanının aşırı ince tane yapısı, fiziksel dolgu etkisiyle beton matrisindeki kapiler boşlukları ve taneler arası gözenekleri doldururken eş zamanlı gerçekleşen ikincil puzolanik reaksiyon sayesinde $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek ilave C-S-H jeli oluşturmakta ve beton matrisini daha da yoğunlaştırmaktadır. Silis dumanının yüksek erken reaktivitesi ve dolgu etkisi sayesinde hem kapiler hem de jel gözenek hacimlerinin azaldığı ve bu durumun betonun klorür iyonu geçirgenliğini önemli ölçüde düşürdüğü deneysel olarak gösterilmiştir (Chen vd., 2024). Uygun puzolanik bileşenlerin kullanılmasıyla ıslak paketleme yoğunluğunun optimize edilmesinin su geçirgenliğini düşürdüğü ve uçucu kül ile silis dumanını birlikte içeren betonların zararlı iyon penetrasyonuna karşı dirençli, geçirimsiz bir yapı oluşturduğu belirtilmektedir (Lekhya ve Kumar 2024). Uçucu kül ikamesinin betonun su penetrasyon derinliğini %10-48 oranında azalttığı, bu iyileşmenin uçucu külün puzolanik reaktivitesiyle bağlantılı mikro yapı sıkılaşmasına bağlı olduğu gösterilmiştir (Shelote vd., 2023).

Farklı döküm tarihlerine ait numune serileri arasındaki karşılaştırmalı değerlendirme dikkat çekici bir tablo ortaya koymaktadır. 53 günlük numunelerin 41 günlük numunelere kıyasla daha düşük ve daha homojen su işleme derinliği değerleri sergilemesi, betonun yaşlanmasıyla birlikte puzolanik reaksiyonların sürmesinin ve C-S-H oluşumunun ilerlemesinin gözenek yapısını zamanla daha da iyileştirdiğini düşündürmektedir. Bu bulgu, silis dumanının $Ca(OH)_2$ ile ikincil hidratasyon reaksiyonu gerçekleştirerek C-S-H jeli oluşturduğu ve bu sayede gözenek yapısını optimize ettiği ile uyumludur (Niu vd., 2025). Öte yandan 180 serisi numunelerde gözlemlenen daha geniş dağılım aralığı, beton yaşından bağımsız olarak kür kalitesi, yerleştirme koşulları ve sıkıştırma etkinliği gibi saha uygulamasına özgü parametrelerin geçirimsizlik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğuna işaret etmektedir. Silis dumanı içeren betonlarda kür koşullarının geçirimsizlik üzerindeki etkisinin konvansiyonel betonlara kıyasla çok daha kritik olduğu ve yetersiz kürün kapiler poroziteyi artırarak geçirgenliği olumsuz etkileyebildiği literatürde de vurgulanmaktadır.

Su yapıları bağlamında değerlendirildiğinde, elde edilen geçirimsizlik performansı dolusavak kanalının uzun vadeli dayanıklılığı açısından çok boyutlu bir anlam taşımaktadır. Düşük su geçirgenliği, kavitasyon erozyonu mekanizmasının temel koşullarından biri olan yüzey bütünlüğünü korumakta, klorür ve sülfat gibi zararlı iyonların beton içine sızmasını sınırlandırmakta ve böylece yapının öngörülen hizmet ömrünü güvence altına almaktadır. Silis dumanı içeriğinin artmasının basınç dayanımını iyileştirirken geçirgenliği düşürdüğü ve bu etkinin silis dumanının fiziksel dolgu, heterogen nükleasyon ve puzolanik reaksiyon mekanizmalarıyla beton mikro yapısını yoğunlaştırmasından kaynaklanmaktadır (Lü vd., 2019).

Tablo 5. Dolusavak kanalından alınan beton numunelerine ait su işleme derinlikleri

Karışım Kodu (Döküm Yeri)	Numune Yaşı (gün)	Maks. Su İşleme Derinliği (mm)
DS-FA15-SF5 *(Dolusavak Kanalı B7-4 Döşemesi)*	53	24
	53	29
	53	29
DS-FA15-SF5 *(Dolusavak Kanalı F7-4 Döşemesi)*	41	30
	41	20
	41	31

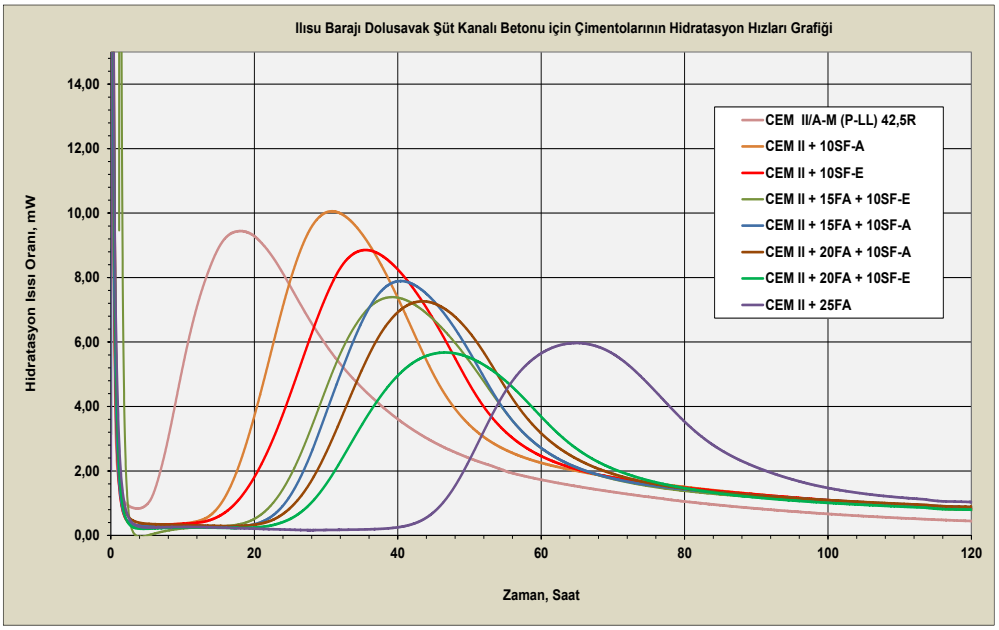
3.3 Hidratasyon Isısı ve Adyabatik Sıcaklık Artışı Tahminleri

Büyük kesitli ve sürekli döküm gerektiren hidrolik yapılarda hidratasyon ısısının denetlenmesi, termal kaynaklı çatlaklanmanın önüne geçilmesi bakımından tasarımın ayrılmaz bir bileşenidir. Çimento hidratasyonu ekzotermik bir reaksiyon olduğundan, beton kütlesinde açığa çıkan ısı merkez ile yüzey arasında sıcaklık gradyanı oluşturmakta, bu fark yapı elemanının termal genleşme farklılıklarına ve dolayısıyla çatlak oluşumuna yol açmaktadır. Literatürde, beton yüzey sıcaklığı ile merkezi arasındaki 20°C'lik sıcaklık farkının betonun çatlaması için yeterli bir eşik oluşturduğu kabul edilmektedir. Beton yerleştirme sıcaklığı yaklaşık 20°C olduğunda, çimentonun hidratasyon ısısına bağlı olarak betonun ulaşabileceği maksimum sıcaklıkların 40–50°C'nin üzerine çıkabildiği bilinmektedir. Bu gerçekten hareketle Ilısu Barajı ve HES Teknik Şartnamesi, beton kütlesinin herhangi iki noktası arasındaki sıcaklık farkının hiçbir koşulda 20°C'yi geçmemesini, maksimum beton sıcaklığının ise 70°C sınırını aşmamasını zorunlu kılmaktadır, bu eşiğin aşılması gecikmiş etrenjit oluşumu ve içsel sülfat hasarı riskini beraberinde getirmektedir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013).

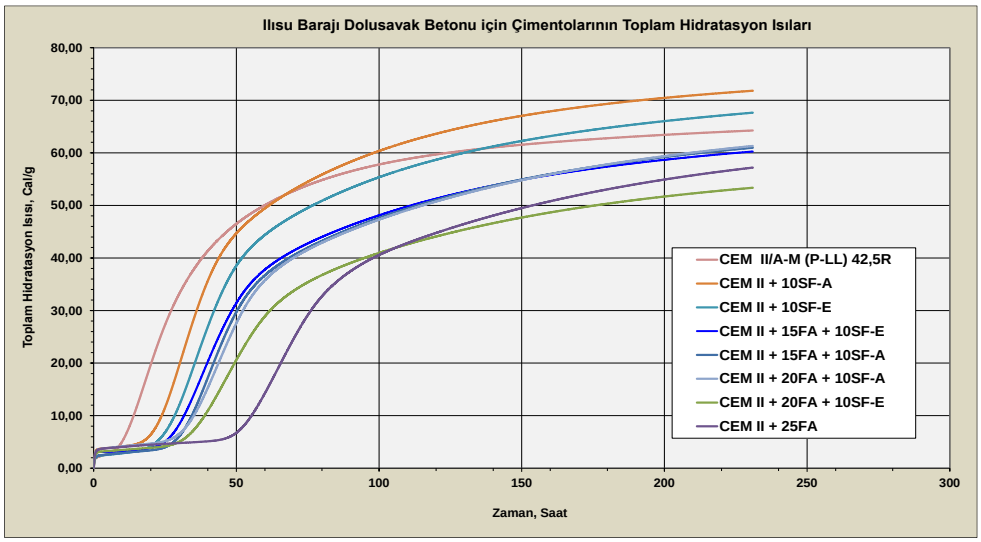
3.3.1 İzotermal Kalorimetre Deneyleri

Bu çalışmada farklı bağlayıcı bileşimlerinin hidratasyon davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla DSİ-TAKK Dairesi Beton Malzeme Laboratuvarı bünyesindeki izotermal kalorimetre cihazı kullanılarak 20°C sabit sıcaklıkta ve sabit su/bağlayıcı oranında (0,50) deneyler gerçekleştirilmiştir.

Referans CEM II/A-M (P-LL) 42,5R çimentosunun yanı sıra %10 SF-A, %10 SF-E, %15 FA + %10 SF-A, %15 FA + %10 SF-E, %20 FA + %10 SF-A, %20 FA + %10 SF-E ve %25 FA içeren karışımların hidratasyon hızı ve toplam hidratasyon ısıları karşılaştırmalı olarak ölçülmüştür (Şekil 6, Şekil 7).



Şekil 6. CEM II/A-M (P-LL) 42,5R ile uçucu Kül ve silika dumanlı çimentoların hidratasyon hızlarının karşılaştırılması (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013)



Şekil 7. CEM II/A-M (P-LL) 42,5R ile birlikte uçucu kül ve silika dumanlı çimentoların toplam hidratasyon ısılarının karşılaştırılması (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013)

Hidratasyon hızı eğrileri incelendiğinde, yalnızca silis dumanı içeren CEM II + %10 SF-A ve E serisi karışımların referans çimentoya kıyasla ilk saatlerde daha yüksek hidratasyon hızı piki sergilediği görülmektedir. Bu durum, silis dumanı taneciklerinin çimento taneleri arasında ek nükleasyon odakları oluşturarak erken hidratasyon reaksiyonunu hızlandırmasıyla açıklanmaktadır. Buna karşın ileri yaşlarda eşit çimento dozajı bazında silis dumanı kullanılan karışımların açığa çıkardığı toplam hidratasyon ısısının referans değere yakınsadığı görülmektedir. Silis dumanının erken hidratasyon hızlandırıcı etkisinin izotermal kalorimetre çalışmalarıyla kapsamlı biçimde belgelendiği ve bu etkinin süper akışkanlaştırıcı kullanımıyla dengelendiği bilinmektedir (Kim vd., 2022).

Buna karşın %25 uçucu kül içeren ikili karışım, tüm seriler arasında en düşük hidratasyon hızı ve en geç pik zamanıyla öne çıkmaktadır. Bu sonuç, F sınıfı uçucu külün puzolanik reaktivitesinin Portland çimentosuna kıyasla düşük olması ve $Ca(OH)_2$ ile ikincil reaksiyona yalnızca ileri yaşlarda etkin biçimde girebilmesiyle açıklanmaktadır. Uçucu kül ikamesinin erken yaşta hidratasyon hızını yavaşlatarak ve nihai hidratasyon ısısını bir miktar azaltarak kütle betonlarında termal kontrol açısından belirgin bir avantaj sunduğu, F sınıfı uçucu kül içeren betonların izotermal kalorimetre ile belirlenen adyabatik sıcaklık artışının, çimento oranı arttıkça giderek düştüğü gözlenmiştir (Alsulami ve Chen, 2025).

Üçlü karışımlarda %15 FA + %10 SF ve %20 FA + %10 SF serilerinde silis dumanının erken hızlandırıcı etkisi ile uçucu külün geciktirici etkisi birbirini dengelemekte, ortaya çıkan hidratasyon hızı eğrisi referans çimentonun altında seyretmektedir. Tip II mineral katkılarla yapılan karışımlarda hidratasyon hızının önemli derecede etkilendiği, ancak ileri dönemlerde toplam hidratasyon ısısının görece daha az değiştiği belirlenmiştir. Uçucu kül oranının %15'ten %20'ye çıkarılması toplam hidratasyon ısısını daha da azaltmış; %20 FA + %10 SF-E kombinasyonu 54,0 Cal/g ile referans çimentonun (65,0 Cal/g) yaklaşık %17 altında kalmıştır. FINNFJORD (A serisi) ve Elkem (E serisi) kaynaklı silis dumanlarının hidratasyon ısısı eğrileri birbirine yakın seyretmiş, her iki kaynağın Silica Class 1 kalite sınıfında tutarlı reaktivite profili sergilediği teyit edilmiştir.

3.3.2 Adyabatik Sıcaklık Artışı Tahminleri

Kütle betonu niteliği taşıyan dolusavak kanalı betonlarında adyabatik sıcaklık yükselmesi, hiçbir ısı kaybı olmayan bir sistem için aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır (American Concrete Institute. 2021).

$$\Delta T = (Mc \times Hc \times \alpha(t)) / (\rho \times Cp) \quad (2)$$

Burada Mc betonda 1 m³ içindeki toplam bağlayıcı miktarını (kg/m³), Hc bağlayıcının toplam hidratasyon ısısını (kJ/kg), α(t) sıcaklığın birkaç günde en yüksek değere ulaştığı varsayımıyla 0,80-0,90 aralığında alınan hidratasyon derecesini, ρ beton birim hacim kütlesini (kg/m³) ve Cp betonun özgül ısısını (kJ/kg°C) ifade etmektedir. Bazalt agrega kullanılan bu beton için Cp ≈ 0,90 kJ/kg°C, ısıl iletkenlik ≈ 2,0 W/m·K olarak alınmıştır. Betonun ısı iletim katsayısının düşük olması nedeniyle kütle betonları neredeyse adyabatik ya da yarı-adyabatik bir sistem gibi davranmaktadır.

Tahmini sıcaklık artışları çimentoların 7 günlük hidratasyon ısılarından hareketle hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, FA içeren karışımlarda 7 günlük kümülatif hidratasyon ısısının uzun vadeli sıcaklık artışının güvenilir bir göstergesidir (Alsulami ve Chen,2025). Farklı bağlayıcı bileşimi ve toplam bağlayıcı dozajı kombinasyonları için hesaplanan tahmini adyabatik sıcaklık artışları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Dolusavak kanalı betonlarında farklı toplam bağlayıcı dozajlarında tahmini adyabatik sıcaklık artışları

Karışım Kodu	**Bağlayıcı Bileşimi**	**FA (%)**	**SF (%)**	**7 Günlük Toplam Hidratasyon Isısı (Cal/g)**	**Tahmini Adyabatik Sıcaklık Artışı (°C)**			
					340 kg/m³	**350 kg/m³**	**360 kg/m³**	**380 kg/m³**
DS-Referans	**CEM II/A-M (P-LL) 42,5R**	**-**	**-**	**65,0**	**37,3**	**38,4**	**39,5**	**41,7**
DS-SF10-A	CEM II + %10 Silis Dumanı	-	%10	68,0	36,9	37,9	39,0	41,2
DS-SF10-E	CEM II + %10 Silis Dumanı	-	%10	65,0	35,2	36,3	37,3	39,4
DS-FA15-SF10-A	CEM II + %15 Uçucu Kül + %10 SD	%15	%10	58,0	31,4	32,4	33,3	35,1

Karışım Kodu	Bağlayıcı Bileşimi	FA (%)	SF (%)	7 Günlük Toplam Hidratasyon Isısı (Cal/g)	Tahmini Adyabatik Sıcaklık Artışı (°C)			
					340 kg/m³	350 kg/m³	360 kg/m³	380 kg/m³
DS-FA15-SF10-E	CEM II + %15 Uçucu Kül + %10 SD	%15	%10	58,0	31,4	32,4	33,3	35,1
DS-FA20-SF10-A	CEM II + %20 Uçucu Kül + %10 SD	%20	%10	56,0	30,4	31,3	32,1	33,9
DS-FA20-SF10-E	CEM II + %20 Uçucu Kül + %10 SD	%20	%10	54,0	29,3	30,1	31,0	32,7
DS-FA25	CEM II + %25 Uçucu Kül	%25	-	52,0	28,2	29,0	29,8	31,5

Not 1: Tahmini adyabatik sıcaklık artışları, kütle beton tasarımında yaygın olarak kullanılan ΔT = (Mc × Hc × α(t)) / (ρ × Cp) bağıntısı () kullanılarak çimentoların 7 günlük toplam hidratasyon ısılarından hareketle hesaplanmıştır. Hidratasyon derecesi α(t) = 0,85, betonun özgül ısısı Cp = 0,90 kJ/kg°C (bazalt agrega) olarak alınmıştır.

Tablo 6 incelendiğinde, bağlayıcı bileşiminin toplam dozajdan bağımsız olarak adyabatik sıcaklık artışı üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğu görülmektedir. Referans çimento (65,0 Cal/g, 360 kg/m³ dozajında 39,5°C) ile kıyaslandığında, %15 FA + %10 SF kombinasyonu aynı dozajda adyabatik sıcaklık artışını 33,3°C'ye, %20 FA + %10 SF-E ise 31,0°C'ye indirmiştir. Bu düşüşler sırasıyla %15,7 ve %21,5 oranına karşılık gelmektedir. Uçucu kül ikamesinin yüksek oranlarında yarı-adyabatik koşullarda ölçülen sıcaklık artışlarının azaldığı, uçucu kül oranı arttıkça sıcaklık artış hızının düştüğü ve pik sıcaklığa ulaşma süresinin uzadığı kütle beton çalışmalarında da raporlanmıştır (Van Tran & Chau, 2021).

3.4 Seçilen Karışım Tasarımı ve Gerekçesi

Kapsamlı biçimde sunulan 12 farklı karışım tasarımına ait laboratuvar deney sonuçlarının toplu değerlendirmesi, C25/30 beton sınıfı gereksinimlerini karşılayan ve saha uygulamasına uygun görülen dört nihai karışım alternatifinin belirlenmesiyle sonuçlanmıştır. Değerlendirme, Mardin Çimento CEM II/A-M (P-LL) 42,5R çimentosu ile birlikte %10, %15 ve %20 uçucu kül oranları ile %5 ve %10 silis dumanı oranlarını kapsayan kombinasyonlar üzerinden 340–370 kg/m³ toplam bağlayıcı dozaj aralığında yürütülmüştür. Bu aşamada hedef mukavemet değerleri ACI 318 (2025) kapsamında 28 günlük küp basınç dayanımı için en az 38,5 MPa olarak belirlenmiş, değerlendirmeler 150×150×150 mm küp numunelerden elde edilen deney sonuçlarına göre gerçekleştirilmiştir. Karışım tasarımlarının taze beton işlenebilirliği, sertleşmiş beton mekanik özellikleri, su geçirimsizliği ve hidratasyon ısısı kriterleri birlikte değerlendirilerek Tablo 7'de gösterilen dört nihai alternatif tespit edilmiştir.

Nihai alternatifler arasında DS-FA10-SF10 karışımı (340 kg/m³) en düşük bağlayıcı dozajı ile hidratasyon ısısı açısından avantajlı olmakla birlikte sınırlı uçucu kül oranının sağladığı puzolanik etki görece daha düşük kalmaktadır. %10 silis dumanı içeren DS-FA15-SF10 (350 kg/m³) ve DS-FA20-SF10 (360 kg/m³) karışımları mekanik performans açısından üstün değerler sergilemekte, ancak yüksek silis dumanı oranı işlenebilirliği güçleştirmekte, süper akışkanlaştırıcı ihtiyacını artırmakta ve geniş yüzeyli döşeme uygulamalarında plastik rötre çatlak riskini yükseltmektedir. Bu kısıtlarbirlikte değerlendirildiğinde, silis dumanı oranının çimento kütlesine oranla %5 ile sınırlandırıldığı DS-FA15-SF5 karışımı (370 kg/m³), mekanik performans, işlenebilirlik, hidratasyon ısısı kontrolü ve plastik rötre yönetimi kriterlerini eşzamanlı olarak en uygun biçimde karşılayan tasarım olarak öne çıkmıştır.

3.4.1 Kavitasyon İndeksi ve Beton Dayanım Sınıfı İlişkisi

Ilısu Barajı Dolusavak Kanalı, maksimum akış hızı V_0 = 35 m/s koşullarında σ = 0,18 kavitasyon indeksine sahiptir. Falvey (1990), kavitasyon indeksinin 0,2'nin altında olduğu durumlarda kavitasyon hasarı riskinin yüksek kategoriye geçtiğini ve bu koşulda betonun malzeme özelliklerinin de bu amaca yönelik iyileştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur. Bölüm 3.1.2'de sunulan deney sonuçları incelendiğinde DS-FA15-SF5 karışımının 28 günlük küp basınç dayanımının 52,7 MPa'ya ulaştığı görülmektedir, bu değer C40/50 beton sınıfının gereksinimlerini fiilen karşılamaktadır. Mineral katkıların puzolanik etkisi sayesinde ulaşılan bu dayanım düzeyi, şartname sınıfının öngördüğü performansı belirgin biçimde aşmaktadır (Falvey, 1990; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013).

3.4.2 İşlenebilirlik ve Su/Bağlayıcı Oranı Dengesi

Silis dumanının çimento kütlesine oranla %5 düzeyinde kullanılmasının kritik pratik gerekçelerinden biri, işlenebilirlik ve su/bağlayıcı oranı dengesidir. Silis dumanı oranının %10'a çıkarılması, istenilen etkili su/bağlayıcı oranı olan 0,50'yi sağlayabilmek amacıyla toplam bağlayıcı dozajının artırılmasını zorunlu kılmaktadır. DS-FA15-SF5 karışımı, %1 oranında polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı ile birlikte şartnamede öngörülen 110–150 mm slump aralığında yeterli işlenebilirlik sergilemiş, 370 kg/m³ toplam bağlayıcı dozajı ile 0,49 etkili su/bağlayıcı oranı optimum noktayı temsil etmektedir (Šoukal vd., 2023; Lekhya ve Kumar, 2024).

Tablo 7. Dolusavak kanalı beton tasarımı için belirlenen nihai karışım alternatifleri

No	Karışım Kodu	Bağlayıcı Dozajı (kg/m³)				Su (kg/m³)	Etkili S/Ç	Kimyasal Katkı (Sikament RMC 310)		Agrega Karışım Miktarları (DKY, kg/m³)			Teorik Beton Birim Kütlesi (kg/m³)	Hava (%)	Slump (cm)
		Toplam	Çimento	FA	SF			%	kg/m³	0–4 mm	4–12 mm	12–30 mm			
1	DS-FA10-SF10	340	283,3	28,3	28,3	177,0	0,50	%1,00	3,40	985,5	473,0	512,4	2491,3	%2,0	10–15
2	DS-FA15-SF10	350	280,0	42,0	28,0	177,0	0,50	%1,00	3,50	978,5	469,7	508,8	2487,5		
3	DS-FA20-SF10	360	277,0	55,4	27,7	177,0	0,50	%1,00	3,60	971,6	466,4	505,2	2483,8		
4	**DS-FA15-SF5**	**370**	**308,3**	**46,3**	**15,4**	**177,0**	**0,49**	**%1,00**	**3,70**	**970,0**	**465,6**	**504,4**	**2490,7**		

Kısaltmalar: FA = Uçucu Kül; SF = Silis Dumanı; DKY = Doygun Kuru Yüzey; S/Ç = Etkili su/çimento oranı.

Not: Yeşil satır seçilen karışım tasarımını göstermektedir.

3.4.3 Hidratasyon Isısı ve Termal Kontrol

Silis dumanı oranının %5 ile sınırlı tutulmasının ikinci kritik gerekçesi hidratasyon ısısı kontrolüdür. Tablo 6'da sunulan adyabatik sıcaklık artışı tahminleri ve izotermal kalorimetre verileri değerlendirildiğinde, DS-FA15-SF5 karışımının 7 günlük hidratasyon ısısının %10 SD içeren serilere kıyasla görece daha yüksek seyredeceği ancak toplam bağlayıcı dozajının 370 kg/m³ ile sınırlı tutulmasıyla termal dengenin korunduğu görülmektedir. Saha uygulamasında merkez–yüzey sıcaklık farkının 20°C şartname eşiğini hiçbir kademede aşmaması bu dengenin pratikte sağlanabildiğini doğrulamaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013; American Concrete Institute,2021).

3.4.4 Su Geçirimsizliği Performansı

Saha numunelerinde elde edilen su işleme derinliği değerleri (20-31 mm), TS EN 12390-8 (2019) standardının geçirimsiz beton için öngördüğü 50 mm eşiğinin ve DSİ'nin zararlı ortamlara karşı geçirimsiz beton için belirlediği 30 mm sınırının büyük ölçüde altında kalmıştır. Bu geçirimsizlik performansı, kavitasyon hasarının başlangıç koşulunu oluşturan mikro yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmekte ve zararlı iyonların beton içine sızmasını engellemektedir (Chen vd., 2024; Lü vd., 2019).

Tablo 8. Seçilen karışım tasarımı DS-FA15-SF5'e ait bileşen ve özellikler

Parametre	Değer
Karışım Kodu	**DS-FA15-SF5**
Beton Sınıfı (TS EN / DSİ İLISU)	C25/30 – Silis Dumanlı
Toplam Bağlayıcı (kg/m³)	370
Çimento - CEM II/A-M (P-LL) 42,5R (kg/m³)	308,3
Uçucu Kül - Sugözü F Sınıfı (kg/m³)	46,3
Silis Dumanı - Silica Class 1 (kg/m³)	15,4
Karışım Suyu (kg/m³)	177,0
Etkili Su/Çimento Oranı (w/cm) (TS 13515'e göre hesaplanan)	0,49
Kimyasal Katkı - Sika Sikament RMC 310S	Çimento kütlesinin %1'i
Kimyasal Katkı Miktarı (kg/m³)	3,70
Agrega - 0–4 mm Kırma Kum (kg/m³)	970,0
Agrega - 4–12,7 mm Çakıl (kg/m³)	465,6
Agrega - 12,7–30 mm Çakıl (kg/m³)	504,4
Maksimum Tane Boyutu Dmax (mm)	30
Teorik Taze Beton Birim Kütlesi (kg/m³)	2490,7
Çökme / Slump - 0 dk (cm)	18,0
Çökme / Slump - 30 dk (cm)	14,0
Hedef Küp Basınç Dayanımı Fck+ΔS (MPa)	38,5
Laboratuvar 7 Günlük Küp Basınç Dayanımı (MPa)	33,1
Laboratuvar 28 Günlük Küp Basınç Dayanımı (MPa)	50,1

3.5 Saha Uygulaması ve Gözlemler

3.5.1 Döküm Koşulları ve Ön Hazırlık

DS-FA15-SF5 karışım tasarımıyla gerçekleştirilen ilk saha uygulaması, 11 Mart 2013 tarihinde B7-10 Nolu Döşeme Anosunda (147 m³, 12,591×11,00×1,00 m) ve akabinde C7-5 Nolu Orta Duvar Döşeme Anosunda (200 m³) yürütülmüştür. Beton dökümüne izin verilmeden önce kaya düzenleme betonu dökülen anonun drenaj, ankraj, donatı, kalıp ve yüzey chiping uygunluğu proje ve şartname çerçevesinde denetlenmiştir. Döküm koşulları incelendiğinde ortalama çevre sıcaklığının 19,3–20,0°C, bağıl nem oranının ise %55–65 aralığında seyrettiği görülmektedir. Bu koşullar, silis dumanı içeren betonlarda plastik rötre riskini yönetilebilir düzeyde tutmakla birlikte, yüksek yüzey/hacim oranına sahip döşeme uygulamalarında yüzey koruma önlemlerinin döküm esnasında kesintisiz sürdürülmesini zorunlu kılmaktadır.

Dolusavak kanalı, akış yönünde 1:8,25 eğimli bir yapı olup 10–12 m uzunluğunda ve 6,0–6,5 m genişliğinde projelendirilen döşeme blok anoları kütle betonu kapsamında değerlendirilmektedir. TS 13515, EN 206'nın Tamamlayıcı Standardının (2025) 5.2.8 maddesi uyarınca en küçük kesit kalınlığı 90 cm'nin üzerinde olan yekpare yapılar için derzsiz kütle betonu koşulları geçerli olmakta, bu durum beton tasarımı ve uygulama sürecine ilişkin ek gereksinimleri beraberinde getirmektedir.

3.5.2 Beton Üretimi ve Yerleştirme

Beton üretimi, 3 m³ kazan hacmine sahip tam otomatik beton santralinde 1 m³'lük tasarım karışımı esasına göre gerçekleştirilmiştir. Her döküm günü için şantiye koşullarına özgü agrega rutubet düzeltmeli işyeri karışım tasarımı hazırlanmış, agrega rutubet değerleri düzenli aralıklarla ölçülerek gerekli su düzeltmeleri sürekli olarak uygulanmıştır. Üretilen taze beton, döküm yerinde pompa aracılığıyla mansap yönünden memba yönüne doğru kademeler hâlinde ve ilk kademe 50 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu döküm yönteminin seçimi, eğimli yüzey geometrisinde beton akışkanlığının kontrollü biçimde yönetilmesi ve segregasyonun önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Silis dumanı içeren betonların işlenebilecek en yüksek slump değerinde yerleştirilmesi gerekmekte, düşük slump değerlerinde vibratör uygulaması sırasında silis dumanının yol açtığı kohezyon artışının yeterli kompaksiyonu zorlaştırabileceği bilinmektedir. Bu nedenle sahadaki slump değerleri şartname sınırları çerçevesinde başlangıçta 18,0 cm ve 30. dakikada 14,0 cm olarak kayıt altına alınmış, beton yerleştirme işlemleri vibratörlü mastar kullanılarak son tabakada titreşimli kompaksiyon ile tamamlanmıştır.

3.5.3 Yüzey Bitirme

Dolusavak kanallarında kavitasyon direncini belirleyen etkenlerden biri de beton yüzeyinin kalitesidir. bu kalite, malzemenin mekanik dayanımıyla doğrudan ilişkili olmakla birlikte yüzey işçiliğine de bağlıdır. Kavitasyonun önlenmesi için beton yüzeyinin pürüzlülük katsayısının düşük tutulması zorunludur. Yüzey pürüzlülüğünün artması kavitasyon başlangıç baskısını düşürerek hasarı hızlandırmaktadır (Falvey, 1990). Bu nedenle döküm, yüzey bitirme ve kürleme işlemleri arasında hiçbir kesinti yaşanmadan art arda sürdürülmüştür.

Silis dumanı içeren betonların terleme miktarının konvansiyonel betonlara kıyasla düşük olması, yüzey bitirme sürecinde kritik bir zorluk oluşturmaktadır. Düşük terleme nedeniyle plastik kabuklanma ve yüzey bitirme işlemlerine daha erken başlanabilmekte; ancak erken başlanan yüzey bitirme işlemleri plastik rötre çatlaklarının tetiklenmesine zemin hazırlayabilmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla yüzey bitirme işleminden önce yerleştirilen betonun üzeri çift katlı ıslak telis ile örtülerek 20-30 dakika betonun terlemesine olanak tanınmıştır. Böylece çelik mastar uygulaması sırasında yüzeysel şerbetli tabakanın yukarı çıkması engellenmiş, homojen ve pürüzsüz bir döşeme yüzeyi elde edilmiştir. Dolusavak kanalı uygulamalarında donatı veya iri agrega tanelerinin altında oluşabilecek su ceplerine karşı da bu yaklaşımın koruyucu bir işlev üstlenir.

3.5.4 Kür Uygulamaları

Silis dumanı içeren betonlarda kür koşullarının önemi, konvansiyonel betonlara kıyasla çok daha kritik bir boyut kazanmaktadır. Bunun temel nedeni, silis dumanının puzolanik reaksiyonunun erken yaşlarda ve yeterli nem varlığında gerçekleşmesi, yetersiz kürün kapiler poroziteyi artırarak geçirgenliği olumsuz etkilemesi ve puzolanik reaksiyonun tamamlanmasını engellemesidir. Silis dumanının puzolanik reaktivitesinin, uçucu küle kıyasla çok daha yüksektir ve kür sıcaklığının artması puzolanik

reaksiyonu hızlandırır. Bu nedenle saha uygulamasında beton yüzey yerleştirildikten 10-15 dakika sonunda kür işlemi başlatılmıştır.

Kür yöntemi olarak ıslak telis (çuval bezi) ile örtme ve üzerinin plastik naylon ile kapatılması tercih edilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesinin gerekçesi, telisin yüzeyden sürekli nem sağlayarak beton yüzeyinden suyun buharlaşmasının ve su kaybının önlenmesi olup naylon örtünün ise buharlaşma hızını azaltarak telisin daha uzun süre ıslak kalmasını sağlamasıdır. Silis dumanı içeren betonlarda minimum 7 gün, tercihen 14 gün ıslak kür uygulanması önerilmekte, olumsuz hava koşullarında bu sürenin daha da uzatılması gerekmektedir. Kürleme tamamlanana kadar betonun yüzeyinin hiçbir biçimde tamamen kurumaya bırakılmaması ilkesi esas alınmıştır.

3.5.5 Döküm Sürecinde Kritik Gözlemler ve Alınan Önlemler

Saha uygulaması boyunca beton yerleştirme sıcaklığı ve taze beton özellikleri kayıt altına alınmıştır. Beton yerleştirme sıcaklığının şartnamede öngörülen eşiklerin altında tutulması, hidratasyon kaynaklı maksimum sıcaklık artışının kontrol altında yönetilebilmesi için zorunludur. Beton santral çıkışındaki taze beton sıcaklığı, katkılar ve karma suyu sıcaklığı düzenli aralıklarla ölçülmüş, şantiye koşullarında beton yerleştirme sıcaklığı, kütle betonları ve dolusavak şüt kanalı döşemesi için şartnamede belirlenen için Mayıs-Eylül dönemi 15°C, diğer aylar için 10°C üst sınırlarının altında tutulmuştur (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2013).

Silis dumanı içeren betonların döküm sürecinde plastik rötre riskine karşı alınan önlemler bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Rüzgar kırıcıların kurulması, güneş ışınlarına karşı geçici gölgeleme yapılarının kullanılması, yüzey spreyleme ile sisleme uygulaması ve gerekli hâllerde gece döküm programına geçiş, bu önlemlerin başında gelmektedir. Düşük su/çimento oranının sağladığı kompakt matris, silis dumanının dolgu etkisiyle birleşince betonun kendi kendini iyileştirme kapasitesini kısıtlamakta, bu nedenle önleyici tedbirlerin reaktif önlemlere kesinlikle tercih edilmesi gerekmektedir. Geniş yüzeyli döşeme uygulamalarında döküm başlayan bölgelerden tamamlananlara doğru kademeli olarak uygulanan ıslak örtü yöntemi, tüm döküm alanı boyunca eşzamanlı yüzey korumasını mümkün kılmaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Ilısu Barajı dolusavak kanalı için hesaplanan kavitasyon indeksi $\sigma = 0{,}18$, kritik eşik değerin ($\sigma < 0{,}20$) altında kalmış, bu durum kavitasyon direnci odaklı malzeme tasarımını zorunlu kılmıştır.
- İncelenen 12 karışım tasarımında ilk slump değerleri 12-19 cm arasında ölçülmüştür. Uçucu külün bilya etkisiyle işlenebilirliği iyileştirdiği, silis dumanının ise yüksek özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle su ihtiyacını artırdığı ve bu etkinin polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı ile başarıyla dengelendiği belirlenmiştir.
- 90 günlük küp basınç dayanımı 54,6-73,1 MPa arasında ölçülmüş, tüm karışımlarda C25/30 sınıfı için belirlenen 38,5 MPa hedef değeri aşılmıştır. Seçilen DS-FA15-SF5 karışımının saha 28 günlük küp basınç dayanımı 50,1 MPa ve 90 günlük basınç dayanımı ise 63 MPa ile C40/50 gereksinimlerini rahatlıkla karşılamıştır.
- Saha numunelerinden elde edilen maksimum su işleme derinliği 20-31 mm arasında kalmış, tüm değerler TS 13515 (2025)'te belirtilen ortalama 30 mm eşiğinin altında gerçekleşmiştir. Bu değer betonun kimyasallara karşı da geçirimsiz olduğunu göstermiştir.
- %20 FA + %10 SF-E kombinasyonunun 7 günlük toplam hidratasyon ısısı 54,0 Cal/g ile referans çimentonun (65,0 Cal/g) yaklaşık %17 altında kalmıştır. Saha ısılçift ölçümleri, merkez-yüzey sıcaklık farkının şartname sınırı olan 20°C'yi hiçbir kademede aşmadığını doğrulamıştır.
- Bütünleşik değerlendirme sonucunda 308,3 kg/m³ çimento, 46,3 kg/m³ uçucu kül ve 15,4 kg/m³ silis dumanından oluşan 370 kg/m³ toplam bağlayıcı dozajı ile 0,49 etkili su/bağlayıcı oranına sahip DS-FA15-SF5 karışımı seçilmiştir. Bu karışım, mekanik dayanım, su geçirimsizliği, hidratasyon ısısı kontrolü ve işlenebilirlik kriterlerini eşzamanlı olarak karşılamıştır. Silis dumanı oranının %5 ile sınırlandırılması, geniş yüzeyli döşeme dökümleri için plastik rötre ve otojenik rötre riskinin yönetiminde belirleyici bir etken olmuştur.
- Genel bir değerlendirme yapıldığında, F sınıfı uçucu kül ve mikrosilikanın birlikte kullanımına dayanan üçlü bağlayıcı sistemin, $\sigma = 0{,}18$ kavitasyon indeksiyle kritik eşiğin altında kalan bir dolusavak kanalında kavitasyon hasarına karşı malzeme temelli bir önlem olarak etkin

biçimde uygulanabildiği görülmüştür. Bu yaklaşımın, yüksek akım hızlarına maruz hidrolik yapılarda mineral katkılı beton tasarımına ilişkin mühendislik kararlarını destekleyen özgün saha verisine dayalı bir örnek teşkil ettiği değerlendirilmektedir.

- Çalışmanın devamında, sahadan alınacak beton karotları üzerinde beton petrografisi uygulanarak betonun mikroyapısı, agrega-çimento hamuru arayüzü (ITZ) ve mineral katkıların etkileri de incelenecektir.

Etik Beyan ve Teşekkür: Yazarlar, çalışmada kullanılan verilerin temini konusundaki desteği nedeniyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder. Makalede yer verilen tüm veriler Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait olup kurumun izniyle kullanılmıştır. Çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir kurum veya kuruluştan finansal destek alınmamış olup, yazar açısından herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalenin bilimsel içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazarlara aittir. Yazarlardan Aydın Sağlık Yayın Kurulu üyesi olmakla birlikte, bu makalenin editoryal değerlendirme ve hakemlik süreçlerine herhangi bir katkısı ve bu süreçlerle ilgili bilgisi olmamıştır. Derginin etik kuralları ve çift kör hakemlik sistemi bu makale için de titizlikle uygulanmıştır.

Editoryal Sürece ve İnceleme Süreçlerine ilişkin Beyan: Yazar Hüseyin Demir'in bu dergide Baş Editör Yardımcısı olarak görev yapması nedeniyle, bu makalenin editoryal değerlendirme ve hakemlik süreçlerine herhangi bir katılımı olmamış, editoryal kararlar bağımsız editör tarafından yürütülmüştür. Yazarın hakem değerlendirme sürecine ilişkin bilgi ve belgelere erişimi olmamıştır. Derginin etik kuralları ve çift kör hakemlik sistemi bu makale için de titizlikle uygulanmıştır.

Yazarların Katkısı: Bu çalışmaya Aydın Sağlık: Literatür araştırması, beton tasarımları, veri analizi, makale düzenleme; İnan Gündüz: Projenin uygulanması, veri analizi, makale düzenleme; Hüseyin Demir: Literatür araştırması, veri analizi ve derlemesi, makalenin yazımı ve makale düzenleme konularında katkı sağlamışlardır.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

American Concrete Institute. (2017). *Report on the erosion of concrete in hydraulic structures* (ACI 207.6R-17).

American Concrete Institute. (2021). *Guide to mass concrete* (ACI PRC-207.1-21).

American Concrete Institute. (2025). *Building code requirements for structural concrete and commentary* (ACI CODE-318-25).

Alsulami, N. S., & Chen, H. L. (2025). Prediction of adiabatic temperature rise of concrete containing fly ash using on-site measurement and multi-scale modeling. *Journal of Composites Science*, *9*(11), Article 574. https://doi.org/10.3390/jcs9110574

ASTM International. (2020). *Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures* (ASTM C1240-20). https://doi.org/10.1520/C1240-20

ASTM International. (2024). *Standard specification for concrete aggregates* (ASTM C33/C33M-24). https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-24

ASTM International. (2024). *Standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry* (ASTM C1702-24). https://doi.org/10.1520/C1702-24

ASTM International. (2025). *Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete* (ASTM C618-25). https://doi.org/10.1520/C0618-25

Chen, W., Wu, M., & Liang, Y. (2024). Effect of SF and GGBS on pore structure and transport properties of concrete. *Materials*, *17*(6), Article 1365. https://doi.org/10.3390/ma17061365

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2013). *Silis dumanlı beton uygulaması teknik raporu*.

Falvey, H. T. (1990). *Cavitation in chutes and spillways* (Engineering Monograph No. 42). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/pubs/EM/EM42.pdf

Kells, J. A., & Smith, C. D. (1991). Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering, 18*(3), 358–377. https://doi.org/10.1139/l91-047

Kim, B.-J., Lee, G.-W., & Choi, Y.-C. (2022). Hydration and mechanical properties of high-volume fly ash concrete with nano-silica and silica fume. *Materials, 15*(19), 6599. https://doi.org/10.3390/ma15196599

Kumar, G. B. R., Bhardwaj, A., & Sharma, U. K. (2018). Cavitation resistance of concrete containing different material properties. *Advances in Concrete Construction, 6*(1), 15–28. https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.1.015

Lekhya, A., & Kumar, N. S. (2024). A study on the effective utilization of ultrafine fly ash and silica fume content in high-performance concrete through an experimental approach. *Heliyon, 10*(22), e39678. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39678

Li, L., Li, B., Mo, S., Nong, Q., Wang, Z., & Zhang, Z. (2025). Cavitation erosion behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composites. *Wear, 580–581*, 206282. https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206282

Liu, Q., Andersen, L. V., Zhang, M., & Wu, M. (2024). Abrasion damage of concrete for hydraulic structures and mitigation measures: A comprehensive review. *Construction and Building Materials, 422*, 135754. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135754

Lu, X., Wang, L., Chen, C., Chen, J., Zhou, J., & Deng, J. (2023). Study on the influence mechanism of material damage on the cavitation erosion properties of hydraulic concrete. *Construction and Building Materials, 400*, 132849. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132849

Lü, Q., Qiu, Q., Zheng, J., Wang, J., & Zeng, Q. (2019). Fractal dimension of concrete incorporating silica fume and its correlations to pore structure, strength and permeability. *Construction and Building Materials, 228*, 116986. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116986

National Energy Administration. (2021). *Technical specification for abrasion and cavitation erosion resistance of concrete in hydraulic structures* (DL/T 5207–2021). https://www.ndls.org.cn

Niu, W., Dou, T., Xia, S., & Li, M. (2025). Investigating damage evolution of concrete with silica fume under freeze–thaw conditions using DIC technology and gray model approach. *Buildings, 15*(22), 4051. https://doi.org/10.3390/buildings15224051

Padavala, S. S. A. B., Avudaiappan, S., Paluri, Y., Bharath, C. N., Prathipati, S. R. R. T., & Kumara, A. M. (2025). Self-compacting concrete with fly ash and silica fume: Experimental evaluation, microstructural analysis, and machine learning modeling. *Scientific Reports, 15*, 45146. https://doi.org/10.1038/s41598-025-33180-7

Shelote, K. M., Meera, M., Supravin, K., & Gupta, S. (2023). Study on modified water permeability method for fly ash concrete in comparison with DIN 1048 (Part 5). *Arabian Journal for Science and Engineering, 48*(10), 13337–13352. https://doi.org/10.1007/s13369-023-07831-8

Smarzewski, P. (2023). Mechanical and microstructural studies of high performance concrete with condensed silica fume. *Applied Sciences, 13*(4), 2510. https://doi.org/10.3390/app13042510

Šoukal, F., Bocian, L., Novotný, R., Dlabajová, L., Šuleková, N., Hajzler, J., Koutný, O., & Drdlová, M. (2023). The effects of silica fume and superplasticizer type on the properties and microstructure of reactive powder concrete. *Materials, 16*(20), 6670. https://doi.org/10.3390/ma16206670

Türk Standardları Enstitüsü. (2012). *TS EN 197-1: Çimento—Bölüm 1: Genel çimentolar—Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2009). *TS 706 EN 12620+A1: Beton agregaları*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2003). *TS EN 1008: Beton—Karma suyu—Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dâhil, suyun beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2024). *TS EN 480-6: Kimyasal katkılar—Beton, harç ve şerbet için—Deney metotları—Bölüm 6: Kızıl ötesi analiz*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2013). *TS EN 450-1: Uçucu kül—Betonda kullanılan—Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2010). *TS EN 13263-1+A1: Silis dumanı—Betonda kullanılan—Bölüm 1: Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN 12350-2: Beton—Taze beton deneyleri—Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN 12390-3: Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2024). *TS EN 12390-6: Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN 12390-5: Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2021). *TS EN 12390-13: Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 13: Basınç altında sekant elastisite modülünün tayini*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN 12390-8: Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini*.

Türk Standardları Enstitüsü. (2025). *TS 13515: TS EN 206'nın uygulanmasına yönelik tamamlayıcı standart*.

U.S. Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams* (3rd ed.). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

Van Tran, M., & Chau, V. N. (2021). Mass concrete placement of the offshore wind turbine foundation: A statistical approach to optimize the use of fly ash and silica fume. *International Journal of Concrete Structures and Materials, 15*, 50. https://doi.org/10.1186/s40069-021-00491-8

Wang, X., Li, X., Zhong, Y., Li, H., & Wang, J. (2024). Properties and microstructure of an interfacial transition zone enhanced by silica fume in concrete prepared with coal gangue as an aggregate. *ACS Omega, 9*(1), 1870–1880. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08560

Zakrzewska, D. E., & Krella, A. K. (2019). Cavitation erosion resistance influence of material properties. *Advances in Materials Science, 19*(4), 18–34. https://doi.org/10.2478/adms-2019-0019

Zanial, W. N. C. W., Zawawi, M. H., Sidek, L. M., Abas, M. A., Dullah, H., Hassan, N. H., Radzi, M. R. M., & Rahman, A. H. A. (2024). A review: Cavitation on dam spillway. In L. M. Sidek, G. H. A. Salih, A. N. Ahmed, I. Escuder-Bueno, & H. Basri (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Dam Safety Management and Engineering (ICDSME 2023)* (pp. 837–845). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3708-0_58

Vaka Çalışması / Case Study

Tatarlı ve Aslanpınarı (Ceyhan-Osmaniye) Kaynaklarının Hidrojeolojik Özellikleri ve Oluşum Modeli

Hydrogeological Characteristics and Conceptual Model of Tatarlı and Aslanpınarı (Ceyhan-Osmaniye) Springs

Ziya BERKKAYA[1*], Hilal DOKUZ[2], Uğur Erdem DOKUZ[3]

[1]*Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, 6. Bölge Müdürlüğü, Adana*
[2]*Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kırşehir*
[3]*Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Niğde*

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: ziya.berkkaya@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 04.06.2026, Düzeltme (Revised): 26.06.2026, Kabul (Accepted): 30.06.2026

ÖZ

Bu çalışma kapsamında Ceyhan-Osmaniye sınırında yer alan ve bölgenin en önemli su kaynaklarından olan Tatarlı ve Aslanpınarı kaynak alanlarının hidrojeolojik özellikleri incelenmiştir. Bölgesel hidrojeolojik özellikler ışığında kaynakların beslenme boşalım döngüsü belirlenmiş ve kaynakların oluşumunda etkin olan faktörler belirlenmiştir. Tatarlı kaynakları 3 farklı noktadan toplam ortalama 6,09 m^3/sn, Aslanpınarı kaynakları ise 2 farklı noktadan ortalama 0,49 m^3/sn debi ile boşalmaktadır. Her iki kaynağın boşalımında da alanda yayılım gösteren Delihalil Bazaltları yüksek geçirimli özelliğiyle kritik rol oynamaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen, hidrografi analizleri, su bütçesi hesaplamaları, infiltrasyon testleri ve yeraltısuyu seviye dağılımları kaynakların besleniminde alüvyon akiferin önemli bir katkısının olduğunu göstermiştir. Yağış-debi ilişkisi incelendiğinde dönemsel olarak ortaya çıkan ters ilişki başta karbonatlı kayaçlardan oluşan temel formasyonlardan oluşan akiferlerle kaynakları besleyen yeraltısuyu sistemini yanal ve düşey yönde beslediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojeoloji, kaynak koruma, Tatarlı ve Aslanpınarı kaynakları, hidrografi, kaynak oluşum modeli

ABSTRACT

This study investigated the hydrogeological characteristics of the Tatarlı and Aslanpınarı spring areas, located on the Ceyhan-Osmaniye border and considered among the most important water sources in the region. Based on regional hydrogeological characteristics, the discharge cycle of the springs was determined, and the factors influencing their formation were identified. The Tatarlı springs discharge from three different points with a total average flow rate of approximately 6,04 m^3/s, while the Aslanpınarı springs discharge from two different points with an average flow rate of approximately 0,49 m^3/s. The Delihalil Basalts, which are widespread in the area, play a critical role in the discharge of both springs due to their high permeability. Hydrographic analyses, water budget calculations, infiltration tests, and groundwater level distributions conducted within the scope of this study showed that the alluvial aquifer makes a significant contribution to the recharge of the springs. When the precipitation-discharge relationship was examined, the inverse relationship observed periodically showed that the groundwater system feeding the springs is fed laterally and vertically by aquifers consisting mainly of carbonate rock formations.

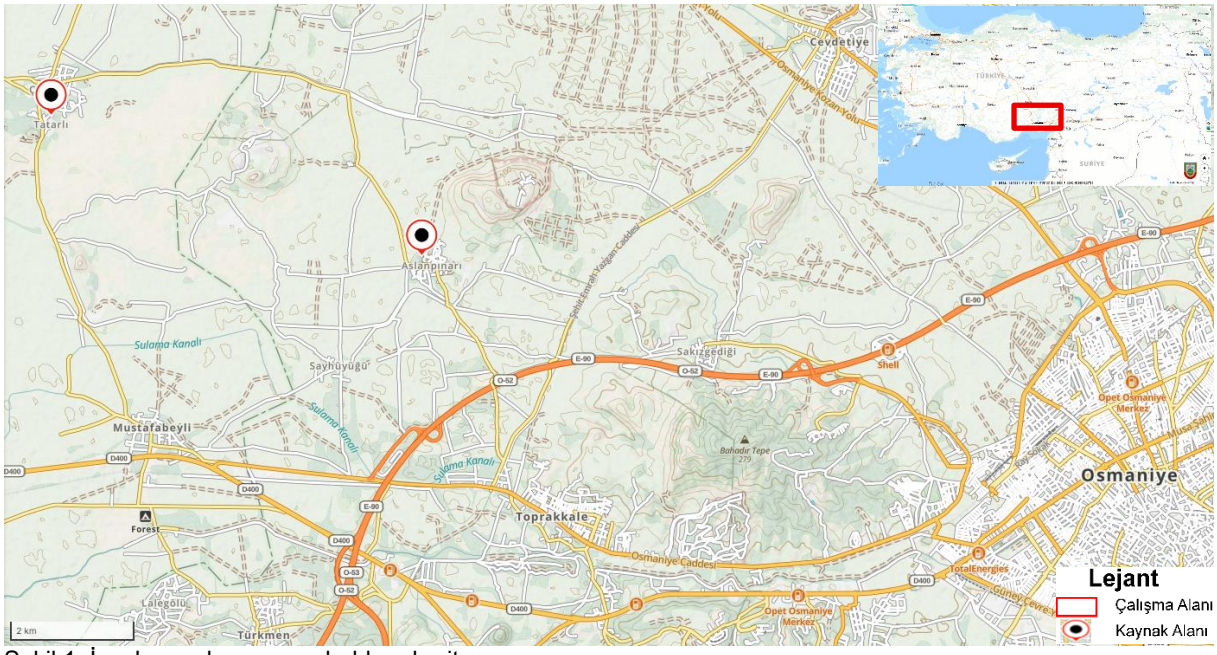
Keywords: Hydrogeology, water source conservation, Tatarlı and Aslanpınarı water sources, hydrography, water source formation model

1 Giriş

Ekosistemin önemli bir yapıtaşı olan su kaynakları artan ve çeşitlenen arazi ve su kullanımının yanı sıra küresel iklim değişikliği gibi sebeplerle miktar ve kalite bakımından baskı altındadır. Bu nedenle gerek ekolojik gerekse sosyo-ekonomik yapının suya bağımlı olduğu bölgelerde su kaynaklarının miktar ve kalite bakımından korunması, bu ekolojik ve sosyo-ekonomik sistemin sürdürülebilirliği için önem arz etmektedir (Brehme vd., 2011; Berhe vd., 2017; Dokuz vd., 2018; Krešić ve Stevanović, 2010; Sunkari vd., 2019; Ersoy vd., 2023). Bu bakımdan su kaynakları stratejik bir öneme de sahiptir (Anderson, 1992, 2019). Bu nedenle yaygın olarak su kaynaklarını koruma stratejileri geliştirilmektedir (Barquín ve Scarsbrook, 2008; Goldscheider, 2010; Krešić, 2010; Çelik vd., 2013; Amanambu vd., 2020).

Bulunduğu coğrafya itibariyle ülkemiz su kaynaklarının miktar, karakter ve dağılım bakımından heterojen bir özellik sergilemektedir. Buna karşın ülkemizin birçok böylesinde sosyo-ekonomik yapı önemli ölçüde su kaynaklarına bağımlı olarak tesis edilmiştir. Bu nedenle su kaynakları özellikle söz konusu bölgelerde kalkınmanın ve refahın sürdürülebilirliğinin teminatıdır. Ülkemizde kaynakların bu önemine binaen başta Devlet Su İşleri olmak üzere, belediyeler ve valilikler tarafından kaynak koruma çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Söz konusu çalışmaların başarıya ulaşması için ise su kaynakların beslenim boşalım ilişkilerinin ve kaynağın oluşumuna sebep olan hidrojeolojik koşulların ayrıntılı şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Yüzer vd., 1992; Yüce, 2001; Çelik vd., 2013; Nigate vd., 2016; Tahmasebzadeh Bastam ve Gültekin, 2017; Afşin vd., 2019; Khadka ve Rijal, 2020).

Çalışmanın konusunu oluşturan Tatarlı ve Aslanpınarı kaynak alanları Osmaniye-Adana (Ceyhan) sınırında yer almaktadır. Tatarlı Kaynakları Adana (Ceyhan) il sınırlarında kalırken, yaklaşık 8 km DGD'sunda bulunan Aslanpınarı Kaynakları ise Osmaniye il sınırlarında kalmaktadır (Şekil 1). Çukurova'nın kuzeydoğu sınırında bulunan inceleme alanı bölgenin iklimsel özelliklerinin yanı sıra hemen kuzey/kuzeydoğusundan yükselmeye başlayan Toroslar ve bu yükselimle ilişkili olarak oluşan Ceyhan Ovası'nın jeolojik karakteri gereği su kaynakları bakımından zengindir. Çalışma kapsamında incelenen Tatarlı ve Aslanpınarı kaynakları oluşumlarına sebep olan jeolojik ve hidrojeolojik etmenler bakımından önemli ve ilgi çekicidir. Alanın coğrafi ve iklimsel koşullarının yanı sıra alanda Kuvaterner döneminde meydana gelen volkanik aktivitenin ürünleri hidrojeolojik olarak kritik öneme sahiptir. Zira çalışmaya konu olan Tatarlı ve Aslanpınarı kaynakları bu volkaniklerle ilişkili olarak boşalmaktadır. Çalışma kapsamında Tatarlı ve Aslanpınarı kaynaklarının oluşumunda etkin olan hidrojeolojik koşullar incelenerek kaynakların beslenme-boşalım ilişkileri saptanmış, oluşum modeli belirlenmiş ve kaynak koruma stratejileri değerlendirilmiştir.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası

2 Materyal ve Metot

Bu çalışmada Adana ili Ceyhan ilçesi ve Osmaniye ili Merkez ilçesi sınırlarında bulunan dört mevsim nispeten yüksek debide akış gösteren Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla Kasım 2025 ve Mayıs 2026 olmak üzere kurak ve yağışlı dönem

sonlarında arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynak alanları ve dolayında bulunan DSİ ve şahıs kuyuları tespit edilmiş, Mayıs 2026 tarihli arazi çalışmaları kapsamında kuyularda su seviyesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Tablo 1). Kaynakların beslenimi ve boşalımında önemli rol oynayan kuvaterner yaşlı bazaltların infiltrasyon özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yüzey pürüzlülüğü, alterasyon ve eğim özellikleri dikkate alınarak 4 lokasyonda çift halka infiltrasyon testleri gerçekleştirilmiştir. DSİ (2011) tarafından gerçekleştirilen debi ölçümleri yardımıyla kaynağın boşalım özellikleri değerlendirilmiştir. İnceleme alanı dolayında açılmış sondaj kuyularına ait loglar ve çalışmadan elde edilen diğer bulgular birlikte değerlendirilerek Tatarlı ve Aslanpınarı kaynaklarının hidrojeolojik özellikleri ve oluşum modelleri saptanmıştır.

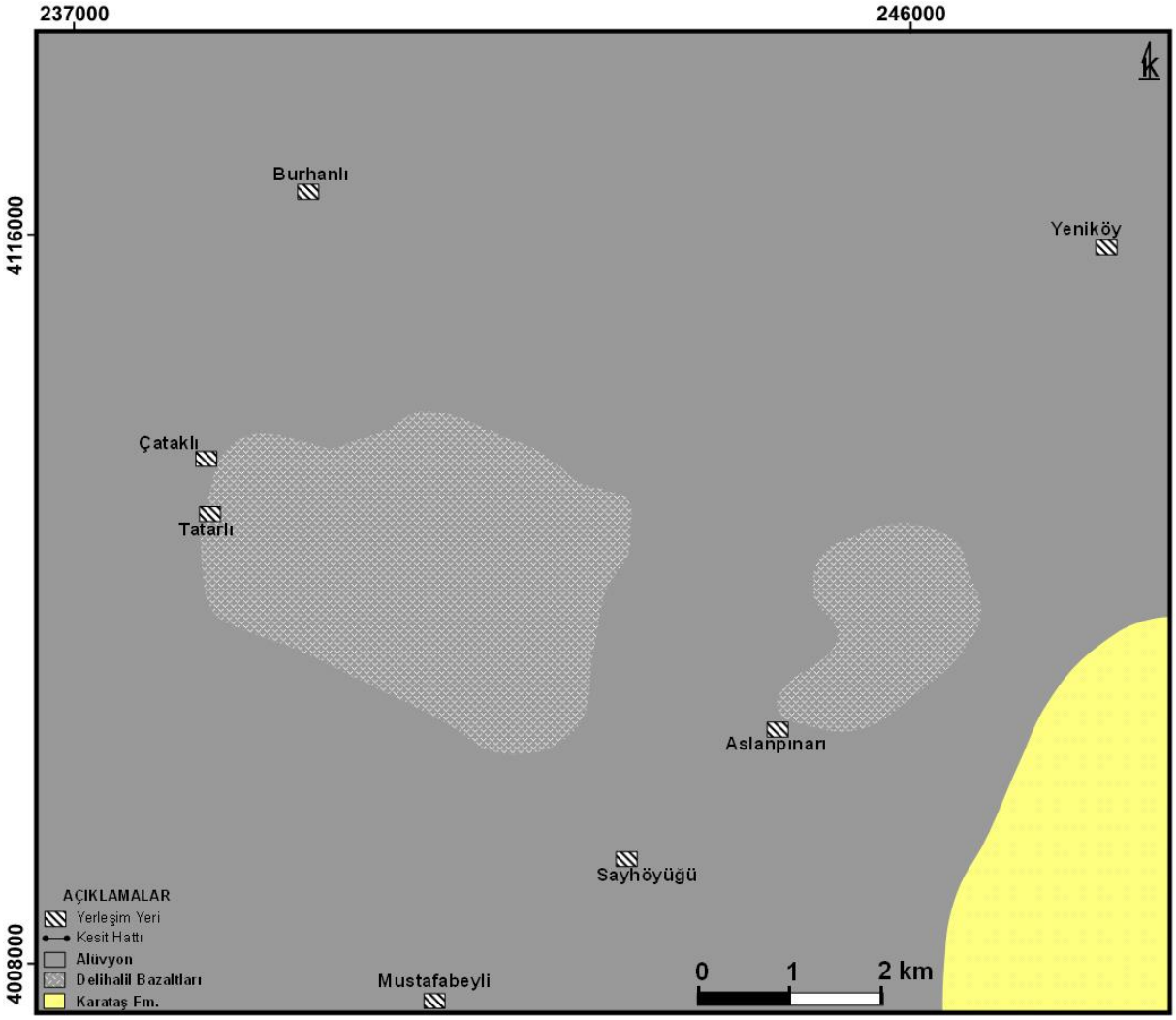
Tablo 1. Çalışma kapsamında seviye ölçümü gerçekleştirilen kuyular

Kuyu Adı	Kuyu No	Mevkii	Yeraltı Suyu Seviyesi (m)
DSİ-KH4305	1	Sayhüyüğü	33,5
Aslanpınarı Şahıs1	2	Aslanpınarı	36,8
DSİ-K9127	3	Aslanpınarı	38,2
Aslanpınarı Şahıs2	4	Aslanpınarı	41,3
Tatarlı Şahıs 1	5	Tatarlı	30,1
Tatarlı Şahıs2	6	Tatarlı	34,2
DSİ-60160	7	Tatarlı	34,7
KH5997	8	Yeniköy	50,2

3 Bulgular ve Tartışma

3.1 İnceleme Alanının Jeolojik Özellikleri

İnceleme alanı dolayının jeolojik özellikleri Afrika-Arap plakası ile Avrasya plakasının K-G yönlü yakınlaşması kontrolünde gelişmiştir. Amanos Dağları'nın batısında bulunan inceleme alanında, bu yakınlaşma etkisi ile Paleozoyik-Kuvaterner yaş aralığına sahip litolojiler yüzeylenmektedir. Paleozoyik yaşlı temel birimler, Üst Kretase yaşlı ofiyolitler tarafından tektonik dokanakla üzerlenmektedir. Ofiyolitik birimler ise Miyosen yaşlı birimlerce uyumsuz olarak örtülmektedir. Bu birimler inceleme alanının güneydoğusunda yüzeylenen Karataş formasyonu ile temsil edilmektedir. Karataş formasyonu kumtaşı-marn-kumlu kireçtaşı-çamurtaşı ardalanması ile temsil edilen türbiditik bir istiften oluşmaktadır (Ünlügenç ve Akıncı, 2017). İnceleme alanında stratigrafik dizinin en üst seviyelerini oluşturan Kuvaterner birimler alanda geniş yayılım göstermektedir. Bunlar başta Ceyhan Nehri tarafından taşınan sedimanlarca oluşturulmuş olan gevşek depolanmış örtü birimlerle temsil edilmektedir (Şekil 2). Kuvaterner boyunca Ceyhan Nehri'nin debi değişimleri ve deniz ile etkileşimi sonucunda alüvyon örtü heterojen bir yapı kazanmıştır. Kaynak alanlarında geniş yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı birimler kuzey kesimlerde yamaç molozu daha güneyde ise alüvyon birimlerden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra bölgede Kuvaterner'de etkin olmuş volkanizmanın ürünleri olan bazaltlar özellikle kaynak alanlarında geniş yayılım göstermektedir. Başlıca bazaltik karakterli lav akıntılarından oluşan Delihalil Bazaltları gaz boşluklu ve soğuma kuruma çatlaklı bir yapıya sahiptir (Şekil 3 ve 4). Bilgin ve Ercan (1981), yapmış oldukları çalışmada bazaltların plajiyoklas, olivin ve titanlı ojit bileşiminde olduklarını belirtmişlerdir.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası


Şekil 3. İnceleme alanında Delihalil Bazaltları'nın arazi görünümü



Şekil 4. Delihalil Bazaltları'nın yakından görünümü

3.2 İnceleme Alanının Hidrojeolojik Özellikleri

3.2.1 İklim ve Hidrometeoroloji

İncele alanında tipik Akdeniz iklimi görülmektedir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve bol yağışlı geçmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden derlenen, Osmaniye iline ait uzun yıllar (1986-2025) yağış-sıcaklık verilerine göre en soğuk ay Ocak (ort. 8,9 ºC); en sıcak ay ise Ağustos ayıdır (ort. 28,7 ºC). Temmuz-Ağustos döneminde azalmakla birlikte bölgeye yıl boyunca yağış düşmektedir. Uzun yıllar verilerine göre en çok yağış alan ay ortalama 115,6 mm ile Mart ayı iken, en az yağış Ağustos ayında düşmektedir (Tablo 2). Yıllık toplam ortalama yağış miktarı 808,7 mm'dir.

Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın yağıştan doğrudan beslenim miktarı hakkında yaklaşımda bulunabilmek amacıyla Thornthwaite (1948) yağış-nem bilançosu hesaplanmıştır. Bu amaçla Osmaniye iline ait sıcaklık değerlerinden yararlanılarak Potansiyel Evapotranspirasyon (Etp) miktarları aylık hesaplanmıştır (Denklem 1).

$$Etp = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^{a} \quad (1)$$

Burada;

T_i: i ayına ait aylık ortalama sıcaklık (°C)

I : yıllık ısı indisi olup Denklem 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

a: Thornthwaite evapotranspirasyon katsayısı olup Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

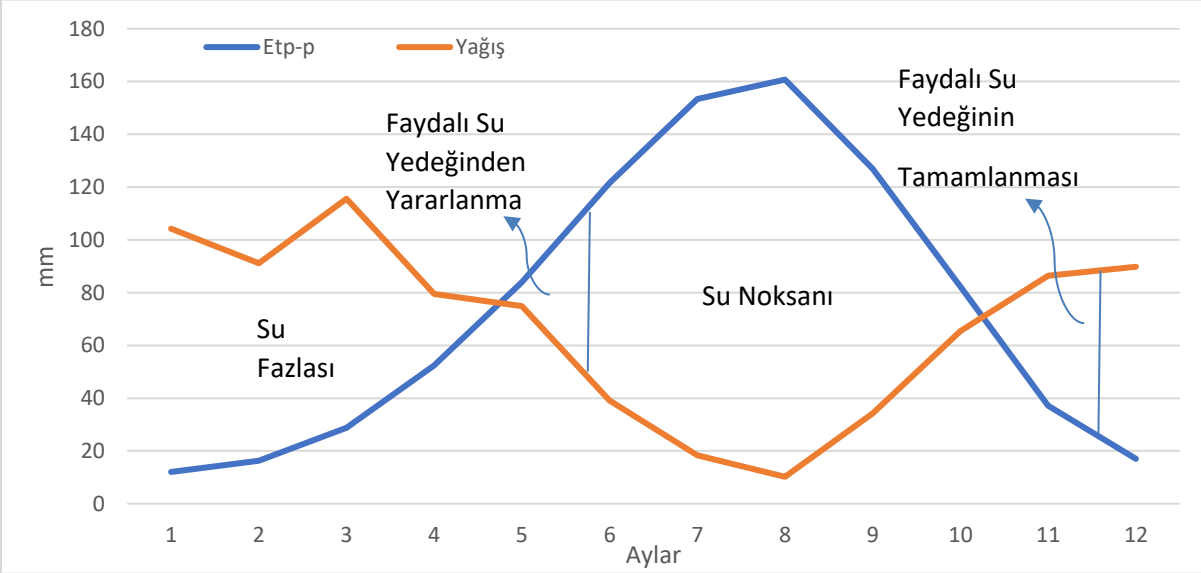
$$I = \sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad (2)$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.792 \times 10^{-2})I + 0.49239 \quad (3)$$

Yağış-nem bilançosu hesaplamalarında toprağın faydalı su yedeği bölgesel özellikler dikkate alınarak 100 mm kabul edilmiştir. Buna göre bölgede Mayıs-Kasım döneminde su noksanı oluşurken, Aralık-Nisan döneminde su fazlası oluşmaktadır (Şekil 5). Yıllık toplam su fazlası 282,02 mm olup yıllık ortalama toplam yağışın %34,87'sine tekabül etmektedir.

Tablo 2. Osmaniye ili uzun yıllar (1986-2025) meteoroloji verileri kullanılarak hazırlanmış Thornthwaite (1948) yağış-nem bilançosu

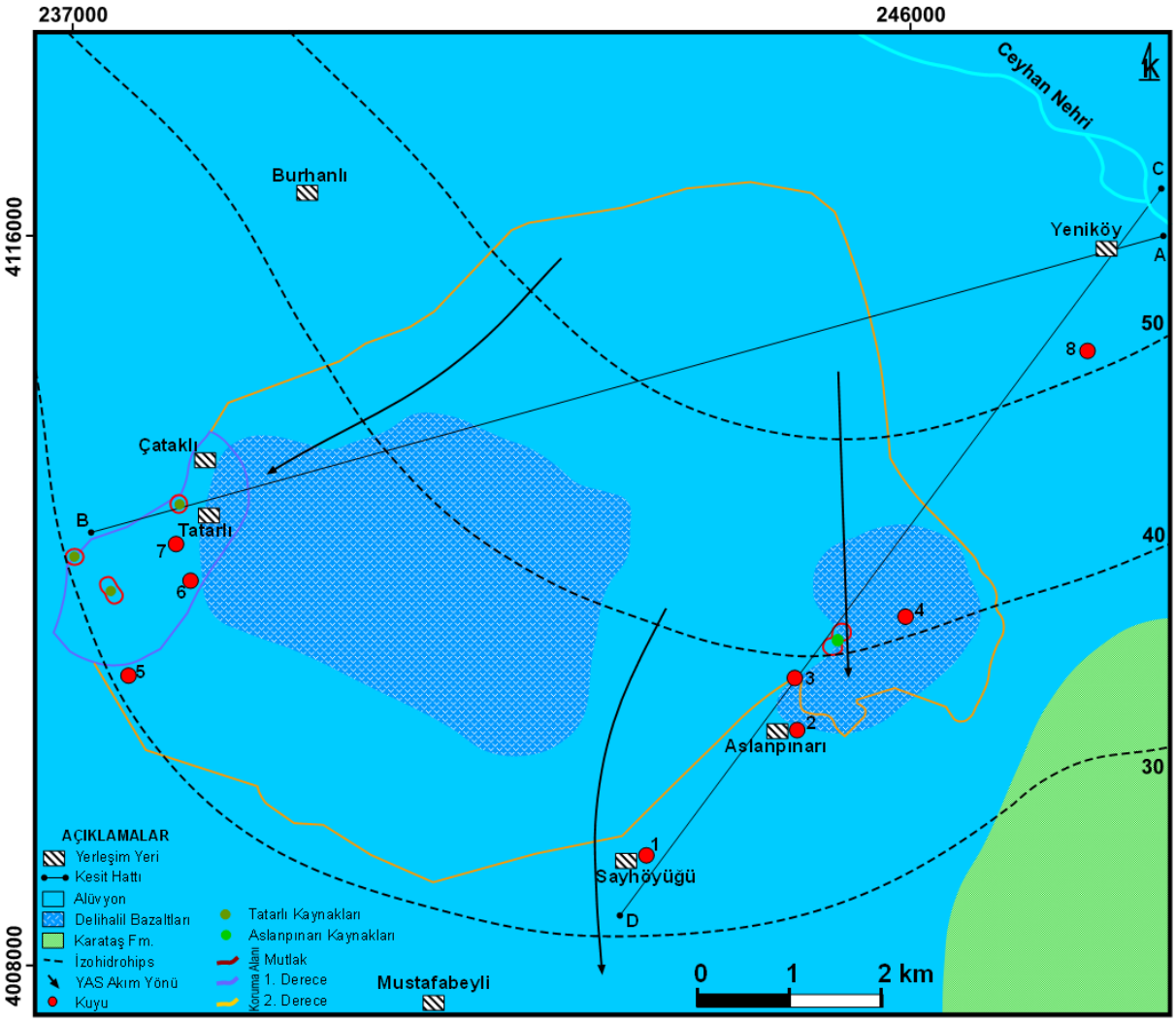
Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
T (ºC)	8,9	10,2	13,2	17,3	21,4	25,3	28,1	28,7	25,8	21,2	14,8	10,4
Düzeltilmiş Etp (mm)	10,36	13,68	29,68	57,68	102,42	149,57	191,75	188,07	130,80	79,76	31,55	14,11
Yağış-P (mm)	104,2	91,1	115,6	79,5	74,9	39,1	18,3	10,2	34,2	65,4	86,4	89,8
Faydalı Su Yedeği (mm)	100	100	100	100	72,48	-	-	-	-	-	54,85	100
Gerçek Buharlaşma Terleme (mm)	10,4	13,7	29,7	57,7	102,4	111,6	18,3	10,2	34,2	65,4	31,6	14,1
Su Noksanı (mm)	-	-	-	-	-	37,99	173,45	177,87	96,60	14,36	-	-
Su Fazlası (mm)	93,84	77,42	85,92	21,82	-	-	-	-	-	-	-	30,54



Şekil 5. Thornthwaite yağış-nem bilançosu grafiği

3.2.2 Hidrojeoloji

Çalışma kapsamında yapılan arazi ve uzaktan algılama incelemeleri Tatarlı ve Aslanpınarı kaynaklarının oluşumunda alanda yüzeylenen birimlerin hidrojeolojik özelliklerinin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Kaynakların ve kaynakların beslendiği Kuvaterner yaşlı bazaltların konumu ve alüvyon örtü ile ilişkisi kaynakların boşalımında olduğu kadar besleniminde de önem arz etmektedir (Şekil 6). Alüvyon örtü, başlıca Ceyhan Nehri'nin taşıdığı sedimanları Akdeniz kıyısına depolamasıyla oluşmuş olup, Kuvaterner dönemi boyunca akarsu seviye ve yatak değişimleri, kıyı çizgisi ve enerji değişimleri neticesinde farklı tane boylarından oluşan heterojen bir yapı göstermektedir. Söz konusu süreçler etkisiyle meydana gelen yapı nedeniyle ince ve kaba taneli tortulların düzensiz şekilde ardalanması neticesinde geçirimli ve geçirimsiz seviyeler meydana gelmiştir.



Şekil 6. İnceleme alanının hidrojeoloji haritası

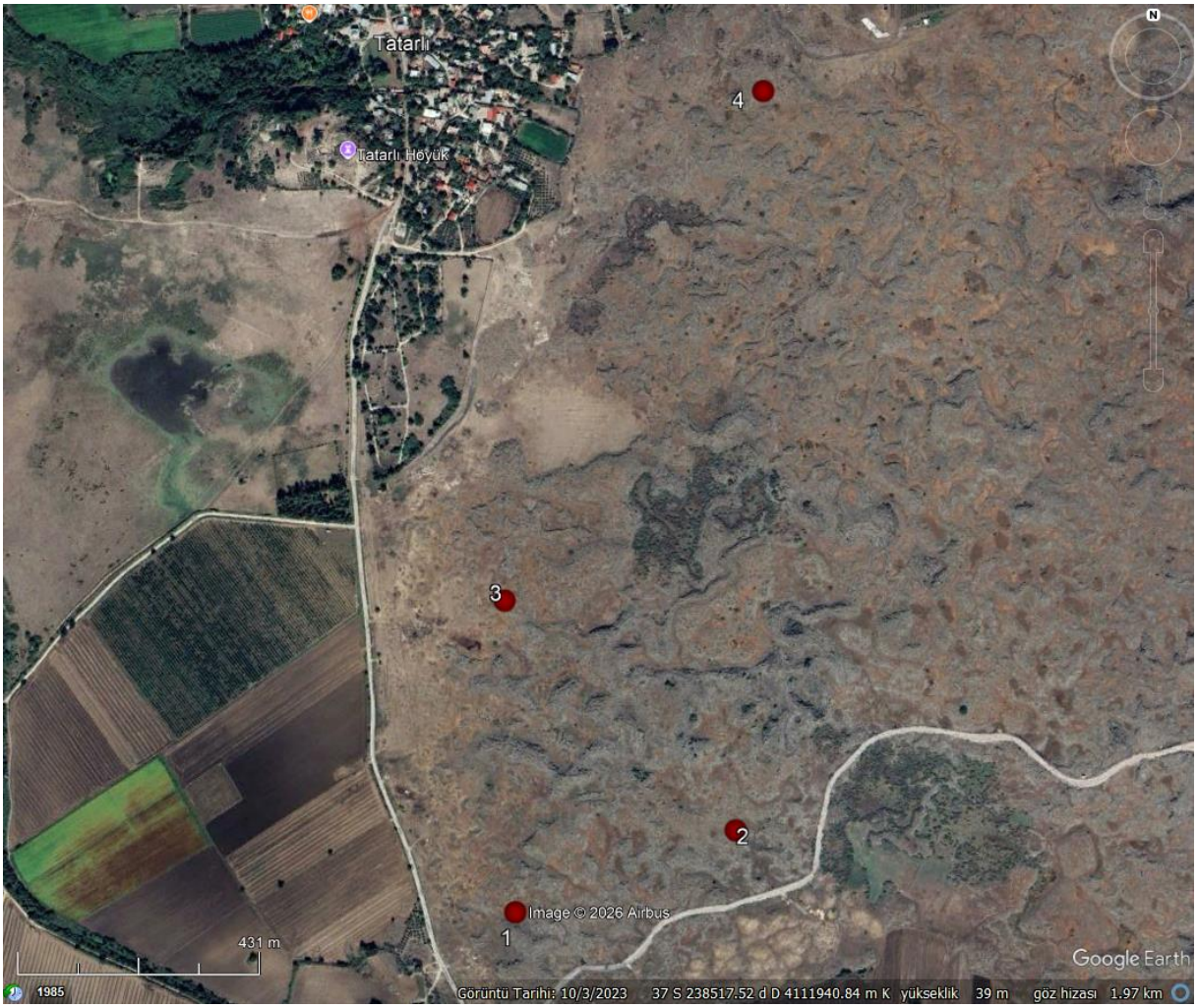
Kuvaterner döneminde meydana gelen volkanik aktivite neticesinde oluşan bazaltlar ise inceleme alanı özelinde kırıklı-çatlaklı bir yapıya sahiptir. Holosen döneminde de aktivitesini sürdüren ve Delihalil Bazaltları'nın oluşumunda rol oynayan Yumurtalık Fayı, devam eden hareketi neticesinde soğuma çatlakları içeren bazaltların çatlaklı yapısının daha da gelişmesine sebep olmuştur. Bu durum Delihalil Bazaltları'na önemli bir akifer özelliği kazandırmıştır. Serbest akifer karakterine sahip kırıklı çatlaklı Delihalil Bazalt akiferinin tabanını birimin masif kesimleri ve/veya Karataş formasyonunun ince taneli seviyeleri oluşturmaktadır. Kaynakların beslenim ve boşalım dinamikleri üzerinde önemli etkisi olan bu birimlerin yüzeyden beslenme miktarlarının saptanabilmesi ve hidrolik iletkenlikleri hakkında fikir edinebilmek amacıyla çalışma kapsamında Tatarlı bölgesinde 4 farklı noktada çift halka infiltrometre testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Çift halka infiltrasyon testleri kapsamında infiltrasyon hızları Denklem 4; yaklaşık süzülme katsayıları ise Denklem 5 kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Tatarlı Kaynak alanının menbaa bölgesinde alterasyon derecesi, topoğrafya gibi özelliklere bağlı olarak Delihalil Bazaltları'nın süzülme hızı 1,82-2,32 m/gün (ort. 2,06 m/gün) arasında; süzülme katsayıları ise %25,91-44,74 (ort. %36,32) arasında değişmektedir (Şekil 8; Tablo 3). Doğrudan bazaltlar üzerinde gerçekleştirilen infiltrasyon ölçümleri yaygın olmamakla birlikte doğrudan bazalt ve bazaltlar üzerinde oluşan topraklarda yapılan ölçümler sonucunda infiltrasyon değerleri 0,17-17,32 m/gün arasında değişmektedir (Fatehnia vd., 2016; Kalam ve Ramesh, 2016; Muntohar vd., 2025). Doğrudan bazaltlar üzerinde yapılan testlere ait sonuçlar dikkate alındığında Tatarlı bölgesinde yüzeylenen bazaltların nispeten yüksek süzülme hızlarına sahip oldukları görülmektedir.

$$Vi = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4)$$

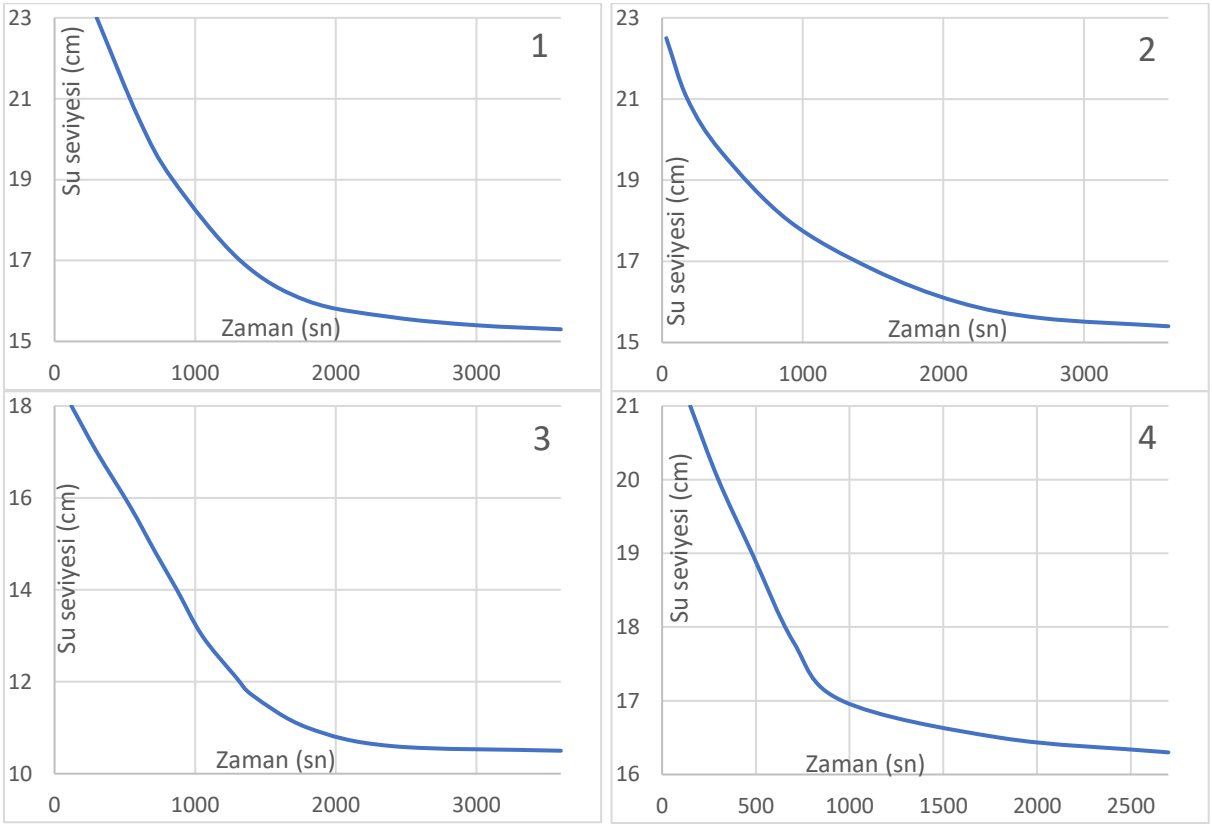
Burada;
Vi: infiltrasyon hızı (m/sn)
Δh: test süresince gerçekleşen seviye değişimi (m)
Δt : test süresi (m)

$$Kf = \frac{h0 - ht}{\mathrm{h0}} \quad (5)$$

Burada;
Kf: infiltrasyon oranı (m/sn)
h_0 : test başlangıcında su seviyesi (m)
Δt : test süresi (m)



Şekil 7. Çift halka infiltrometre test lokasyonları



Şekil 8. Çift halka infiltrometre testinden elde edilen seviye-zaman grafikleri

Tablo 3. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen çift halkalı infiltrometre test sonuçları

	İnfiltrasyon Hızı (m/gün)	Süzülme Katsayısı (%)
1	2,33	38,80
2	2,06	35,83
3	2,04	44,74
4	1,82	25,91
Ort.	2,06	36,32

Delihalil Bazaltları'nın yüksek geçirimli karakteri kaynak oluşumunun yanı sıra bölgesel yeraltısuyu seviye değişimlerinde de etkili olmaktadır. İnceleme alanı dolayında bulunan DSİ ve şahıs kuyularında yapılan yeraltısuyu seviye ölçümleri ile elde edilen yeraltısuyu seviye dağılımları, Delihalil Bazaltları'nın yayılım gösterdikleri alanda yeraltısuyu akım yönlerinin bazaltlara doğru değiştiği görülmektedir (Şekil 6). Yeraltısuyu seviye dağılımlarını etkileyen bir diğer unsur ise volkanikleri besleyen alüvyon akiferin yayılımı ve beslenim koşullarıdır.

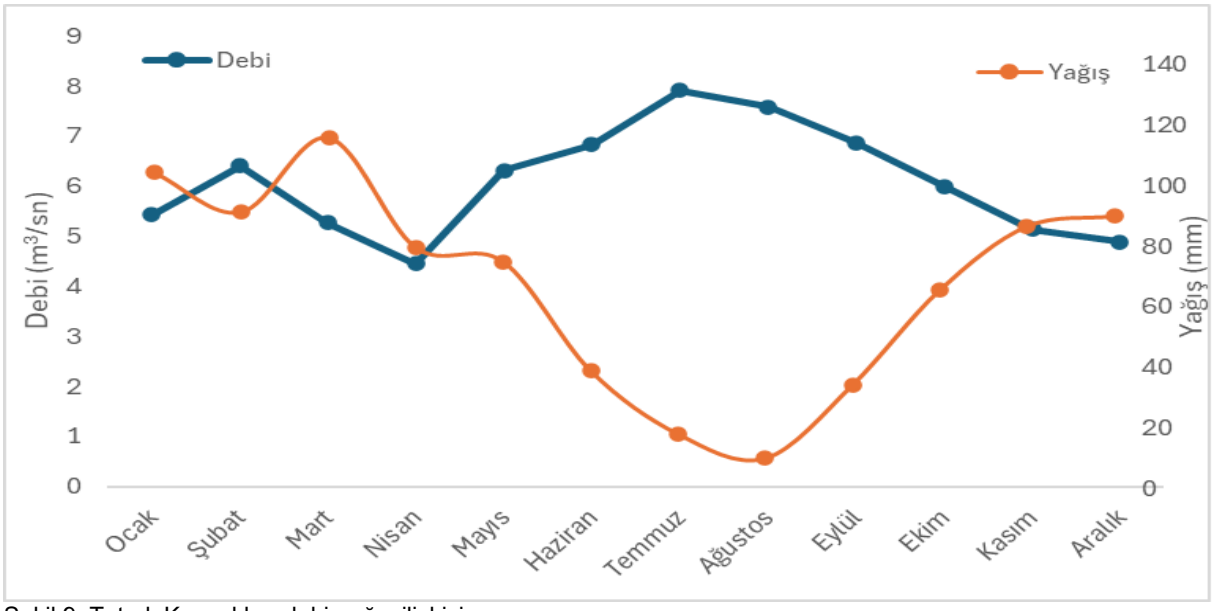
3.2.3 Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları

İnceleme alanı dolayının en önemli su kaynakları olan Tatarlı ve Aslanpınarı kaynakları beslenme-boşalım döngüsü ve oluşumunda jeolojik koşulların etkinliği bakımından özel öneme sahiptir. Kaynak alanlarında yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı Delihalil Bazaltları sahip olduğu birincil (soğuma) ve ikincil (faylanma) çatlaklı yapısıyla geçirimli karakter kazanarak, Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın besleniminde etkin olmuştur. Delihalil Bazaltları ile Kuvaterner biriminin dokanağında, Tatarlı Kaynakları 3; Aslanpınarı Kaynakları ise 2 farklı lokasyondan boşalmaktadır. Kaynakların beslenme-boşalım ilişkilerinin anlaşılabilmesi ve oluşum modelinin geliştirilebilmesi amacıyla çalışma kapsamında yapılan inceleme ölçüm ve testlerin yanı sıra DSİ tarafından önceki yıllarda gerçekleştirilen debi ölçümlerinden faydalanılmıştır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2011). Buna göre Tatarlı kaynaklarının debisi Mart 2008-Şubat 2009 döneminde 4,45-7,91 m^3/sn arasında değişmektedir (ort. 6,04 m^3/sn; Tablo 4). Aslanpınarı Kaynağı'nda ise Mart 2008 tarihinde yapılan ölçüme göre debisi 0,49 m^3/sn'dir.

Tablo 4. Tatarlı Kaynakları'nda gerçekleştirilen debi ölçümleri (Mart 2008-Şubat 2009; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2011)

Yıl	Ay	Debi (m^3/sn)
2008	Mart	5,27
	Nisan	4,45
	Mayıs	6,32
	Haziran	6,83
	Temmuz	7,91
	Ağustos	7,58
	Eylül	6,87
	Ekim	6,00
	Kasım	5,14
	Aralık	4,89
2009	Ocak	5,43
	Şubat	6,41
Ort.		6,09
Min.		4,45
Max.		7,91

Tatarlı Kaynakları'nda gerçekleştirilen aylık debi ölçüm sonuçları ile aylık toplam yağış ortalamaları karşılaştırıldığında yağışın Eylül-Mart döneminde artış trendinde olduğu, kaynak debisinin ise bu trende zıt şekilde Nisan-Temmuz döneminde artış gösterdiği görülmektedir. Bunun yanı sıra Mart ayında görülen yağış artışının, Mayıs ayında debi artışının hızlanması şeklinde kaynak debisine yansıması olduğu görülmektedir. Benzer şekilde takip eden ayda yağışta görülen azalma da, Mayıs-Haziran arasında debi artışında yavaşlama şeklinde Tatarlı Kaynakları'nda etkisini göstermiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Tatarlı Kaynakları debi-yağış ilişkisi

3.2.4 Kaynakların beslenme-boşalım ilişkisi ve oluşum modeli

Kaynak koruma ve geliştirme stratejilerinin en önemli aşaması, kaynakların beslenme-boşalım süreçlerinin ve kaynakların oluşumuna sebep olan süreçlerin sağlıklı bir şekilde belirlenmesidir (Krešić, 2009; Krešić ve Stevanović, 2010). Bu amaçla Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın toplam debileri ve debi-yağış hidrografileri, boşalım kotları ve kaynak alanlarının hidrojeolojik özellikleri dikkate alınarak beslenme süreçlerinde etkin olan faktörler belirlenmiştir.

Kaynak boşalım alanlarının jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri ile inceleme alanında yeraltısuyu seviye dağılımı dikkate alındığında Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın oluşumunda en önemli etkenin birincil (soğuma) ve ikincil (faylanma) çatlaklı yapısı ile Kuvaterner yaşlı Delihalil Bazaltları olduğu anlaşılmaktadır. Delihalil Bazatları'nın kaynakların doğrudan beslenimindeki rolünün belirlenebilmesi amacıyla Thornthwaite yönteminden elde edilen yıllık toplam su fazlası (P-m/yıl), infiltrometre testlerinden elde edilen süzülme katsayısı (Kf) ve bazaltların yüzey alanı (A_D-m^3) kullanılarak kaynakların Delihalil Bazaltları vasıtasıyla doğrudan yağıştan beslenim miktarı hesaplanmıştır (Denklem 6).

$$\text{Yağıştan Beslenim} = P \times Kf \times A_D \qquad (6)$$

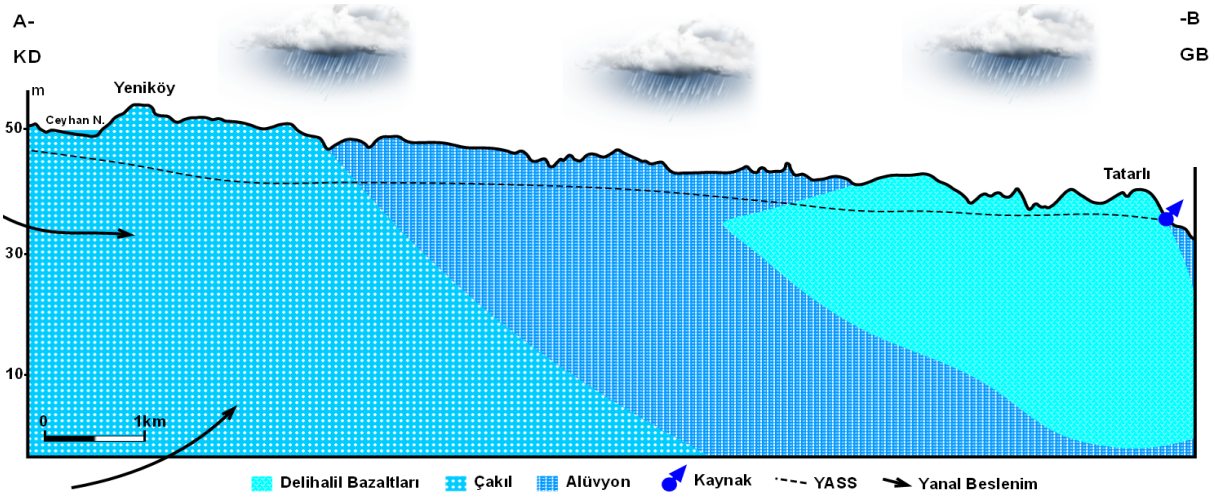
$$\text{Yağıştan Beslenim}_{(\text{Delihalil Bazaltları})} = 0{,}03054 \times 0{,}3632 \times (\sim)132{,}5\text{x}10^5 = 146.970{,}69\ m^3/\text{yıl}$$

Kaynakların yaklaşık yıllık boşalım miktarının hesaplanabilmesi amacıyla Tatarlı Kaynakları için DSİ (2011)'den derlenen verilerden yararlanılmıştır. Aslanpınarı kaynakları için ise yalnızca Mart 2008'e ait debi ölçümü vardır. Bu değer Tatarlı Kaynaklarının yıllık akım hidrografisi yardımıyla 0,55 m^3/sn olarak kabul edilmiştir. Bu değerlerden yola çıkılarak kaynakların yıllık boşalım miktarları toplam 206,5 x 10^6 m^3'tür. Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları için Delihalil Bazaltları'ndan yağışla doğrudan beslenme oranı yaklaşık %0,07 olarak belirlenmiştir (7). Bu durum kaynakların boşalımında kritik öneme sahip olan Delihalil Bazaltları'nın yağışla doğrudan beslenim bakımından nispeten daha az bir katkı verdiğini göstermektedir.

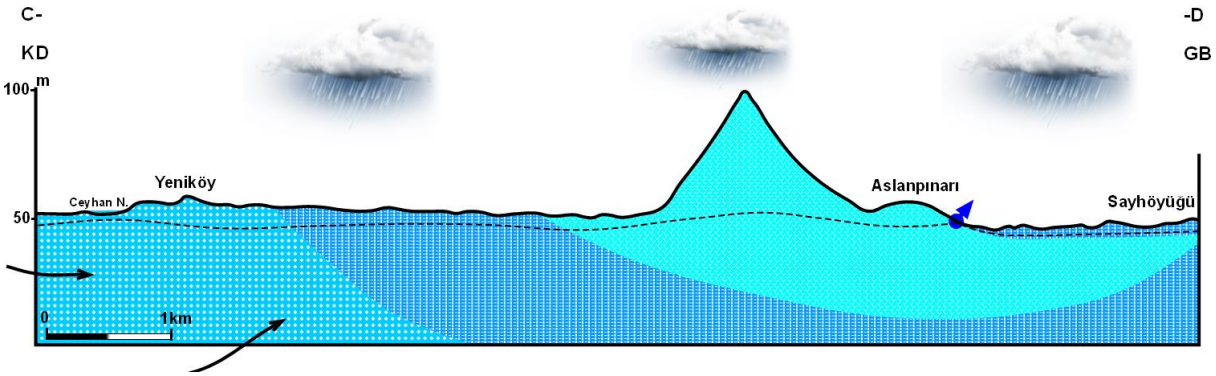
Çalışma kapsamında oluşturulan yeraltısuyu seviye dağılımları incelendiğinde yüksek geçirimlilik özelliği ile Delihalil Bazaltları'nın yayılım gösterdiği alanda yeraltısuyu seviye dağılımlarında değişikliğe neden olduğunu yeraltısuyu akım yönlerinin bazaltlara doğru gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum Delihalil Bazaltları'nın oluşturduğu kırıklı çatlaklı akiferin kendisini çevreleyen alüvyon akiferden beslendiğini göstermektedir. Yine seviye dağılımları alüvyon akiferin Ceyhan Nehri'nden de beslendiğine işaret etmektedir. Bu alanda alüvyonun daha ziyade çakıllı seviyelerden oluşması yüzeyden beslenme miktarını arttırmaktadır. Boşalım bölgesinde ise alüvyon birimler killi kumlu seviyelerden oluşmaktadır.

Tatarlı kaynaklarının yıllık debi-yağış ilişkisi dikkate alındığında Mart ayında yağış miktarlarının azalma trendine girmesine karşın debi Temmuz ayına kadar artmaya devam etmiştir. Bu durum kaynakların beslenme havzasının sanılandan daha geniş olduğu hatta kar erimelerinin kaynakların besleniminde etkili olabileceğini göstermektedir.

Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler sonucunda Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın oluşum modelini gösteren enine hidrojeolojik kesitler Şekil 10 ve 11'de sunulmuştur.



Şekil 10. Tatarlı Kaynakları'nın oluşum modelini gösterir enine hidrojeolojik kesit



Şekil 11. Aslanpınarı Kaynakları'nın oluşum modelini gösterir enine hidrojeolojik kesit (Lejant için Şekil 10'a bakınız)

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında incelenen kaynakların hidrojeolojik özellikleri, jeolojik birimler ve debi değişimleri birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, araştırma alanındaki hidrojeolojik koşulların daha iyi anlaşılmasına, bunu yanı sıra kaynakların beslenme-boşalım ilişkilerinin saptanarak oluşum modelinin ortaya konmasına ve kaynak koruma stratejilerinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Kaynak boşalım alanlarının jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri ile inceleme alanının yeraltısuyu seviye dağılımı dikkate alındığında, Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları'nın oluşumunda en önemli etkenin, birincil (soğuma) ve ikincil (faylanma) çatlaklı yapısı ile Kuvaterner yaşlı Delihalil Bazaltları olduğu görülmektedir. Çalışmaya konu olan, beslenme-boşalım döngüsü ve oluşum mekanizmaları bakımından özel öneme sahip Tatarlı ve Aslanpınarı kaynaklarının debileri sırasıyla; 4,45-7,91 m^3/sn arasında (Mart 2008-Şubat 2009) ve 0,49 m^3/sn (Mart 2008)'dir. Yapılan aylık debi ölçümlerinde Tatarlı Kaynakları'nda debinin, Nisan-Temmuz döneminde yağış trendinin aksine artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bu yönelim, kaynakların beslenme havzasının sanılandan daha geniş olduğu ve kar erimelerinin kaynakların besleniminde etkili olabileceğini göstermektedir.

Yapılan hesaplamalarda kaynakların yıllık boşalım miktarları toplam 206,5 x 10^6 m^3 olarak bulunmuştur. Tatarlı ve Aslanpınarı Kaynakları için Delihalil Bazaltları'ndan yağışla doğrudan beslenme oranı ise yaklaşık %0,07 olarak belirlenmiştir. Bu durum Delihalil Bazaltları'nın doğrudan yağıştan beslenme oranının düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, havzanın beslenme alanının genişliği ve beslenmede eriyen karların etkili olabileceği savını da desteklemektedir.

Jeolojik birimlerin yüzeyden beslenme miktarlarının saptanması ve birimlerin hidrolik iletkenlikleri hakkında fikir edinilmesi amacıyla Tatarlı Bölgesi'nde 4 farklı noktada gerçekleştirilen çift halka infiltrometre testlerinde elde edilen sonuçlara göre; Delihalil Bazaltları'nın süzülme hızı 1,82-2,32 m/gün (ort. 2,06 m/gün) arasında ölçülmüş; süzülme katsayıları ise %25,91-44,74 (ort. %36,32) arasında belirlenmiştir. Bu değerler, Delihalil Bazaltları'nın yüksek geçirimli bir karaktere sahip olduklarını ve bölgesel yeraltısuyu seviye değişimlerini de etkilediklerini göstermektedir. Bu alanda bulunan DSİ ve şahıs kuyularında yapılan ölçümlerle belirlenen seviye dağılımlarına göre, Delihalil Bazaltları'nın bulunduğu alanda yeraltısuyu akım yönlerinin bazaltlara doğru değiştiği belirlenmiştir. Bu durum kırıklı ve çatlaklı yapısı sayesinde akifer özelliği kazanmış olan Delihalil Bazaltları'nın kendisini çevreleyen alüvyon akiferden beslendiğini göstermektedir. Ayrıca seviye dağılımları alüvyon akiferin Ceyhan Nehri tarafından da beslendiğini işaret etmektedir.

Çalışma kapsamında oluşturulan oluşum modeline göre bazaltlar yüksek geçirimli yapılarıyla, yayılım gösterdikleri alanda yeraltısuyu akımını kendilerine doğru çevirerek yüksek depolama miktarlarına ulaşmaktadır. Alt kotlara doğru ise bazaltların alüvyonla dokanağında tekrar azalan hidrolik iletkenlik değerleri yeraltısuyu seviyelerinin hızla artarak kaynakların oluşmasına olanak sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar ışığında Delihalil Bazaltlarının yayılım gösterdiği alanda gerçekleştirilen faaliyetlerin, bazaltların yüksek geçirimli karakteri nedeniyle kaynaklara kalite bakımından önemli etkileri olabileceğini, alüvyon akiferde yeraltısuyu işletiminin ise yeraltısuyu seviye dağılımlarında değişime sebep olarak kaynak debilerini etkileyeceğini göstermekte olup kaynak koruma stratejilerinin bu veriler ışığında geliştirilmesi gerekmektedir.

Etik Beyan ve Teşekkür: Yazarlar, çalışmada kullanılan verilerin temini konusundaki desteği nedeniyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder. Makalede yer verilen tüm veriler Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait olup kurumun izniyle kullanılmıştır. Çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir kurum veya kuruluştan finansal destek alınmamış olup, yazarlar açısından herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalenin bilimsel içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazara aittir.

Yazarların Katkısı: Bu araştırmada; Ziya BERKKAYA, arazi çalışmaları ve verilerin derlemesi; Hilal DOKUZ, jeolojik verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması; Uğur Erdem DOKUZ, arazi çalışmaları, veri değerlendirmeleri, makalenin hazırlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Afşin, M., Yıldız, M., Ceylan, Z., & Küre, İ. S. (2019). Ekecik beslenim alanı (EBA)'ndaki içme suyu kaynaklarının hidrojeokimyasal ve izotopik özelliklerinin değerlendirmesi, Ortaköy, Aksaray, Orta Anadolu. *DSİ Teknik Bülteni, 134*, 37–46.

Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A., & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology, 589*, 125163. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163

Anderson, E. W. (1992). The political and strategic significance of water. *Outlook on Agriculture, 21*(4), 247–253. https://doi.org/10.1177/003072709202100402

Anderson, E. W. (2019). Water: The next strategic resource. In J. R. Starr, D. C. Stoll, S. A. Taubenblatt, & D. E. Osborn (Eds.), *The politics of scarcity: Water in the Middle East* (pp. 1–20). Routledge.

Barquín, J., & Scarsbrook, M. R. (2008). Management and conservation strategies for coldwater springs. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 18*(5), 580–591. https://doi.org/10.1002/aqc.884

Berhe, B. A., Dokuz, U. E., & Çelik, M. (2017). Assessment of hydrogeochemistry and environmental isotopes of surface and groundwaters in the Kütahya Plain, Turkey. *Journal of African Earth Sciences, 134*, 230–240. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.015

Bilgin, A. Z., & Ercan, T. (1981). Ceyhan-Osmaniye yöresindeki Kuvaterner bazaltların petrolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 24*, 21–30.

Brehme, M., Scheytt, T., Dokuz, U. E., & Çelik, M. (2011). Hydrochemical characterisation of ground and surface water at Dörtyol/Hatay, Turkey. *Environmental Earth Sciences, 63*(6), 1395–1408. https://doi.org/10.1007/s12665-010-0810-1

Çelik, M., Dokuz, U. E., Türköz, P. E., Güllü, Ö., & Arslan, Ş. (2013). Hydrogeochemical and isotopic investigation of Nasrettin Hoca Springs, Eskişehir, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 146*, 93–104. https://doi.org/10.19111/bmre.36468

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2011). *Adana-Ceyhan Tatarlı Kaynağı karst hidrojeolojik etüt raporu*. Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı.

Dokuz, U. E., Yaşar Korkanç, S., & Korkanç, M. (2018). Niğde kent merkezi alüvyon akiferinin yeraltısuyu kalitesini etkileyen doğal ve antropojenik faktörlerin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7*(3), 1095–1100. https://doi.org/10.28948/ngumuh.502263

Ersoy, A. F., Özgül, H. Y., & Ayyıldız Turan, N. (2023). Investigation of groundwater in Kızılırmak Delta (Samsun) in terms of hydrochemical and isotop hydrogeology. *DSİ Teknik Bülteni*, *(141)*, 1–7.

Fatehnia, M., Tawfiq, K., & Ye, M. (2016). Estimation of saturated hydraulic conductivity from double-ring infiltrometer measurements. *European Journal of Soil Science, 67*(2), 135–147. https://doi.org/10.1111/ejss.12322

Goldscheider, N. (2010). Delineation of spring protection zones. In N. Krešić & Z. Stevanović (Eds.), *Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management, and sustainability* (pp. 305–338). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6

Kalam, M. A., & Ramesh, M. (2016). Determination of infiltration rate and soil indices using double ring infiltrometer and implementing it by GIS and RS for selected areas in Zaheerabad, India. *Indian Journal of Science and Technology, 9*(30), 1–7. https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i30/90330

Khadka, K., & Rijal, M. L. (2020). Hydrogeochemical assessment of spring water resources around Melamchi, Central Nepal. *Water Practice and Technology, 15*(3), 748–758. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.066

Krešić, N. (2009). *Groundwater resources: Sustainability, management, and restoration*. McGraw-Hill.

Krešić, N. (2010). Types and classifications of springs. In N. Krešić & Z. Stevanović (Eds.), *Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management, and sustainability* (pp. 31–85). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00002-5

Krešić, N., & Stevanović, Z. (Eds.). (2010). *Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management, and sustainability*. Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2009-0-19145-6

Muntohar, A. S., Ikhsan, J., Setiati, R., & Uzuoka, R. (2025). Evaluation of infiltration models with double ring infiltrometer test on residual soil in Kulonprogo, Indonesia. *Civil Engineering Dimension, 27*(2), 193–204. https://doi.org/10.9744/ced.27.2.193-204

Nigate, F., Van Camp, M., Kebede, S., & Walraevens, K. (2016). Hydrologic interconnection between the volcanic aquifer and springs, Lake Tana basin on the Upper Blue Nile. *Journal of African Earth Sciences, 121*, 154–167. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.05.015

Sunkari, E. D., Abu, M., Bayowobie, P. S., & Dokuz, U. E. (2019). Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga West Municipality, Ghana: Implication for domestic and irrigation purposes. *Groundwater for Sustainable Development, 8*, 501–511. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.002

Tahmasebzadeh Bastam, E., & Gültekin, F. (2017). Değirmendere (Trabzon) Havzası kaynak sularında su-kayaç etkileşimi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 41*(1), 59–78. https://doi.org/10.24232

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review, 38*(1), 55–94. https://doi.org/10.2307/210739

Ünlügenç, U. C., & Akıncı, A. C. (2017). Kızıldere-Güveloğlu (Ceyhan-Adana) civarının tektono-stratigrafisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(2), 85–100. https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.358385

Yüce, G. (2001). Hatay-Erzin Yeşilkent Ovası ve Burnaz Kaynağının hidrojeolojiik özellikleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 23*(2), 21–46.

Yüzer, E., Öztaş, T., & Mutlu, O. (1992). İstanbul-Taşdelen ve Karakulak kaynak sularının hidrojeolojisi ve kaptaj sorunlarına çözüm önerileri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 16*(2), 51–62.

DSİ Teknik Bülteni, Temmuz 2026, Sayı:148, p90-102 / Technical Bulletin of DSİ, July 2026, Issue: 148, p90-102

Araştırma Makalesi / Research Article

Türkiye'de Su Sorunu Haberlerinin Çerçevelenmesi: Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı Üzerinden Bir Okuma

Framing Water Issue News in Türkiye: A Reading Through Rogers' Diffusion of Innovations Theory

Özlem Tuğçe KELEŞ[1*]

[1]*İstanbul Gelişim Üniversitesi, İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Radyo, Televizyon ve Sinema, İstanbul*

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: otkeles@gelisim.edu.tr*

Geliş (Received): 05.06.2026, Düzeltme (Revised): 10.07.2026, Kabul (Accepted): 13.07.2026

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'de su krizine ilişkin haber metinlerinde kullanılan medya çerçevelerini iletişim sosyolojisi bağlamında çerçeveleme kuramına uygun şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada 2021–2025 yılları arasında ulusal medya kuruluşları, dijital haber platformları ve çevre odaklı yayınlarda yer alan su krizi haberleri nitel çerçeve analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın kuramsal yaklaşımını medya çerçeveleme yaklaşımı ile Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı oluşturmaktadır. Haber analizleri sonucunda su krizinin haber metinlerinde ağırlıklı olarak felaket, teknik-yönetsel, bireysel sorumluluk, kolektif eylem ve umut/çözüm çerçeveleri aracılığıyla metinleştirilerek temsil edildiği görülmüştür. İncelenen görsel metinlerde ve içeriklerde özellikle felaket anlatılarının ve teknik-yönetsel çerçevelemelerin öne çıktığı, farkındalık yaratabilecek ve çözüm odaklı çerçevelerin ise daha sınırlı biçimde yer aldığı gözlemlenmiştir. Bulgular, su krizinin medya söyleminde çoğunlukla risk, kuraklık ve kaynak yönetimi ekseninde anlamlandırıldığını göstermektedir. Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı bağlamında değerlendirildiğinde, söz konusu çerçevelerin su tasarrufu gibi davranışsal yeniliklerin kamusal görünürlüğü açısından çeşitli tartışma alanları sunduğu görülmektedir. Çalışma, medya içeriklerinin toplumsal etkilerini ölçmeyi amaçlamamakla beraber algı inşası bağlamında su krizinin haber söyleminde hangi anlamlandırma biçimleri aracılığıyla kurulduğunu ortaya koyarak çevre iletişimi literatürüne katkı sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Su politikaları, iklim iletişimi sosyolojisi, algı, medya çerçeveleme, su krizi iletişimi

ABSTRACT

This study aims to examine the media frames employed in news coverage of the water crisis in Türkiye within the context of the sociology of communication and in accordance with framing theory. The research analyzes water crisis news published between 2021 and 2025 in national media outlets, digital news platforms, and environmental media through qualitative frame analysis. The theoretical framework of the study is based on media framing theory and Everett Rogers' Diffusion of Innovations Theory. The analysis reveals that the water crisis is predominantly represented through disaster, technical-managerial, individual responsibility, collective action, and hope/solution frames. Among these, disaster and technical-managerial frames emerge as the dominant modes of representation, while collective action and solution-oriented frames receive comparatively limited attention. The findings suggest that the water crisis is largely constructed in media discourse through themes of risk, drought, and resource management. When interpreted through the lens of Rogers' Diffusion of Innovations Theory, these frames provide a basis for discussing the public visibility of behavioral innovations such as water conservation. Although the study does not seek to measure the social effects of media content directly, it aims to contribute to the environmental communication literature by revealing the meaning-making processes through which the water crisis is discursively constructed in news media and by discussing its role in the formation of public perceptions.

Keywords: Water policies, media framing, diffusion of innovations theory, sociology of communication, environmental communication, perception construction

1 Giriş

İklim değişikliği, yalnızca çevresel sistemleri değil, toplumsal yaşamın devamlılığını belirleyen temel kaynakları da etkileyen küresel bir kriz alanı haline gelmiştir. Bu kaynakların başında ise su gelmektedir. Artan sıcaklıklar, düzensiz yağış rejimleri, kuraklık döngülerinin sıklaşması ve plansız kentleşme, dünya genelinde kullanılabilir tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Tarımsal üretimdeki yoğun ve bilinçsiz su kullanımı ve su yönetimine ilişkin yapısal sorunlar da bu baskıyı derinleştirmektedir. Bu nedenle su krizi günümüzde yalnızca çevresel bir mesele olarak değil; ekonomik, siyasal ve toplumsal boyutları bulunan çok katmanlı bir sorun olarak ele alınmaktadır. Çevresel risklerin görünürlüğü arttıkça, bu risklerin toplumsal olarak nasıl anlamlandırıldığı sorusu da önem kazanmaktadır. Antroposen tartışmaları çerçevesinde değerlendirildiğinde, insan ve doğa arasındaki ilişkinin yeniden düşünülmesini gerekli kılan bu süreç, çevresel sorunların temsil biçimlerini de araştırmanın merkezine taşımaktadır (Braidotti, 2019).

Türkiye, yaygın kanaatin aksine su zengini ülkeler arasında yer almamaktadır. Kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı dikkate alındığında, ülkenin su stresi yaşayan ülkeler kategorisine yaklaştığı görülmektedir. Türkiye Bilimler Akademisi tarafından yayımlanan İklim Değişimi Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu ve Geleceği başlıklı raporda, iklim değişikliğinin neden olduğu sıcaklık artışları, düzensiz yağış rejimleri ve kuraklık döngülerinin Türkiye'deki su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturduğu belirtilmektedir (Aydın & Şahin, 2023). Benzer biçimde yeraltı ve yüzey sularına ilişkin çalışmalar da kullanılabilir su miktarındaki azalmanın gelecekte çevresel olduğu kadar toplumsal ve ekonomik sonuçlar doğurabileceğine işaret etmektedir (Şıltu & Akca, 2023). Bununla birlikte su krizinin bilimsel olarak tanımlanışı ile kamusal alandaki görünürlüğü arasında belirli farklılıklar bulunmaktadır. Su kıtlığı ve kuraklık gibi olgular çoğu zaman yalnızca belirli dönemlerde gündeme gelen sorunlar olarak algılanabilmektedir. İklim değişikliğine ilişkin risklerin uzun zamana yayılan yapısı, bu sorunların gündelik yaşam içerisinde sürekli görünür olmasını zorlaştırmaktadır. Günay ve Güçdemir'in de belirttiği gibi çevresel sorunlar çoğu zaman doğrudan deneyimlenen olaylar değil, iletişim süreçleri aracılığıyla anlamlandırılan olgular olarak kamusal alana taşınmaktadır (Günay & Güçdemir, 2025). Dahası Türkiye özelinde değerlendirildiğinde krizler dönemlerle kısıtlanmakta ve hatta gündemin ihtiyaç duyduğu hallerde gündemde yer bulan araçsal anlatılara dönüşmektedir.

Bu noktada medya, çevresel sorunların toplumsal dolaşıma girmesinde ve anlamlandırılmasında önemli bir rol üstlenmesi gerekmektedir. Çevresel riskler hakkında kamuoyunun sahip olduğu bilgilerin önemli bir bölümü medya içerikleri aracılığıyla edinilmektedir örneğin haberler, belgeseller, filmler ve diziler bu noktada güçlü bir yere sahipken bugün dijital platformların hızı ve kolay erişilebilirliği de bu dolaşıma katkı sağlamaktadır. Ancak medya yalnızca bilgi aktaran nötr bir araç değildir; aynı zamanda olayları belirli anlam kalıpları içerisinde sunarak toplumsal gerçekliğin kurulmasına katkıda bulunmaktadır. Medyanın bu gücü toplumu pasif bir izleyici, dinleyici yaklaşımından çıkartılması bağlamında kabul gördüğünde daha büyük bir güce dönüşür. İnsanlar izledikleri, gördükleri ve takip ettikleriyle ne yapıyor? Neyi alımlıyor? Medyada gündem olan, haberlerde yer alan bir konu neden şimdi, şu an gündemde? Topluma anlatılan sunulan ifadeler neden şu an önemli? Bu olgunun, haberin ve söylemin bu çerçevede sunuluyor? Kadrajın dışındaki olgular, anlatılar neler? Tüm bu sorular iklim değişikliğinin toplumla olan bağını yeniden şekillendirme gücüne sahip. Erving Goffman'ın çerçeveleme yaklaşımı, bireylerin ve kurumların toplumsal olayları belirli yorum şemaları aracılığıyla anlamlandırdığını ileri sürmektedir (Goffman, 1974). Bu yaklaşım daha sonra medya çalışmaları içerisinde geliştirilmiş ve haber metinlerinin olayları belirli çerçeveler aracılığıyla temsil ettiği gösterilmiştir. Özellikle medya çerçeveleme literatürü, haberlerin yalnızca hangi konulara yer verdiğiyle değil, bu konuları hangi anlamlandırma kalıpları içerisinde sunduğuyla ilgilenmektedir (Entman, 1993; Erdoğan, 2008; Durur, 2011; Özarslan & Güran, 2015). Çevre iletişimi alanındaki çalışmalar da çevresel sorunların sunuluş biçiminin kamusal tartışmalar açısından önem taşıdığını vurgulamaktadır. Hansen ve Cox'a göre çevre iletişimi, çevresel sorunların toplumsal anlamlarının üretildiği bir süreçtir (Hansen & Cox, 2015). Benzer şekilde Leal Filho ve çalışma arkadaşları, iklim değişikliğine ilişkin iletişim stratejilerinin yalnızca bilimsel bilgi aktarımıyla sınırlı olmadığını; aynı zamanda risk, sorumluluk, çözüm ve gelecek tasavvurlarını da içerdiğini belirtmektedir (Leal Filho vd., 2018). Son yıllarda yapılan çalışmalar, iklim ve çevre krizlerinin medya söylemlerinde nasıl temsil edildiğine yönelik akademik ilginin arttığını göstermektedir (Abdullah, 2023; Çoban Keneş, 2024).

Bu çalışma, Türkiye'de su krizine ilişkin haber metinlerinde kullanılan medya çerçevelerini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada ulusal medya kuruluşları, dijital haber platformları ve çevre odaklı yayınlarda yer alan haberler nitel çerçeve analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında su krizinin haber söyleminde hangi anlamlandırma biçimleri aracılığıyla temsil edildiği analiz edilmiş; elde edilen bulgular çevre iletişimi literatürü ve Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı

bağlamında yorumlanmıştır. Araştırma, medya içeriklerinin toplumsal etkilerini ölçmeyi değil; su krizinin haber metinlerinde hangi çerçeveler aracılığıyla kurulduğunu ortaya koymayı hedeflemektedir.

Türkiye'de Su Krizi ve İklim İletişimi

İklim değişikliği iletişimi, son yıllarda çevre iletişimi çalışmalarının en önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Bunun temel nedeni, çevresel krizlerin toplumsal etkilerinin yalnızca bilimsel verilerle değil, bu verilerin nasıl anlatıldığı, hangi söylemlerle dolaşıma sokulduğu ve toplum tarafından nasıl anlamlandırıldığıyla da doğrudan ilişkili olmasıdır. Başka bir ifadeyle iklim değişikliğinin neden olduğu krizler yalnızca meteorolojik veya ekolojik bir mesele değil; aynı zamanda iletişimsel bir krizlerdir. Çünkü bireyler çevresel tehditleri çoğu zaman doğrudan deneyimlemek yerine medya temsilleri aracılığıyla algılamakta, anlamlandırmakta ve değerlendirmektedir. Bu nedenle iklim değişikliği iletişimi, çevresel farkındalık ile toplumsal davranış arasındaki ilişkinin kurulmasında kritik bir rol üstlenmektedir.

Armstrong, Marianne Krasny ve Jonathon Schuldt çalışmalarında, iklim iletişiminin yalnızca korku ve tehdit üretmeye dayalı olmaması gerektiğini; aynı zamanda bireylerde çözüm odaklı düşünme, kolektif sorumluluk ve toplumsal eylem kapasitesi geliştirmesi gerektiğini ifade etmişlerdir (Armstrong vd., 2018). Çünkü yalnızca felaket senaryolarına dayanan iletişim modelleri, kısa vadede dikkat çekici görünse de uzun vadede bireylerde duyarsızlaşma, çevresel yorgunluk ve çaresizlik hissi yaratabilmektedir. Davranışa dönüşmemiş bir algının sadece iklim felaketleri bağlamında değil gelecek nesillere de sürecin aktarımında iletişim açısından sorun oluşturma potansiyelini taşır. Bu nedenle çağdaş çevre iletişimi çalışmaları, korku merkezli iletişimden çok katılımcı, umut odaklı ve davranış değişikliğini destekleyen iletişim modelleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu bağlamda haber metinleri, dijital içerikler de yeni anlatı biçimlerini bu doğrultuda şekillendirmelidir.

Türkiye'de ise iklim değişikliği iletişiminin büyük ölçüde afet odaklı ve teknik ifadeler, anlatılar üzerinden ilerlediği görülmektedir. Özellikle su krizine ilişkin medya içeriklerinde "kuraklık", "baraj alarmı", "susuzluk tehlikesi", "su krizi kapıda" gibi dramatik söylemler ön plana çıkmaktadır. Bu çerçeveleme ve anlatı biçimi, çevresel sorunların gündelik yaşam pratiklerinden kopuk biçimde temsil edilmesine neden olmaktadır. Medyada su krizinin çoğunlukla meteorolojik bir felaket veya teknik altyapı problemi şeklinde sunulması, sorunun toplumsal davranış boyutunu geri plana itmektedir ve kişilerin kendi sorumluluk alanları dışında olarak aktarılmaktadır. Böylece bireyler su krizini kendi gündelik tüketim alışkanlıklarıyla ilişkili bir mesele olarak değil, devletin veya yerel yönetimlerin çözmesi gereken teknik veya havza ölçekli bir yönetim sorunu olarak algılamakta ve alımlamaktadır (Kimençe, 2023).

Bu noktada Erving Goffman'ın çerçeveleme yaklaşımı önem kazanmaktadır. Goffman'a göre medya, olayları yalnızca aktaran nötr bir araç değil; toplumsal gerçekliği belirli anlam kalıpları içinde yeniden üreten bir yapıdır (Goffman, 1974; Özçetin, 2019). Dolayısıyla medyada hangi sorunların nasıl temsil edildiği, bireylerin o meseleye ilişkin düşünme biçimlerini doğrudan etkilemektedir. Türkiye'de su krizinin ağırlıklı olarak "felaket", "alarm" ve "kriz" ekseninde temsil edilmesi, bireyin kendisini çözüm sürecinin dışında konumlandırmasına neden olmaktadır. "Kuraklık vurdu", "Barajlar alarm veriyor" veya "Su krizi büyüyor" gibi ifadeler, çevresel yıkımı insan davranışlarından koparark doğanın kaçınılmaz bir sonucu gibi sunmaktadır. Böylece bireysel sorumluluk algısı zayıflamakta ve öz-yeterlilik hissi gerilemektedir.

Bu iletişimsel yapı, bir ön kabulle bireylerde sıklıkla "Benim yaptığım neyi değiştirebilir?" düşüncesinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Özellikle su tasarrufu gibi gündelik yaşam pratikleri, büyük ölçekli iklim krizleri karşısında etkisiz görülmekte; bireyler kendi davranışlarının kolektif sonuçlar yaratabileceğine yeterince inanmamaktadır. Oysa çevre iletişimi literatürü, davranış değişikliğinin yalnızca bilgi aktarımıyla değil, bireylerin kendilerini çözümün aktif öznesi olarak hissetmeleriyle mümkün olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle çevresel iletişimde öz-yeterlilik hissi ve kolektif katılım duygusunun ekilme ve yetiştirilmesi, iletişim araçsallığında bunun çerçevelenmesi kritik öneme sahiptir.

Türkiye'de çevresel iletişimin bir diğer önemli sorunu ise yoğun teknik dil kullanımıdır. Özellikle haber içeriklerinde "debi", "havza yönetimi", "yeraltı su rezervi", "yağış rejimi", "metreküp" gibi hedef kitlesi sıradan insanlar olmayan daha uzman odaklı kavramlar hem dönemsel olarak hem de "kriz" anlarında öne çıkmaktadır. Bu durum çevresel iletişimi gündelik yaşam deneyiminden uzaklaştırmakta ve çevre sorunlarını yalnızca uzmanların konuşabileceği teknik meseleler haline getirmektedir ve gündelik yaşamında olağan akışında karşılamayacak sorunlar gibi bir çerçevede sunmaktadır. Medyanın bu dili tercih etmesi, okurun, dinleyicinin yani hedef kitlenin yok sayılması ve genele dair bir söylem oluşturma, sorunları indirme yapısından da uzaktır. Bu bağlamda toplum su krizinin varlığından haberdar olmakta; ancak bu bilgi gündelik davranış pratiklerine dönüşememektedir. Medyanın bu yaklaşımı dönemlere göre değişiklik göstermektedir. Medya toplumun neyi nasıl düşünmesi gerektiği ile ilgili inşacı bir güce sahiptir. Bununla birlikte meşrulaştırıcı gücü olağan bir düzenin bir yansıması gibi gösterse de aslında iklim değişikliğinin hem nedenleri hem sonuçları doğrudan insanlarla ilgilidir. Bu bağlamda da bu

yaklaşımdan uzak ve dönemsel ideolojik söylemlerle örtüşen veya yakınlaşan medya dili toplumu bu sorumlulukları paylaşmaktan ve özümsemekten uzaklaştırır.

Kadir Abdullah tarafından yapılan bibliyometrik analiz çalışması, iklim iletişimi araştırmalarında son yıllarda davranış değişikliği, toplumsal katılım ve diyalojik iletişim eksenli çalışmaların belirgin biçimde arttığını göstermektedir (Abdullah, 2023). Ancak Türkiye'de çevresel iletişim çoğu zaman tek yönlü bilgi aktarımıyla sınırlı kalmakta; bireylerin aktif katılımını sağlayacak diyalojik iletişim mekanizmaları yeterince gelişmemektedir. Bu durum özellikle genç kuşaklarda iklim kaygısı (climate anxiety) ve çevresel çaresizlik hissini artırmaktadır. Sustainability Victoria tarafından yayımlanan raporlar, yoğun korku söylemlerinin bireylerde çevresel felç hissi yaratabildiğini ve uzun vadede çevresel eylemsizliği güçlendirebildiğini ortaya koymaktadır (Sustainability Victoria, 2020). Benzer biçimde Sezgin'in Türkiye'de yaptığı çalışma da vatandaşların iklim değişikliğine ilişkin kaygı düzeylerinin yükseldiğini; ancak bu kaygının çoğu zaman aktif katılım ve davranış değişikliğine dönüşmediğini aktarmaktadır (Sezgin, 2024). Bu durum, çevresel farkındalık ile davranışsal dönüşüm arasındaki kırılmayı görünür hale getirirken üzerine daha çok düşülmesi gerekliliğini ortaya çıkartır.

Son yıllarda birçok farklı noktadan sağlanan odak ile özellikle genç kuşaklar açısından iklim değişikliği yalnızca bilimsel bir mesele değil; aynı zamanda etik, duygusal ve varoluşsal bir sorun olarak değerlendirilmektedir. Lee ve çalışma arkadaşları, gençlerin iklim değişikliğini geleceğe ilişkin belirsizlik, kaygı ve adalet sorunlarıyla birlikte düşündüğünü belirtmektedir (Lee vd., 2020). Bu nedenle çevre iletişiminin yalnızca veri aktarımına dayalı teknik bir süreç olarak değil; umut, dayanışma, katılım ve kolektif sorumluluk üreten toplumsal bir iletişim modeli olarak yeniden düşünülmesi gerekmektedir. Su krizi de bu bağlam içerisinde değerlendirilmelidir. Çünkü su sorunu çoğu zaman yalnızca çevresel veya teknik bir mesele olarak ele alınsa da, esasen toplumsal algı ve iletişim süreçleriyle doğrudan bağlantılıdır. Türkiye'de su kaynaklarının sınırlı olmasına rağmen toplumun önemli bir bölümünde hâlâ "su zengini ülke" algısının devam etmesi, iletişimsel çerçevelerin belirleyici etkisini açık biçimde göstermektedir. Medyada su krizinin çoğunlukla "doğal afet", "kuraklık" veya "baraj alarmı" ekseninde temsil edilmesi, sorunun yapısal boyutunun geri planda kalmasına neden olurken, su krizi gündelik yaşam pratiklerinden kopuk, dönemsel ve geçici bir tehdit olarak algılanabilmektedir.

Sonuç olarak Türkiye'de iklim değişikliği ve su krizine ilişkin temel sorun bilgi eksikliği değildir. Asıl problem, mevcut iletişim modellerinin bireylerde davranış değişikliği yaratacak düzeyde ikna, katılım ve öz-yeterlilik hissi üretememesidir. Sorumluluk yükleyici, özdeşleşeme yaratacak hikayelendirmenin yapılmaması ve bireyselleştirilmemesidir. Bu nedenle çevre iletişimi bağlamında su politikaları yönetimi açısından belki de ilk adım korku ve felaket merkezli söylemlerden uzaklaşarak çözüm odaklı, katılımcı ve gündelik yaşam pratikleriyle ilişkilendirilen yeni bir iletişim paradigmasına yönelmesi gerekmektedir.

2 Kuramsal Çerçeve: Yeniliklerin Yayılımı ve İkna Aşaması

İklim değişikliğiyle mücadelede geliştirilen su tasarrufu uygulamaları ve sürdürülebilir su yönetimi politikaları yalnızca teknik çözümler olarak değil, aynı zamanda bireylerin gündelik yaşamlarında benimsemeleri beklenen davranışsal yenilikler olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle söz konusu uygulamaların toplum tarafından nasıl benimsendiğini açıklayabilecek kuramsal yaklaşımlar, çevre iletişimi çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışma kapsamında, su krizine ilişkin haber metinlerinde kullanılan çerçevelerin değerlendirilmesinde Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı temel alınmıştır. Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı, başlangıçta tarımsal yenilikler ve teknolojik uygulamaların benimsenme süreçlerini açıklamak amacıyla geliştirilmiş; ancak zaman içerisinde halk sağlığı, çevre iletişimi, sürdürülebilirlik, enerji tasarrufu ve davranış değişikliği araştırmaları gibi birçok farklı alanda yaygın biçimde kullanılan disiplinler arası bir kuramsal çerçeveye dönüşmüştür (Rogers, 1983/2024). Kuramın farklı disiplinlerde yaygın biçimde kullanılmasının temel nedeni, bireylerin yeni bir uygulamayı benimsemesini yalnızca teknik özellikleriyle değil, aynı zamanda iletişim süreçleri, algıları ve sosyal çevreleriyle birlikte açıklayabilmesidir. Bu yönüyle Rogers'ın yaklaşımı, çevresel sorunların yalnızca bilimsel ya da teknik boyutunu değil, toplumsal kabul ve davranış değişikliği süreçlerini de analiz etmeye imkân tanımaktadır.

Rogers'a göre bir yeniliğin toplum tarafından benimsenmesi, yalnızca yeniliğin nesnel özelliklerine değil, bireylerin onu nasıl algıladığına da bağlıdır. Kuram, yeniliklerin yayılımını bilgi, ikna, karar, uygulama ve onay olmak üzere beş aşamalı bir süreç olarak açıklamaktadır. Bu süreç içerisinde özellikle ikna aşaması kritik bir konuma sahiptir. Çünkü bireyler yeni bir uygulamayı yalnızca onun hakkında bilgi sahibi oldukları için değil; onu kendi yaşamları açısından anlamlı, uygulanabilir ve yararlı buldukları ölçüde benimsemektedirler (Rogers, 1983/2024). Kurama göre bireylerin bir yeniliği benimsemesini etkileyen başlıca özellikler; göreli üstünlük (relative advantage), uyum (compatibility), karmaşıklık (complexity), denenebilirlik (trialability) ve gözlemlenebilirlik (observability) olarak tanımlanmaktadır (Rogers, 1983/2024). Başlangıçta yeni teknolojilerin ve tarımsal uygulamaların

yayılımını açıklamak amacıyla geliştirilen bu özellikler, günümüzde davranış değişikliği gerektiren çevresel uygulamaların değerlendirilmesinde de kullanılmaktadır. Bu bağlamda su tasarrufu, sürdürülebilir su kullanımı ve su yönetimine ilişkin uygulamalar da teknik çözümler olmanın ötesinde, bireylerin benimsemesi beklenen toplumsal yenilikler olarak ele alınabilir.

Bu çalışmada Rogers'ın kuramı, medya içeriklerinin bireyler üzerinde doğrudan davranış değişikliği oluşturduğunu kanıtlamak amacıyla kullanılmamaktadır. Kuram, su krizine ilişkin haber metinlerinde kullanılan söylem ve çerçevelerin, yeniliğin benimsenmesini etkileyen algısal özellikler açısından nasıl yorumlanabileceğini değerlendirmeye olanak sağlayan analitik bir çerçeve sunmaktadır. Bu doğrultuda haber metinlerinde belirlenen çerçeveler, Rogers'ın tanımladığı beş yenilik özelliği bağlamında yorumlanmış ve medya söyleminin su tasarrufu gibi davranışsal yeniliklerin iletişiminde nasıl bir görünüm sergilediği tartışılmıştır.

Göreli Üstünlük (Relative Advantage)

Göreli üstünlük, bir yeniliğin mevcut uygulamalara kıyasla ne ölçüde daha faydalı olarak algılandığını ifade etmektedir (Rogers, 1983/2024). Farklı tanım ve yaklaşımlarla değerlendirilebilse de kolaylık ve memnuniyet önemli bir göreli üstünlük olarak değerlendirilir. İncelenen haber metinlerinde su tasarrufu çoğunlukla kuraklık, risk ve kaynak yetersizliği bağlamında ele alınırken, tasarruf davranışının birey açısından sağlayabileceği ekonomik veya gündelik faydalara ilişkin vurguların daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, haber söyleminde su tasarrufunun daha çok çevresel bir zorunluluk olarak çerçevelendirildiğini düşündürmektedir. Dolayısıyla göreli üstünlük bağı sağlanamamakta ve fayda olarak tanımı aidiyeti çerçevelenememektedir. Fayda ne kadar açık ve net ise göreli üstünlük o kadar tutundurulması kolay olur ancak anlatılar ve örneklerde fayda farkındalığı yerine risk ve kaynak yetersizliği ön plana çıkması bu basamağın karşılanamamasına neden olmaktadır.

Uyum (Compatibility)

Uyum, bir yeniliğin bireylerin mevcut değerleri, alışkanlıkları ve yaşam pratikleriyle ne ölçüde örtüştüğünü ifade etmektedir (Rogers, 1983/2024). Su tüketiminin geleneksel bağları ya da iklim değişikliğinin sosyal sistemde bir karşılığının olmaması ve anlatıların bu şekilde kurgulanmaması nispeten daha yavaş ya da hiç uyum sağlanmamasına neden olabilir. Haber içeriklerinde su krizinin sıklıkla teknik ve yönetsel bir sorun olarak ele alındığı; buna karşılık su tasarrufunun kültürel değerler, gündelik yaşam deneyimleri veya toplumsal sorumluluk anlayışıyla ilişkilendirildiği örneklerin daha sınırlı olduğu görülmüştür. Bu durum, haber çerçevelerinin ağırlıklı olarak teknik açıklamalara dayandığını gösterirken uyumlanma açısından benimsetici unsurun oluşmadığı görülmektedir.

Karmaşıklık (Complexity)

Karmaşıklık, bir yeniliğin anlaşılma ve uygulanma güçlüğüne ilişkin algıyı ifade etmektedir (Rogers, 1983/2024). Bazı uygulamalar, kriz anları ya da yeni politikalar sosyal sistemin bir kısmı tarafına anlaşılabilirken bir kısmı tarafından hiç anlaşılamamaktadır. Analiz edilen haberlerde sıklıkla kuraklık verileri, baraj doluluk oranları, havza yönetimi ve su kaynaklarının planlanması gibi teknik unsurların öne çıktığı görülmektedir. Bu tür içerikler, su krizinin yönetimine ilişkin önemli bilgiler sunmakla birlikte, sorunun uzmanlık alanına ait bir konu olarak çerçevelenmesine de katkı sağlayabilmektedir. Ancak sıradan vatandaşların su yönetimi politikaları ve su krizi ile ilgili doğrudan bir karşılık görmemesi nedeniyle bilimsel bir çalışma olarak gözükmektedir.

Denenebilirlik (Trialability)

Denenebilirlik, bireylerin bir yeniliği sınırlı ölçekte deneyimleyebilme imkânına sahip olmalarını ifade etmektedir (Rogers, 1983/2024). Su politikaları bağlamında önleyici tedbirlerin alınması ve sorumluluk bilincinin ekilmesi açısından oluşturulmayan haber çerçevelemeleri olumlu bir yaklaşım için denenebilirliğin ortaya çıkmasına olanak tanımamaktadır. İncelenen haberlerde bireysel düzeyde uygulanabilecek küçük ölçekli tasarruf pratiklerine zaman zaman yer verilmekle birlikte, bu tür örneklerin genel haber söylemi içerisinde ikincil planda kaldığı görülmektedir. Buna karşılık haberlerin önemli bir bölümünde su krizinin daha çok makro ölçekte ele alındığı dikkat çekmektedir.

Gözlemlenebilirlik (Observability)

Gözlemlenebilirlik, bir yeniliğin sonuçlarının görünür ve izlenebilir olmasıyla ilişkilidir (Rogers, 1983/2024). Tüm basamaklar içerisinde bireysel sorumluluğun bir çıktısının toplumda aidiyet oluşturabileceği en önemli basamaklardan biridir. Su politikalarının çıktılarının gözlemlenebilmesi adına haberlerin içerikleri sunma ve çerçeveleme stratejinde bu basamağı göz önünde bulundurması önemlidir. Haber metinlerinde kuraklık göstergeleri, baraj doluluk oranları ve su kaynaklarındaki azalma gibi sonuçlar görünür kılınırken, bireysel veya kolektif tasarruf uygulamalarının somut çıktılarının daha sınırlı biçimde temsil edildiği görülmektedir. Bu durum, haber söyleminde risk ve sonuçların görünürlüğünün yüksek; çözüm pratiklerinin görünürlüğünün ise görece düşük olduğunu düşündürmektedir. Bu durum bu basamağın hayata geçirilemediğini ortaya koymaktadır. Su yönetim politikaları ve iklim değişikliği krizlerinin medya içeriklerinin sunulduğu çerçeveler ve anlatılar Roger's yeniliklerin yayılımı çalışmasında belirttiği basamakları karşılamamaktadır.

3 Yöntem

Bu araştırmada Türkiye'de su yönetim politikaları ve su krizine ilişkin haber ve içerik metinlerinde kullanılan medya çerçevelerini incelemek amacıyla nitel araştırma yöntemlerinden çerçeve analizi (frame analysis) kullanılmıştır. Çerçeve analizi, medya metinlerinin yalnızca bilgi aktaran içerikler olmadığını; aynı zamanda olayları belirli anlam örüntüleri içerisinde yapılandırarak toplumsal gerçekliğin yorumlanmasına katkı sunduğunu kabul etmektedir (Goffman, 1974; Özçetin, 2019). Bu doğrultuda çalışma, su yönetim politikaları ve su krizinin haber söyleminde hangi anlatı kalıpları aracılığıyla temsil edildiğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Araştırma, medya içeriklerinin toplumsal etkilerini ölçmeyi veya okuyucu davranışlarını analiz etmeyi hedeflememektedir. Bunun yerine haber metinlerinde öne çıkan anlamlandırma biçimlerini ve bu anlamlandırmaların çevre iletişimi literatürü ile Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı bağlamında iletişim sosyolojisini temel alan bir tartışmaktadır.

Araştırmada amaçlı örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Amaçlı örnekleme, belirli bir olguyu açıklama potansiyeli taşıyan örneklerin araştırma kapsamına dahil edilmesini esas almaktadır. Bu kapsamda 2021–2025 yılları arasında yayımlanan ve doğrudan su krizi, kuraklık, baraj doluluk oranları, su tasarrufu ve iklim değişikliği temalarını konu alan toplam 13 haber kaynağı metni analiz edilmiştir. Çalışmada incelenen içerikler, Türkiye'de yüksek erişim kapasitesine sahip ulusal medya kuruluşları ile çevre ve iklim odaklı yayın yapan dijital platformlardan seçilmiştir. Araştırma kapsamında incelenen haber içerikleri (TRT, AA, Diken, Aksiyon, Aydınlık, Hürriyet, BCC Tükçe gibi farklı medya sahiplik yapılarına sahip) medya kuruluşlarından elde edilmiştir. Haberlerin başlık ve içerikleri incelenmiş, bu bağlamda çerçeveleme kuramına göre rastgele seçilen haberler kendi içlerinde gruplandırılmıştır. Bu çalışmanın haber incelemelerine ek olarak, daha önce yapılmış ve haber analizleri bağlamında Bulur vd. (2025)'nin "Türkiye'de İklim Değişikliğinin Medya Temsilleri: X'deki İklim Değişikliği Haberlerinin Çok Yöntemli Analizi" ve Cengiz (2023)'in "Türkiye'de İklim Haberciliği: Kuraklık Haberleri Üzerine Bir İçerik Analizi" çalışmalarında yer alan haberlere ulaşılmış ve incelenmiştir.Bu özgün çalışmaların başvurduğu haberler içerik analizi yöntemiyle incelenmiş haber tabloları detaylı analiz edilmiştir. Ancak makale sınırlılıkları kapsamında doğrudan o haberler kullanılmamış ve makalenin özgün yaklaşımının korunması adına tablo dışında bırakılmıştır. Çalışma kapsamındaki medya kuruluşlarının seçilmesinde farklı yayın politikalarını temsil etmeleri, su krizine ilişkin düzenli içerik üretmeleri ve araştırma döneminde konuya ilişkin erişilebilir haber arşivlerine sahip olmaları etkili olmuştur. Bu medya kurumlarında yayınlanan haber ve içeriklerin analiz sürecinde haber metinleri tekrar tekrar okunmuş ve içeriklerde öne çıkan anlatı örüntüleri belirlenmeye çalışılmıştır. İlk aşamada terimler ve yaklaşımlar üzerinden açık kodlama gerçekleştirilmiş, daha sonra benzer kodlar bir araya getirilerek tematik çerçeveler oluşturulmuştur. Süreç sonunda haber metinlerinde tekrar eden beş temel ifade bir çerçeve olarak tespit edilmiştir. Bu çerçeveler haber metinlerinde kullanılan başlıklar, söylemsel vurgu noktaları, aktör temsilleri ve çözüm önerileri dikkate alınarak değerlendirilmiştir;

- Felaket Çerçevesi
- Teknik-Yönetsel Çerçeve
- Bireysel Sorumluluk Çerçevesi
- Kolektif Eylem Çerçevesi
- Umut ve Çözüm Çerçevesi

Tablo 1. İncelenen haberlerde belirlenen baskın çerçeveler (Su kaynakları, iklim krizi ve baraj doluluk oranlarına ilişkin haberlerin çerçevelenmesi)

No	Haber Başlığı	Yayın Kuruluşu	Yayın Tarihi	Erişim Tarihi	Olası Çerçeve	URL / Kaynak
1	İstanbul'da kuraklık alarmı: Barajlar kritik seviyede	TRT Haber	06.01.2023	Şubat 2026	Felaket Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
2	İstanbul'da barajlardaki doluluk oranı yüzde 50'nin altına düştü	TRT Haber	22.08.2024	Şubat 2026	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Web sayfası bağlantısı
3	İstanbul'da baraj doluluk oranı yüzde 45'e düştü	TRT Haber	19.08.2025	Şubat 2026	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Web sayfası bağlantısı
4	İstanbul'daki barajlarda doluluk oranı yüzde 76	TRT Haber	20.06.2022	Şubat 2026	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Web sayfası bağlantısı
5	Su üzerindeki iklim değişikliği baskısı Türkiye'yi su fakiri olmaya sürüklüyor	Anadolu Ajansı Yeşilhat	2024	Şubat 2026	Felaket / Risk Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
6	Türkiye'de barajlardaki doluluk oranı yüzde 42,2'ye düştü	Anadolu Ajansı Yeşilhat	15.08.2025	Şubat 2026	Teknik-Yönetsel / Risk Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
7	İstanbul'un dört, Ankara'nın üç aylık içme suyu kaldı	Diken (AA kaynaklı)	15.08.2025	Şubat 2026	Felaket Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
8	Türkiye'de baraj doluluk oranı yüzde 42,2'ye geriledi	Aksiyon	15.08.2025	Şubat 2026	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Web sayfası bağlantısı
9	Türkiye'de baraj doluluk oranları alarm veriyor: İstanbul, Ankara ve İzmir'de su kıtlığı kapıda	Haber Gazetesi	15.08.2025	Şubat 2026	Felaket Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
10	Türkiye susuzlukla karşı karşıya: Baraj doluluk oranları tehlikeli seviyelerde	Aydınlık	15.09.2025	Şubat 2026	Felaket / Risk Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
11	İklim krizi Türkiye'de su kaynaklarını nasıl etkiliyor?	BBC Türkçe	2024	Şubat 2026	Umut-Çözüm / Analitik Çerçeve	BBC Türkçe
12	Su kayıplarının önlenmesi ile yıllık 1,2 milyar TL tasarruf sağlanabilir	Türk Tarım Orman Dergisi	25.03.2021	Şubat 2026	Bireysel Sorumluluk / Çözüm Çerçevesi	Web sayfası bağlantısı
13	Baraj doluluk oranları 12 Aralık 2023: İstanbul baraj doluluk oranı son durum nedir?	Hürriyet	12.12.2023	Şubat 2026	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Web sayfası bağlantısı

4 Bulgular

Bu bölümde, araştırma kapsamında incelenen haber içeriklerine ilişkin nitel çerçeve analizi bulguları sunulmaktadır. Analiz sürecinde, 2021–2025 yılları arasında yayımlanan ve su krizi, kuraklık, baraj doluluk oranları, su tasarrufu ile iklim değişikliği ve su ilişkisini konu alan haber metinleri, araştırma için oluşturulan kodlama kategorileri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Haberlerde öne çıkan söylem kalıpları, kullanılan kavramlar ve haberlerin sorunu hangi anlamlandırma biçimleri üzerinden kurguladığı incelenerek içerikler beş temel çerçeve altında sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda haber metinleri; felaket çerçevesi, teknik-yönetsel çerçeve, bireysel sorumluluk çerçevesi, kolektif eylem çerçevesi ve umut/çözüm çerçevesi olmak üzere beş ana kategori altında analiz edilmiştir. Her bir çerçeve, haberlerde öne çıkan anlatı yapıları, kullanılan temel kavramlar ve temsil biçimleri dikkate alınarak değerlendirilmiş; elde edilen bulgular örnek haberler üzerinden yorumlanmıştır. Bulguların sunumunda amaç, haber metinlerinin doğruluğunu ya da su krizinin çevresel boyutunu değerlendirmek değil; su krizinin medya söyleminde hangi çerçeveler aracılığıyla temsil edildiğini ortaya koymaktır. Bu nedenle değerlendirmeler, haber içeriklerinde öne çıkan söylemsel örüntüler ve çerçeveleme biçimleri ile sınırlı tutulmuş; medya içeriklerinin toplumsal etkilerine veya okuyucular üzerindeki olası sonuçlarına ilişkin doğrudan çıkarımlarda bulunulmamıştır.

Tablo 2. İncelenen haber çerçevelerinin Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı açısından değerlendirilmesi

Rogers'ın Yenilik Özelliği	**Haberlerde Gözlenen Baskın Çerçeveler**	**Bulgulardan Örnek**	**Rogers'a Uygun Kuramsal Değerlendirme**
Göreli Üstünlük (Relative Advantage)	Felaket Çerçevesi, Teknik-Yönetsel Çerçeve	Haberlerde su tasarrufu çoğunlukla kuraklık, risk ve baraj doluluk oranları üzerinden ele alınmaktadır.	Su tasarrufunun bireye sağlayacağı ekonomik ve gündelik yararlar sınırlı biçimde temsil edilmektedir. Bu nedenle göreli üstünlüğü destekleyen söylemler çerçeveleme analizine göre rastlanmamıştır.
Uyum (Compatibility)	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Haberlerde uzman görüşleri, resmi açıklamalar ve teknik veriler ön plana çıkmaktadır.	Su tasarrufu davranışının kültürel değerler ve gündelik yaşam pratikleriyle ilişkilendirildiği içerikler daha sınırlıdır. Bu durum uyum boyutu açısından tartışılabilir görünmektedir.
Karmaşıklık (Complexity)	Teknik-Yönetsel Çerçeve	Baraj doluluk oranları, havza yönetimi, metreküp, rezerv ve altyapı gibi teknik kavramlar yoğun biçimde kullanılmaktadır.	Haber söyleminde teknik terminolojinin baskın olması, su krizinin uzmanlık alanı olarak temsil edilmesine katkı sağlayabilmektedir. Ancak gündelik hayata dair bir değer temsil etmektedir.
Denenebilirlik (Trialability)	Bireysel Sorumluluk Çerçevesi	Su tasarrufu önerileri ve bireysel uygulamalara ilişkin örnekler sınırlı sayıdaki haberde yer almaktadır.	Günlük yaşamda uygulanabilecek küçük ölçekli örneklerin daha az görünür olması, denenebilirlik boyutunun sınırlı temsil etmektedir.
Gözlemlenebilirlik (Observability)	Umut ve Çözüm Çerçevesi, Kolektif Eylem Çerçevesi	Yerel uygulamalar, başarılı su yönetimi örnekleri ve kolektif kazanımlar yalnızca bazı haberlerde yer almaktadır.	Çözüm süreçlerinin ve olumlu sonuçların görünürlüğü, risk ve kriz söylemine kıyasla daha düşüktür. Bu durum gözlemlenebilirlik boyutu açısından güçlü bir örnek teşkil etmektedir.

Felaket Çerçevesi

Araştırma kapsamında incelenen haberlerde su krizinin sıklıkla risk, tehdit ve kuraklık ekseninde temsil edildiği görülmektedir. Özellikle TRT Haber'de yayımlanan "İstanbul'da kuraklık alarmı: Barajlar kritik seviyede" başlıklı haber ile Anadolu Ajansı Yeşilhat'ta yer alan "Su üzerindeki iklim değişikliği baskısı Türkiye'yi su fakiri olmaya sürüklüyor" başlıklı haberde kuraklık, alarm, risk ve su kıtlığı vurguları öne çıkmaktadır. Benzer biçimde Diken, Haber Gazetesi ve Aydınlık'ta yayımlanan haberlerde de su kaynaklarının azalması ve baraj doluluk oranlarındaki düşüş, kriz ve tehlike söylemleri üzerinden aktarılmaktadır.

Bu çerçevede öne çıkan ifadeler şunlardır:

- Alarm
- Kuraklık

- Risk
- Tehlike
- Su kıtlığı
- Kritik seviye
- Susuzluk

İncelenen haberlerde felaket çerçevesi, su krizinin önemini ve aciliyetini görünür kılan bir anlatı biçimi olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte bu içeriklerde çözüm önerileri ve katılım biçimlerine ilişkin unsurların daha sınırlı yer aldığı görülmektedir. Bu bağlamda yeniliklerin yayılımı kuramı bağlamında karmaşıklık haberlerde daha ön plana çıkarken anlatılarda daha olumlu ifadelerin geçtiği bölümlerde ve yaklaşımlarda gözlemlenebilirlik basamağı ön plana çıkmaktadır.

Teknik-Yönetsel Çerçeve

Örneklemde yer alan haberlerin önemli bir bölümünde su krizinin teknik göstergeler ve kurumsal açıklamalar üzerinden temsil edildiği görülmektedir.

TRT Haber'de yayımlanan;

- *"İstanbul'da barajlardaki doluluk oranı yüzde 50'nin altına düştü"*
- *"İstanbul'da baraj doluluk oranı yüzde 45'e düştü"*
- *"İstanbul'daki barajlarda doluluk oranı yüzde 76"* başlıklı haberler ile Anadolu Ajansı Yeşilhat ve Hürriyet'te yer alan baraj doluluk oranlarına ilişkin haberler bu çerçeveye örnek oluşturmaktadır.

Bu haberlerde su krizi çoğunlukla:

- baraj doluluk oranları,
- rezerv miktarları,
- yağış verileri,
- teknik göstergeler,
- kurumsal açıklamalar

aracılığıyla aktarılmaktadır. Bu çerçevede öne çıkan kavramlar şunlardır:

- Baraj
- Doluluk oranı
- Metreküp
- Rezerv
- Yağış
- Altyapı
- Kurumsal önlem

Teknik-yönetsel çerçeve, su krizine ilişkin bilgi üretimini desteklemekte; ancak bireylerin gündelik yaşam deneyimlerine ve katılım biçimlerine daha sınırlı yer vermektedir.

Bireysel Sorumluluk Çerçevesi

Örneklem içerisinde bireysel sorumluluk çerçevesine daha sınırlı düzeyde rastlanmıştır.

Bu çerçeve özellikle *"Su kayıplarının önlenmesi ile yıllık 1,2 milyar TL tasarruf sağlanabilir"* başlıklı içerikte görünür hale gelmektedir. Söz konusu haberde su tasarrufu ve kaynakların verimli kullanımı vurgulanmaktadır.

Bu çerçevede öne çıkan ifadeler şunlardır:

- Tasarruf
- Bilinçli kullanım
- Su kaybı
- Verimlilik
- Sorumluluk
- Bireysel önlem

Bu içeriklerde su krizinin çözümünde bireysel davranışların rolüne dikkat çekilmektedir. Ancak örneklem içerisinde bu çerçevenin sınırlı sayıda içerikte yer aldığı görülmektedir.

Kolektif Eylem Çerçevesi

İncelenen haberlerde kolektif eylem çerçevesi diğer çerçevelere kıyasla daha az görünür durumdadır.

Bazı içeriklerde kamu kurumlarının, yerel yönetimlerin ve farklı aktörlerin yürüttüğü çalışmalara değinilmekle birlikte, su krizinin toplumsal iş birliği ve ortak çözüm süreçleri bağlamında ele alındığı örneklerin sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu çerçevede öne çıkan kavramlar şunlardır:

- Yerel yönetim
- Kurumsal iş birliği
- Ortak sorumluluk
- Toplumsal katılım
- Su yönetimi

Örneklemde kolektif eylem çerçevesinin daha çok dolaylı biçimde temsil edildiği söylenebilir.

Umut ve Çözüm Çerçevesi

Örneklem içerisinde umut ve çözüm çerçevesine ilişkin en belirgin örneklerden biri BBC Türkçe'de yayımlanan *"İklim krizi Türkiye'de su kaynaklarını nasıl etkiliyor?"* başlıklı haberdir.

Bu tür içeriklerde su krizi yalnızca bir tehdit olarak değil, neden-sonuç ilişkileri ve olası çözüm yolları bağlamında ele alınmaktadır.

Bu çerçevede öne çıkan ifadeler şunlardır:

- Çözüm
- Sürdürülebilirlik
- Uyum
- Su yönetimi
- Dayanıklılık
- Koruma

Bu içerikler su krizini açıklayıcı bir perspektifle ele almakta ve çözüm seçeneklerine yer vermektedir. Bununla birlikte örneklemde bu tür içeriklerin felaket ve teknik-yönetsel çerçevelere kıyasla daha sınırlı olduğu görülmektedir.

5 Sonuç

Bu çalışma, Türkiye'de su krizine ilişkin haber metinlerinde kullanılan medya çerçevelerini incelemeyi ve bu çerçeveleri Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı bağlamında değerlendirmeyi amaçlamıştır. Nitel çerçeve analizi kapsamında incelenen haber içerikleri, su krizinin medya söyleminde ağırlıklı olarak felaket ve teknik-yönetsel çerçeveler aracılığıyla temsil edildiğini göstermektedir. Buna karşılık bireysel sorumluluk, kolektif eylem ve umut/çözüm çerçeveleri örneklem içerisinde daha sınırlı bir görünürlüğe sahiptir. Araştırma bulguları, su krizinin haber söyleminde çoğunlukla risk, kuraklık, baraj doluluk oranları ve kaynak yönetimi eksenlerinde anlamlandırıldığını ortaya koymaktadır. İncelenen haberlerde "kuraklık", "alarm", "kriz", "tehlike", "baraj doluluk oranı" ve "su kaynakları" gibi kavramların sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Buna karşılık yerel uygulamalar, toplumsal katılım örnekleri, kolektif çözüm pratikleri ve başarı hikâyeleri gibi unsurlar daha sınırlı biçimde temsil edilmektedir.

Bu bulgular, Everett Rogers'ın Yeniliklerin Yayılımı Kuramı çerçevesinde değerlendirildiğinde çeşitli tartışma alanları ortaya çıkarmaktadır. Rogers'a göre bir yeniliğin yayılımı yalnızca bilgiye erişimle değil, bireylerin söz konusu yeniliği nasıl anlamlandırdığıyla da ilişkilidir (Rogers, 1983/2024). İncelenen haberlerde su krizine ilişkin farkındalık üretmeye yönelik unsurların belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum Rogers'ın bilgi aşamasıyla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte haberlerde bireylerin karar verme süreçlerini destekleyen deneyim aktarımı, gündelik uygulamalar ve katılımcı çözüm örneklerinin daha sınırlı yer bulması, kuramın ikna aşaması açısından tartışılabilecek bir görünüm ortaya koymaktadır. Bilgi ve sorumluluğun sadece çevre iletişimi kodları açısından değil bilim iletişimi bağlamında da değerlendirilmesi ve çerçevelerin bu açıdan değerlendirilmesi bundan sonraki süreçte su yönetim politikalarının iyileştirilmesi açısından katkı sağlamasını sağlayabilir.

Benzer şekilde kolektif eylem ve çözüm odaklı çerçevelerin sınırlı görünürlüğü, su tasarrufu gibi davranışsal yeniliklerin medya temsili açısından dikkat çekici bir bulgu olarak değerlendirilebilir. Özellikle yerel uygulamalar, görünür sonuçlar ve başarı hikâyelerine ilişkin örneklerin daha az yer alması, Rogers'ın gözlemlenebilirlik kavramı bağlamında yorumlanabilecek bir örüntü sunmaktadır. Bununla birlikte bu çalışma medya içeriklerini incelemekte olup, haber çerçevelerinin okuyucular üzerindeki etkilerini ya da davranış değişikliği üretip üretmediğini ölçmemektedir. Bu nedenle Rogers'ın kuramı burada doğrudan nedensel bir açıklama sunmaktan ziyade, haber söylemlerinin yorumlanmasına katkı sağlayan kuramsal bir çerçeve olarak kullanılmaktadır. Çalışmanın temel katkısı, su krizinin medya söyleminde hangi anlamlandırma biçimleri aracılığıyla kurulduğunu ortaya koymasıdır. Bulgular,

incelenen haberlerde felaket ve teknik-yönetsel çerçevelerin baskın olduğunu; kolektif eylem ve çözüm odaklı çerçevelerin ise daha sınırlı temsil edildiğini göstermektedir. Bu durum, su krizinin medya metinlerinde ağırlıklı olarak risk ve kaynak yönetimi eksenlerinde anlamlandırıldığına işaret etmektedir.

Araştırmanın önemli sınırlılıklarından biri, yalnızca haber metinlerine odaklanmasıdır. Bu nedenle medya çerçevelerinin okuyucular tarafından nasıl alımlandığı, toplumsal algılarla nasıl ilişkilendiği veya davranışsal sonuçlar üretip üretmediği konusunda doğrudan çıkarım yapmak mümkün değildir. Gelecek araştırmalarda medya çerçevelerinin bireyler tarafından nasıl yorumlandığının odak grup görüşmeleri, derinlemesine mülakatlar, anketler veya kamuoyu araştırmaları aracılığıyla incelenmesi; medya söylemi ile toplumsal algı arasındaki ilişkinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, Türkiye'de su krizinin medya söyleminde ağırlıklı olarak felaket ve teknik-yönetsel çerçeveler aracılığıyla temsil edildiğini ortaya koymaktadır. Haberlerin hedef kitlesinin çözüm odaklı ve sadece bilim insanlarının anlayacağı bir terminoloji ile değil daha gündelik hayatın söylem ve koşullarına uygun aktarılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca haber içeriklerinin ve haberlerin gündemde yer bulduğu dönemlerin ideolojik yaklaşım ve siyasi gündemlerden arındırılmış bir öncelikle yer bulmasının önemi ortaya çıkmıştır.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Abdullah, K. H. (2023). An analysis of publications on climate change communication using a bibliometric lens. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science, 12*(3), 354–371. https://doi.org/10.21664/2238-8869.2023v12i3.p354-371

Anadolu Ajansı Yeşilhat. (2024, 28 Ağustos). *Su üzerindeki iklim değişikliği baskısı Türkiye'yi su fakiri olmaya sürüklüyor*. https://www.aa.com.tr/tr/yesilhat/iklim-degisikligi/su-uzerindeki-iklim-degisikligi-baskisi-turkiyeyi-su-fakiri-olmaya-surukluyor/1824016

Anadolu Ajansı Yeşilhat. (2025, 15 Ağustos). *Türkiye'de barajlardaki doluluk oranı yüzde 42,2'ye düştü*. https://www.aa.com.tr/tr/yesilhat/iklim-degisikligi/turkiyede-barajlardaki-doluluk-orani-yuzde-42-2ye-dustu/1826867

Aksiyon. (2025, 15 Ağustos). *Türkiye'de baraj doluluk oranı yüzde 42,2'ye geriledi*. https://www.aksiyon.com.tr/turkiye-de-baraj-doluluk-orani-yuzde-42-2-ye-geriledi-178852

Armstrong, A. K., Krasny, M. E., & Schuldt, J. P. (2018). *Communicating climate change: A guide for educators*. Cornell University Press. https://doi.org/10.7591/9781501730801

Aydın, M. E., & Şahin, A. D. (Edl.). (2023). *İklim değişimi çerçevesinde su kaynaklarının mevcut durumu ve geleceği* (TÜBA Raporları No. 49). Türkiye Bilimler Akademisi. https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6

Aydınlık. (2025, 15 Eylül). *Türkiye susuzlukla karşı karşıya: Baraj doluluk oranları tehlikeli seviyelerde*. https://www.aydinlik.com.tr/haber/turkiye-susuzlukla-karsi-karsiya-baraj-doluluk-oranlari-tehlikeli-seviyelerde-546427

BBC News Türkçe. (2024, 18 Ekim). *İklim krizi Türkiye'de su kaynaklarını nasıl etkiliyor?*

Braidotti, R. (2019). A theoretical framework for the critical posthumanities. *Theory, Culture & Society, 36*(6), 31–61. https://doi.org/10.1177/0263276418771486

Bulur, N., Demirel, S., & Çakıcı, Z. (2025). Media representations of climate change in Türkiye: A multi-method analysis of climate change news on X. *Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi (e-Gifder), 13*(1), 327–357. https://doi.org/10.19145/e-gifder.1582900

Cengiz, Ö. (2023). Türkiye'de iklim haberciliği: Kuraklık haberleri üzerine bir içerik analiz. *İletişim Kuram ve Araştırma Dergisi*, *(62)*, 113–132. https://doi.org/10.47998/ikad.1252254

Çoban Keneş, H. (2024). İklim krizinin medyada ele alınışı: Akademik eğilimlerin ve çalışmaların bibliyografik analizi. *Kültür ve İletişim, 27*(54), 221–257. https://doi.org/10.18691/kulturveiletisim.1522634

Diken. (2025, 15 Ağustos). *İstanbul'un dört, Ankara'nın üç aylık içme suyu kaldı*. https://www.diken.com.tr/istanbulun-dort-ankaranin-uc-aylik-icme-suyu-kaldi/

Durur, E. E. (2011). Çevre sorunlarının medya gündemindeki yeri: Çevre gazeteciliği. *Akdeniz Üniversitesi İletişim Fakültesi Dergisi*, *(15)*, 61–73.

Erdoğan, İ. (2008). *Medya, teori ve araştırmaları*. Erk Yayınları.

Entman, R. M. (1993). Framing: Toward clarification of a fractured paradigm. *Journal of Communication, 43*(4), 51–58. https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1993.tb01304.x

Goffman, E. (1974). *Frame analysis: An essay on the organization of experience*. Harper & Row.

Günay, K., & Güçdemir, Y. (2025). Climate communication through dialogic communication: How non-governmental organizations and ministries foster public engagement. *Connectist: Istanbul University Journal of Communication Sciences*, *(68)*, 54–71. https://doi.org/10.26650/CONNECTIST2025-1607111

Haber Gazete. (2025, 15 Ağustos). *Türkiye'de baraj doluluk oranları alarm veriyor: İstanbul, Ankara ve İzmir'de su kıtlığı kapıda*. https://www.habergazete.com/yurt/turkiyede-baraj-doluluk-oranlari-alarm-veriyor-istanbul-ankara-ve-izmirde-su-20028h

Hansen, A., & Cox, R. (Eds.). (2015). *The Routledge handbook of environment and communication*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315887586

Hürriyet. (2023, 12 Aralık). *Baraj doluluk oranları 12 Aralık 2023: İstanbul baraj doluluk oranı son durum nedir?* https://www.hurriyet.com.tr/bilgi/galeri-iski-baraj-doluluk-oranlari-11-aralik-2023-guncel-istanbul-baraj-doluluk-orani-son-durum-nedir-yuzde-kac-oldu-42374194

Kimençe, T. (2023). Su kaynakları yönetiminde havza ölçekli faaliyetler. M. E. Aydın & A. D. Şahin (Ed.), *İklim değişimi çerçevesinde su kaynaklarının mevcut durumu ve geleceği* içinde (TÜBA Raporları No. 49, ss. 155–170). Türkiye Bilimler Akademisi. https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch08

Leal Filho, W., Manolas, E., Azul, A. M., Azeiteiro, U. M., & McGhie, H. (Eds.). (2018). *Handbook of climate change communication: Vol. 1. Theory of climate change communication*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69838-0

Lee, K., Gjersoe, N., O'Neill, S., & Barnett, J. (2020). Youth perceptions of climate change: A narrative synthesis. *WIREs Climate Change,* 11(3), e641. https://doi.org/10.1002/wcc.641

Özçetin, B. (2019). *Kitle iletişim kuramları: Kavramlar, okullar, modeller*. İletişim Yayınları.

Özarslan, H., & Güran, M. S. (2015). Çevre iletişimi açısından çevre haberlerinin çerçevelenmesi üzerine bir inceleme. *Global Media Journal: Turkish Edition, 6*(11), 1–25. https://globalmediajournaltr.yeditepe.edu.tr/sites/default/files/ozarslan_guran.pdf

Rogers, E. M. (1983). *Diffusion of innovations* (3. baskı). Free Press.

Rogers, E. M. (2024). *Yeniliklerin yayılması* (A. A. Bir & O. A. Abacı, Çev.). The Kitap.

Sezgin, S. (2024). Türkiye'de vatandaşların iklim değişikliği anksiyetesinin değerlendirilmesi. *Kent Akademisi, 17*(1), 1–21. https://doi.org/10.35674/kent.1388925

Sustainability Victoria. (2020). *Linking climate change and health impacts*. https://www.sustainability.vic.gov.au/research-data-and-insights/research/research-reports/health-impacts-of-climate-change

Şıltu, E., & Akca, L. (2023). İklim değişikliği, Türkiye yeraltı ve yüzeysel su kaynakları. M. E. Aydın & A. D. Şahin (Ed.), *İklim değişimi çerçevesinde su kaynaklarının mevcut durumu ve geleceği* içinde (TÜBA Raporları No. 49, ss. 9–28). Türkiye Bilimler Akademisi. https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch01

TRT Haber. (2022, 20 Haziran). *İstanbul'daki barajlarda doluluk oranı yüzde 76*. https://www.trthaber.com/haber/turkiye/istanbuldaki-barajlarda-doluluk-orani-yuzde-76-689125.html

TRT Haber. (2023, 6 Ocak). *İstanbul'da kuraklık alarmı: Barajlar kritik seviyede*. https://www.trthaber.com/haber/turkiye/istanbulda-kuraklik-alarmi-barajlar-kritik-seviyede-736248.html

TRT Haber. (2024, 22 Ağustos). *İstanbul'da barajlardaki doluluk oranı yüzde 50'nin altına indi*. https://www.trthaber.com/haber/turkiye/istanbulda-barajlardaki-doluluk-orani-yuzde-50nin-altina-indi-874061.html

TRT Haber. (2025, 19 Ağustos). *İstanbul'da baraj doluluk oranı yüzde 45'e düştü*. https://www.trthaber.com/haber/turkiye/istanbulda-baraj-doluluk-orani-yuzde-45e-dustu-917326.html

Türk Tarım Orman Dergisi. (2021, 25 Mart). *Su kayıplarının önlenmesi ile yıllık 1,2 milyar TL tasarruf sağlanabilir*. https://www.turktarim.gov.tr/Haber/588/su-kayiplarinin-onlenmesi-ile-yillik-12-milyar-tl-tasarruf-saglanabilir

DSİ Teknik Bülteni, Temmuz 2026, Sayı:148, p103-114 / Technical Bulletin of DSİ, July 2026, Issue: 148, p103-114

Vaka Çalışması / Case Study

Demirköprü Barajı Rezervuarı Yüzeyinde Yüzer Güneş Enerji Santralinin Kurulumunun Teknik ve Ekonomik Uygulanabilirliği

Technical and Economic Feasibility of Installing a Floating Solar Power Plant on the Demirköprü Dam Reservoir

Ali Osman ERTUĞRUL[1*], Cemil ARSLAN[2]

[1]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü,Yenilenebilir Enerji Dairesi Başkanlığı,Ankara
[2]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü,Yenilenebilir Enerji Dairesi Başkanlığı,Ankara

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: aoertugrul@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 15.12.2025, Düzeltme (Revised): 13.07.2026, Kabul (Accepted): 16.07.2026

ÖZ

Küresel enerji talebinin artışı ve karasal alanların kullanımındaki rekabet, fotovoltaik teknolojilerin mevcut su rezervuarlarına entegrasyonunu (yüzer güneş enerji santralleri) yenilenebilir enerji stratejilerinin önemli bir parçası haline getirmiştir. Ancak bu sistemlerin projelendirilmesi; rezervuarın karakteristik özellikleri, su seviyesi değişimleri ve tasarım konfigürasyonları arasındaki dengenin doğru kurulmasını gerektirir. Bu çalışmada, Manisa ilinde yer alan Demirköprü Barajı rezervuarı örneği üzerinden, büyük ölçekli bir yüzer güneş enerji santralinin teknik ve ekonomik uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışma, rezervuar yüzeylerinde uygulanan iki temel tasarım yaklaşımını; "enerji üretimini maksimize eden Güney yönlü yerleşim" ile "yüzey alanı kullanımını minimize eden Doğu-Batı yönlü (kompakt) yerleşim" modellerini karşılaştırmalı olarak irdelemektedir. Seçilen Güney yönlü tasarımın, yıllık ortalama 69,56 GWh elektrik üretimi ile Doğu-Batı yönlü tasarıma kıyasla %8,8 oranında daha yüksek verim sağladığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler, kompakt tasarımların sınırlı rezervuar alanlarında önemli mekansal avantajlar sağlamasına rağmen, alan kısıtının bulunmadığı geniş su yüzeylerinde, optimum yönelimle elde edilen enerji verimliliğinin önceliklendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca gerçekleştirilen tekno-ekonomik değerlendirmeler, yüzer sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin karasal sistemlere kıyasla daha yüksek olmasına rağmen, proje ömrü boyunca sağlayacağı nakit akışı ile finansal açıdan sürdürülebilir bir yatırım fırsatı sunduğunu göstermektedir. Projenin ilk yatırım maliyeti 36.079.949,72 $ olarak hesaplanırken, yatırımın 7,58 yılda kendini amorti edeceği öngörülmüştür. Bu araştırma, Türkiye'deki hidroelektrik rezervuarların hibrit enerji üretim tesislerine dönüşümü sürecinde, saha özelliklerine uygun tasarım tercihinin belirlenmesi adına teorik ve pratik bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, yüzer güneş enerji santralleri, tekno-ekonomik analiz

ABSTRACT

Floating photovoltaic (FPV) systems, which integrate photovoltaic technologies into water reservoirs, have become a crucial component of renewable energy solutions to compensate rising global power demands while minimizing land use. However, the design of these systems requires a precise balance between reservoir characteristics, water level fluctuations, and design configurations. In this study, the technical and economic feasibility of a large-scale FPV system is investigated using the Demirköprü Dam reservoir as a case study. The study comparatively examines two fundamental design approaches utilized on reservoir surfaces: the "South-facing layout," which maximizes energy generation, and the "East-West oriented (compact) layout," which minimizes surface area usage. It has been determined that the selected South-oriented design provides approximately 8.8% higher efficiency compared to the East-West oriented design, with an average annual electricity production of 69.56 GWh. The analyses reveal that while compact designs provide significant spatial advantages in restricted reservoir areas, prioritizing energy efficiency is more beneficial for extensive water surfaces do not possess spatial limitations. Furthermore, techno-economic analysis demonstrates that, FPV systems have higher initial capital expenditure (CAPEX) compared to terrestrial systems. However, FPV systems still present a financially sustainable investment opportunity due to the cash flow generated throughout the project's

lifespan. While the initial investment cost of the project was calculated as $36.079.949,72, it is projected that the investment will reach its payback period in 7.58 years. This research offers a theoretical and practical framework for determining the appropriate design preference based on site-specific characteristics during the transformation of Turkey's hydroelectric reservoirs into hybrid energy generation facilities.

Keywords: Renewable energy, floating photovoltaic, techno-economic analysis

1 Giriş

Fosil enerji kaynaklarının tükenmesi, nüfus artışı, hidrokarbon bazlı enerji kaynaklarının sebep olduğu sera gazı emisyonları ve iklim değişikliği, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle 21. yüzyılda, dünya genelindeki enerjiye olan talep artışıyla birlikte bu eğilim oldukça hızlanmıştır. Energy Institute (2024) tarafından hazırlanan ve Our World in Data tarafından işlenen Statistical Review of World Energy (2024) verilerine göre; yenilenebilir enerji kaynaklarından 2010 yılında 4.189,86 TWh enerji üretilmişken, bu miktar 2023 yılında iki katından fazlaya çıkarak 8.988,39 TWh'e ulaşmıştır.

Birincil yenilenebilir enerji kaynakları; hidroelektrik, güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal enerji olarak sınıflandırılabilir. Ancak bu kaynaklar, tamamen temiz veya yeşil enerji kaynakları olarak algılanmamalıdır. Zira bu sistemler de kurulumlarından servis ömürlerini tamamlayıp atık yönetimleri yapılana kadar, minimum seviyede de olsa karbondioksit emisyonuna sebep olurlar. Yine de bu oranlar fosil kaynaklarla karşılaştırıldığında çok düşük seviyelerdedir. Örneğin; kömür yaklaşık 955 $g \cdot kWh^{-1}$ CO_2 (Akella vd., 2009), petrol 818 $g \cdot kWh^{-1}$ (Akella vd., 2009) ve doğalgaz 430 $g \cdot kWh^{-1}$ CO_2 (Akella vd., 2009) emisyon üretirken; jeotermal enerji 122 $g \cdot kWh^{-1}$ CO_2 (Fridriksson vd., 2016), fotovoltaik güneş enerji sistemleri 7-83 $g \cdot kWh^{-1}$ CO_2 salımı yapmaktadır (Bruce-Lockhart vd., 2024). Hidroelektrik enerjinin CO_2 emisyonu 6.1-147 $g \cdot kWh^{-1}$ (Bruce-Lockhart vd., 2024) aralığındayken, biyokütle yaklaşık 230 $g \cdot kWh^{-1}$ CO_2 (LowCarbonPower, 2021) salımı yapar. Biyokütle diğer yenilenebilir kaynaklara kıyasla daha yüksek emisyona sahip olsa da fosil kaynaklara göre oldukça düşük bir karbon ayak izine sahiptir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş süreci, daha temiz ve sürdürülebilir bir enerji arzının önünü açmaktadır. Ancak hangi kaynaktan faydalanılabileceği büyük ölçüde çevresel faktörlere bağlıdır. Türkiye açısından durum ele alındığında, Şekil 1'deki grafikte Uluslararası Enerji Ajansı tarafından sağlanan verilere göre Türkiye'nin 2000-2024 yılları arasında gerçekleştirdiği elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı belirtilmiştir. Grafik genel olarak incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve güneşin elektrik üretimindeki payını sürekli olarak artırdığı görülmektedir; ancak rüzgar enerjisi ile üretimde 2023 yılında hafif bir düşüş yaşandığı göze çarpmaktadır. Sistemdeki toplam yenilenebilir enerji üretim değerlerinin artış göstermesine karşın, fosil kaynaklardan kömür ile gerçekleştirilen üretimin de özellikle son yıllarda yükseliş eğilimini sürdürdüğü dikkat çekmektedir. Ayrıca hidroelektrik ve doğal gaz kaynaklarından elde edilen üretim miktarlarında, yıllar içerisinde birbirini dengeleyen belirgin dalgalanmaların yaşandığı da grafikten okunabilmektedir.

Rüzgâr ve güneş kapasitesindeki istikrarlı artış, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan yönelimini göstermektedir. Bununla birlikte, kömür üretiminin yüksek seviyesini koruması, artan elektrik talebinin ve baz yük ihtiyacının halen fosil kaynaklarla desteklendiğini ortaya koymaktadır. Şekil 1'de hidroelektrik ve doğal gaz kaynaklı üretimde görülen değişimler, bu iki kaynağın birbirini destekleyen bir yapıda kullanıldığını göstermektedir. Özellikle kurak dönemlerde hidroelektrik üretiminin azalması durumunda, oluşan üretim açığı doğal gaz santralleri ile karşılanabilmektedir. Bu durum, Türkiye'nin elektrik arzında hidroelektrik kaynakların iklim koşullarına bağlı değişkenliğinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla mevcut tablo, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payına rağmen, arz güvenliğinin sağlanması ve şebeke esnekliğinin korunması açısından mevcut kaynak çeşitliliğinin önemini ortaya koymaktadır.

2022 yılında Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda elektrik enerjisi tüketiminin 2035 yılında yıllık 510,5 TWh ulaşacağı projekte edilirken, toplam elektrik enerjisi kurulu gücünün 189,7 GW'a ulaşacağı öngörülmüştür. Bunun 52,9 GW'lık kısmının ise güneş enerjisinden geleceği öngörülmüştür. 2024 yılında ise Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na göre yıllık elektrik enerjisi tüketimi 353,6 TWh olarak gerçekleşmiştir.

Söz konusu hedeflere ulaşılmasında; alan kısıtı veya yüksek arazi maliyetleri nedeniyle karasal GES kurulumunun zor olduğu bölgelerde alternatif bir çözüm sunan yüzer GES'ler, günümüzde rezervuar yüzey alanlarına, açık kanalların yüzeylerine ve yükleme havuzlarına uygulanabilmektedir. Yüzer GES, kullanılan fotovoltaik paneller açısından büyük ölçüde karasal kurulumlarına benzemektedir. Ancak kurulum sahasının su yüzeyi olması nedeniyle bazı ana bileşenler farklılık gösterir. Bunlardan en önemlisi, yüzdürücüler veya dubalar olarak adlandırılan destek yapılarıdır. Bu yapılar, su yüzeyindeki enerji tesisinde gerekli dengeyi sağlamak ve korozyon riskini önlemek amacıyla genellikle yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretilir. Destek yapılarının yanı sıra ankraj ve bağlama halatları da karasal sistemlerden ayrışan önemli bileşenlerdir. Bu sistemler, tesisin su yüzeyindeki hareketini sınırlandırarak belirlenen alanın dışına çıkmasını engellemek ve yıl içinde değişen su seviyelerine uyum sağlamak için kullanılır.

Sahu vd. (2016), literatürdeki çalışmalarında GES kurulabilecek yüzeyleri (karasal, çatı, kanal, offshore ve rezervuar/yüzer GES sınıflandırarak her birinin karşılaştırmalı avantaj ve dezavantaj analizlerini yapmıştır. Çalışma sonucunda; yüzer GES'in karasal GES'lere göre %11 daha yüksek

verimle çalıştığı, ayrıca açık su yüzeylerinde doğal olarak gerçekleşen buharlaşmayı panel örtüsü sayesinde %70'e varan oranlarda azalttığı ortaya konulmuştur. Buna karşın, kurulum maliyetinin karasal sistemlere göre 1,2 kat daha fazla olduğu da belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada, Kumar vd. (2021) yüzer GES teknolojisinin potansiyeline ve karşılaşılan güçlüklere değinmiştir. Yüksek kurulum maliyetleri, rezervuarlarda su seviyesinin zamansal değişimine bağlı olarak sistemin yapısal bütünlüğünü ve elektriksel performansını sürdürebilme gerekliliği ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla olan rekabet gibi zorluklara karşın; suyun soğutma etkisi ile sağlanan verim artışı, büyük ölçekli kurulum potansiyeli taşıması ve hem enerjinin hem de suyun korunması bağlamında çok yönlü fayda sağlaması gibi önemli avantajlara sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada, yüzer GES'in karasal GES'lere göre ilk yatırım maliyetlerinin %25-30 aralığında daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Türkiye'nin ilk orta ölçekli yüzer GES'i, Elazığ Kuzova Pompaj Sulama Tesisi'nin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla 2024 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hayata geçirilmiştir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2024a). Keban Barajı rezervuar alanında 1 MW kurulu güç ile tesis edilen santralde, 6.000 m²'lik su yüzey alanı üzerinde 1.840 adet fotovoltaik panel kullanılmıştır. Projenin, yıllık yaklaşık 1,8 milyon kWh elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirmesi öngörülmektedir.

Türkiye özelindeki bir diğer çalışmaya bakıldığında, Büyükçekmece Gölü üzerine 2017 yılında Ar-Ge amaçlı kurulan yaklaşık 100 kWp kapasiteli sistemin tasarımı ve enerji üretim verileri incelenmiştir (Kaymak & Şahin, 2022). Çalışmada ölçülen verilere göre, 2017 yılı Temmuz ayında sistemin 90 kWp'lik kısmının 5.189 kWh elektrik enerjisi ürettiği raporlanmıştır.

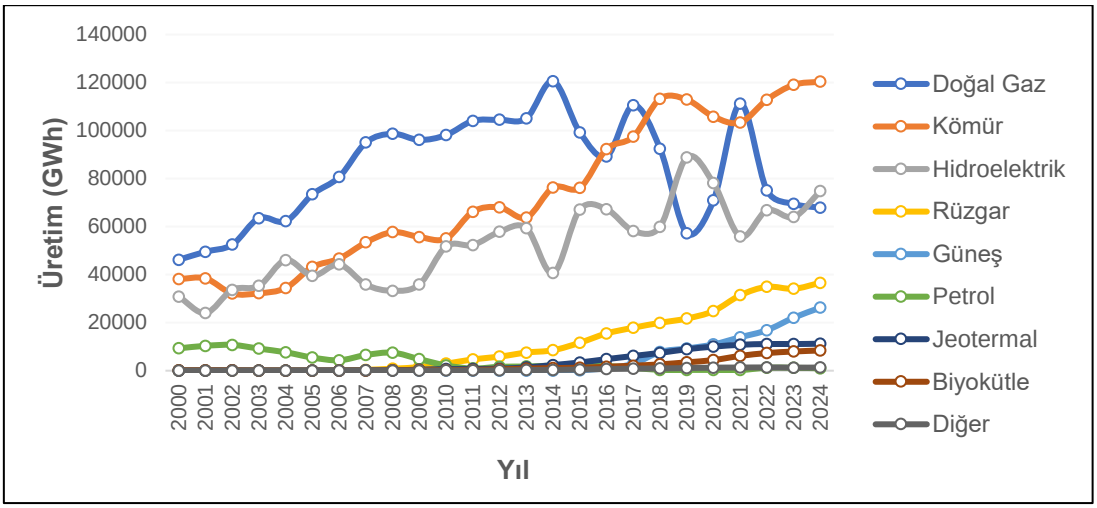
Bu çalışmada; Türkiye'de halihazırda kurulu olmayan ancak yakın gelecekte kurulması planlanan 35 MWe kapasiteli büyük ölçekli bir yüzer GES projesi referans alınarak, Demirköprü Barajı özelinde teknolojinin uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, rezervuar üzerinde belirlenen farklı yerleşim alternatiflerini karşılaştırarak optimum tasarımı belirlemek ve projenin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmektir.

2 Çalışma Alanı ve Veri Seti

2. 1 Demirköprü Barajı Özellikleri

Çalışma sahası olarak, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde, Manisa ili sınırları içerisinde yer alan ve Gediz Havzası'nın taşkın kontrolü, sulama ve enerji üretimi açısından kritik öneme sahip yapılarından biri olan Demirköprü Barajı seçilmiştir. Baraj gövdesi, 38°37' Kuzey enlemleri ve 28°19 Doğu boylamları üzerinde yer almaktadır. 1954 yılında yapımına başlanan barajın inşa çalışmaları 1960 yılında tamamlanmıştır. Barajın esas kullanım amaçları enerji üretimi ve sulama olmakla beraber, bunun yanında baraj rezervuarında balıkçılık faaliyetleri yürütülmektedir. Barajın minimum su kotu olan 212,00 m kotundaki rezervuar alanı 12,44 km^2 olmakla beraber 244,20 m olan normal su kotundaki rezervuar alanı ise 45,53 km^2'dir. Proje sahasının Türkiye üzerindeki coğrafi konumu ve Demirköprü Barajı rezervuar alanına ait uydu görüntüsü Şekil 2'de gösterilmektedir.

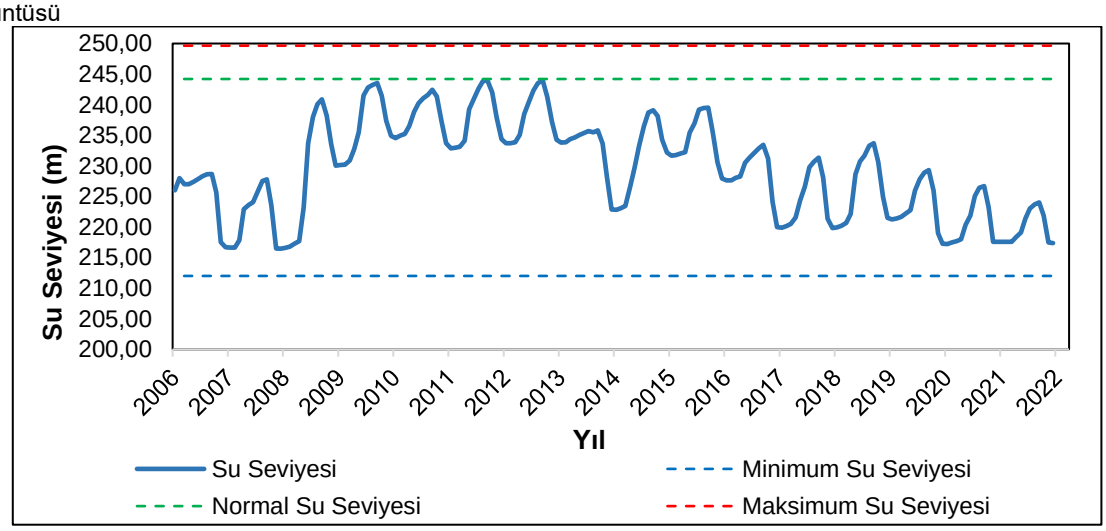
Kurulması planlanan yüzer GES'in teknik enerji üretim tahminlerinde; hava sıcaklığı, panel verimliliği ve sistem kayıplarını da bütünleşik bir parametre olarak potansiyeli (PV_{out}) verisi esas alınmıştır. Türkiye'deki yıllık fotovoltaik güç üretim aralığı 1.054,85 ile 1.773,9 $kWh \cdot kWp^{-1}$ arasındadır. Demirköprü için yıllık PV_{out} değeri ise 1582.5 $kWh \cdot kWp^{-1}$'dir. Güneş enerjisi potansiyel verileri, Dünya Bankası Grubu tarafından finanse edilen ve Solargis (t.y.) tarafından sağlanan Global Solar Atlas 2.0 veri tabanından temin edilmiştir. Global Solar Atlas 2.0, atmosferik ve uydu verilerini yer ölçüm istasyonlarıyla kalibre eden Solargis algoritmalarını temel almaktadır. Bu veritabanı, yaklaşık 250 metre mekansal çözünürlükte uzun vadeli yıllık ortalama GHI (küresel yatay ışınım) ve PV_{out} (fotovoltaik elektrik enerjisi üretim potansiyeli) verileri sunmaktadır. Demirköprü Barajı'nın üst rezervuarındaki su seviyesinin 2006-2022 yılları arasındaki değişimi aylık veriler kullanılarak Şekil 3'te görülmektedir. Bu değişim eğilimi, yüzer GES tesisinin ilerleyen aşamalarında ankraj ve bağlama sistemlerinin (mooring) tasarımı ve konumlandırılması açısından temel bir girdiyi oluşturmaktadır.



Şekil 1. Türkiye'nin 2000-2024 yılları arasındaki kaynak bazlı elektrik enerjisi üretimi (Uluslararası Enerji Ajansı)



Şekil 2. Demirköprü Barajı rezervuar alanının Türkiye haritası üzerindeki coğrafi konumu ve detaylı uydu görüntüsü



Şekil 3. Demirköprü Barajı ve HES'te 2006-2022 yılları arasındaki su seviyesi değişimi

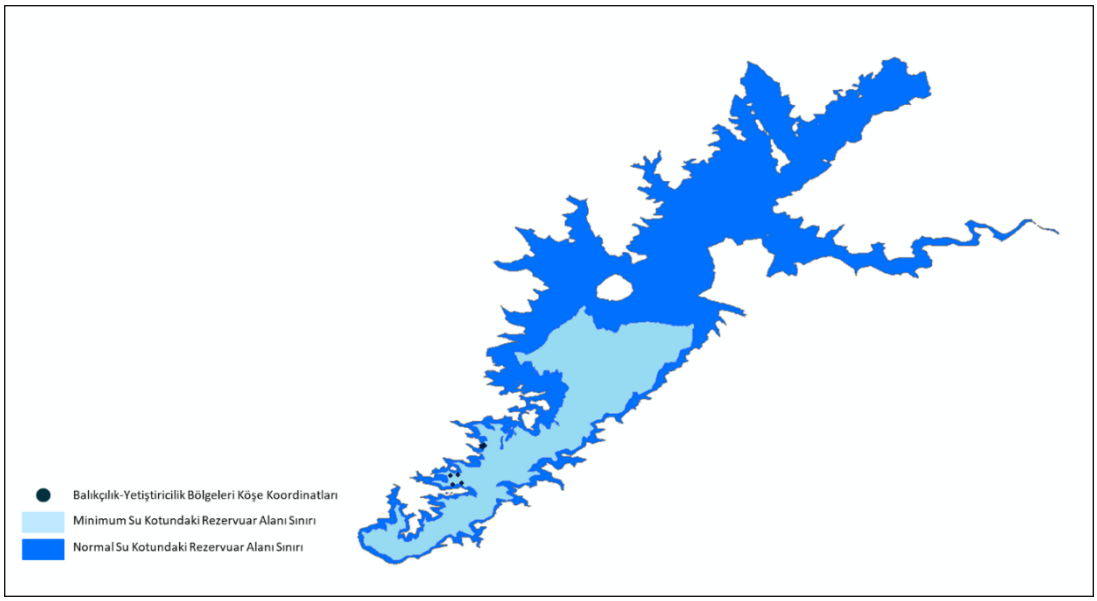
2.2 Saha Kısıtları ve Uygun Alan Belirleme

Demirköprü Barajı rezervuarına kurulması planlanan 35 MWe kapasiteli yüzer GES projesi için, projelendirme kriterlerine uygun olarak altı farklı alternatif senaryo değerlendirilmiştir. Bu alternatiflerin üçü güney yönlü, üçü ise doğu-batı yönlü tasarımlardır. Bu çalışmada, yüzer GES'in baraj rezervuarına yerleştirilmesinde, Yüzer Güneş Enerji Santralleri Kurulmasında Su Yüzeyi Kullanımına ve

Kiralanmasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmelik doğrultusunda aşağıdaki kriterler esas alınmıştır:

- Maksimum işletme kotundaki su yüzeyi esas alınarak baraj seddesinden memba yönüne kuş uçumu 300 m'lik mesafe, baraj güvenliği ile can ve mal kaybı yaşanmaması bakımından yasak bölge olarak tespit edilir ve bu bölgede yüzer GES kapsamındaki her türlü faaliyet yasaklanır.
- Rezervuar su yüzeylerinde yer alan yüzer GES adaları 10 hektardan büyük olmayacak şekilde boyutlandırılır.
- Rezervuar su yüzeylerinde yer alan yüzer GES adaları arasında en az 30 m mesafe bırakılır.
- Rezervuar su yüzeylerinde yer alan yüzer GES adaları, minimum su seviyesi sınırından yatayda en az 25 m mesafede konumlandırılır.
- Rezervuar su yüzeyinde projeye dayalı su ürünleri yetiştiriciliğinin olması halinde yüzer GES sahası su ürünleri yetiştiriciliği tesisine en az 250 m mesafede olur. Bu kriter doğrultusunda Şekil 4'te baraj rezervuarında bulunan iki farklı balık yetiştiriciliği bölgeleri gösterilmiştir.

35 MWe'lik bir sistem için 1,25 MWp/MWe oranı kullanılarak sistemin toplam kurulu gücü 43,75 MWp olarak belirlenmiştir. Ada boyutunun 10 hektarı aşmaması kriteri doğrultusunda, kurulumun yapılabileceği minimum ada sayısı 4 olarak tespit edilmiştir. Artan ada sayısının saha alanını artıracağı göz önüne alınarak, maksimum ada sayısı 6 ile sınırlandırılmıştır. Tüm adaların eşit kapasitede olacağı varsayılmıştır. Her bir alternatif için, adaların trafo merkezine en yakın pozisyonda yerleştirilebilmesi amacıyla ada boyutları bu durum dikkate alınarak optimize edilmiştir. Gerekli adaların ve saha alanlarının hesabı tamamlandıktan sonra, rezervuar kullanım oranı (%), kapasite yoğunluğu ($kWp \cdot m^{-2}$) ve yıllık potansiyel elektrik enerjisi üretimi ($GWh \cdot Yıl^{-1}$) gibi parametreler hesaplanmıştır. Literatürde net bir oran olmamakla birlikte Richter (2025), doğu-batı yönlü sistemlerin güney yönlü sistemlerin %75-85'i kadar elektrik enerjisi üretimi yapabildiğini belirtmiştir. Hollanda'da yapılan bir diğer çalışmaya göre ise doğu-batı yönlü sistemlerin, güney yönlü sistemlere göre %7,3 daha az enerji ürettiği belirtilmiştir (Autarco, t.y.).



Şekil 4. Demirköprü Barajı balıkçılık ve yetiştiricilik bölgeleri

3 Tasarım Metodolojisi ve Alternatifler

Çalışma kapsamında 35 MWe kapasite hedefiyle iki farklı panel yerleşim konfigürasyonu (Güney Yönlü ve Doğu-Batı Yönlü) çalışılmıştır. Adaların boyutlandırılması ve konumlandırılmasında Google Earth Pro verileri kullanılmıştır ve AutoCAD üzerinde yerleşim yapılmıştır.

3.1 Tasarım Kriterleri

Tasarım yapılırken şu kabuller yapılmıştır:

- Fotovoltaik Panelin Nominal Güç Kapasitesi: 590 Watt
- Fotovoltaik Panel Modülü Ölçüleri: Uzunluk 2285 mm, Genişlik 1134 mm, Yüzey Alanı 2.59 m^2

• Panel Eğim Açısı: 10°

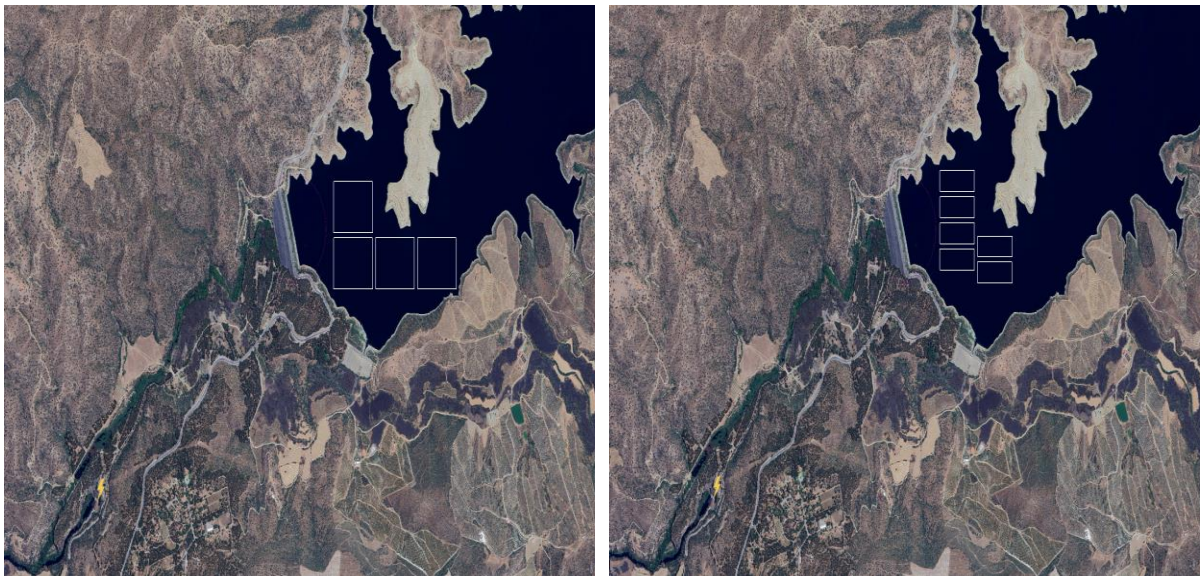
• Servis ve Yürüme Yolları: İşletme ve bakım faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yürütülebilmesi için; panel sıraları arasında 50 cm, her bir yüzer adanın çevresinde ise 1 m genişliğinde servis yollar (yürüme dubaları) tasarım yapılırken dikkate alınmıştır.

3.2 Yerleşim Alternatifleri

Her iki yönlü sistem (Güney ve Doğu-Batı) için 4, 5 ve 6 parçalı ada tasarımları simüle edilmiştir.

• Senaryo A (Güney Yönlü): Panellerin tam güneye baktığı, gölgelenme mesafelerinin bırakıldığı klasik yerleşim. (Alternatif A1, A2, A3). Şekil 5(a)'da 4 adalı A1 yerleşiminin uydu görüntüsü yer almaktadır.

• Senaryo B (Doğu-Batı Yönlü): Panellerin sırt sırta verildiği, birim alana daha fazla panel sığdırılan yerleşim. (Alternatif B1, B2, B3). Şekil 5(b)'de 6 adalı B3 yerleşiminin uydu görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 5. (a) Güney yönlü ve 4 adalı A1 yerleşiminin uydu görüntüsü, (b) doğu-batı yönlü ve 6 adalı B3 yerleşiminin uydu görüntüsü

4 Teknik ve Ekonomik Değerlendirme

4.1 Enerji Üretim Analizi

Geliştirilen 6 farklı alternatifin yıllık potansiyel enerji üretim değerleri, Global Solar Atlas 2.0 platformu (Solargis, t.y.) kullanılarak yüzer GES spesifik olarak elde edilmiştir. Tablo 1'de bu 6 farklı alternatif için de yerleşim için kullanılan parametreler ve yıllık elektrik enerjisi üretimi değerleri karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırmalı analiz sonuçlarına göre, Güney yönlü yerleşimler Doğu-Batı yönlü tasarımlara kıyasla yıllık ortalama %8,8 daha yüksek enerji üretimi sağlamaktadır. 35 MWe kapasiteli bir santral için bu fark, yıllık yaklaşık 5 GWh ek enerjiye tekabül etmektedir. Buna karşın Doğu-Batı sistemleri, panellerin sırt sırta montajı sayesinde daha kompakt bir yapı sunarak, aynı kurulu güçte (43,7 MWp) Güney yönlü sistemlere göre %40 daha az su yüzey alanı kullanmaktadır. Tasarım varyasyonları (A1, A2, A3) incelendiğinde, ada sayısının değişmesinin toplam üretim üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir (±0,05 GWh). Bu durum, ada sayısı tercihinin enerji verimliliğinden ziyade; ankraj maliyetleri ve işletme kolaylığına göre belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Demirköprü Barajı özelinde yapılan analizde, rezervuar kullanım oranının her iki senaryoda da %1'in altında kalması nedeniyle alan kısıtı bulunmamaktadır. Alan kısıtının kritik olduğu (rekreasyon, balıkçılık veya ulaşım rotaları vb.) rezervuarlarda Doğu-Batı konfigürasyonu tercih edilebilir olsa da; mevcut rezervuarın genişliği göz önüne alındığında, birim alandan tasarruf etmek yerine toplam üretimi maksimize eden Güney Yönlü (Senaryo A) tasarımın teknik açıdan daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir.

4.2 Ekonomik Analiz

Bu çalışmada önerilen yüzer GES tesisinin ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla, proje sahasına özgü parametreler ve 2025 yılı güncel piyasa verileri kullanılarak tekno-ekonomik bir değerlendirme yapılmıştır. Her ne kadar Doğu-Batı yönlü yerleşim alan tasarrufu sağlasa da, mevcut rezervuarda alan kısıtı bulunmaması ve Güney yönlü yerleşimin toplam enerji üretimini maksimize etmesi nedeniyle, ekonomik analiz Senaryo A üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yıllık elektrik enerjisi üretimi değeri Senaryo A'daki 3 ayrı alternatifin ortalaması olarak 69,54 GWh olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizlerde, yüzer GES tarafından üretilen elektriğin hidroelektrik santraline ait mevcut şalt sahasına ilave bir bağlantı kısıtı olmaksızın aktarılabildiği varsayılmıştır.

4.2.1 Yöntem ve Varsayımlar

Yatırım maliyetlerinin belirlenmesinde, Gökçekaya Barajı Rezervuarında Kurulabilecek Yüzer GES Potansiyeli Belirleme Çalışması İşi raporu temel referans olarak alınmıştır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2024b). Yüzer GES sistem tasarımında; panel tipi ve inverter kapasiteleri gibi teknik bileşenler belirlenirken, maliyet analizinin tutarlılığını sağlamak amacıyla ilgili rapordaki teknik spesifikasyonlar esas alınmıştır. Ancak maliyet kalemleri, projenin 35 MWe kurulu güç kapasitesine ve güncel piyasa koşullarına göre revize edilerek ölçeklendirilmiştir.

Referans çalışmadaki birim maliyetler, 70 metre rezervuar derinliğine ve buna bağlı olarak sistem sabitleme ekipmanlarına (tonoz-zincir-halat) göre Demirköprü Barajı'na uyarlanmıştır. Yüzer sistem sabitleme ekipmanları (tonoz-zincir-halat) komponentinin hesaplanmasında, referans çalışmada belirtilen formülasyon kullanılarak; 1 MW kurulu güç için birim keşif bedeli 18.000 $ + 500 $/derinlik (m) olarak dikkate alınmıştır. Buna ilaveten 30 metreden daha derine yapılacak dalışlarda her bir dalışta dalış ekibinin en az 5 kişi olması, karışım gaz kullanılması, dekompresyon zorunluluğu ve dalış hekimi ve basınç odası bulundurulması gibi İş Sağlığı ve Güvenliği gerekliliklerinden ötürü 1 MW kurulu güç için ekstra 25.000 $ maliyet öngörülmüştür. Demirköprü Barajı'nda panel yerleşiminin bulunduğu alanın ortalama derinliği 70 metre olduğundan, söz konusu maliyet 1 MW kurulu güç için 78.000 $ olarak hesaplanmıştır.

Analizde kullanılan temel finansal ve teknik varsayımlar şunlardır:

- Panel Fiyatları: Gökçekaya Barajı Rezervuarında Kurulabilecek Yüzer GES Potansiyeli Belirleme Çalışması İşi raporundaki maliyetler, fotovoltaik teknolojisindeki maliyet düşüş trendi ve güncel piyasa verileri doğrultusunda revize edilmiştir. 590 Watt güç kapasiteli fotovoltaik panel ücreti, yerel piyasa koşulları baz alınarak 165 $ olarak hesaplamalarda kullanılmıştır.
- Trafo İletim Hattı: Planlanan yüzer GES yerleşimi Demirköprü HES trafo merkezine yaklaşık 3 km mesafededir. Tesisin 35 MWe nominal kurulu gücünü taşıyacak iletken kesiti piyasa rayiçleri doğrultusunda 90.000 $/km olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda, projenin toplam enerji iletim hattı maliyeti sabit bir yatırım kalemi olarak 270.000 $ olarak hesaplanmıştır.
- Kur Değeri: Ekonomik hesaplamalarda 1 ABD Doları ($) kur paritesi 42,60 ₺ olarak kabul edilmiştir.
- Yenileme Maliyetleri: Fotovoltaik teknolojisindeki hızlı fiyat düşüşleri ve 25 yıllık ekonomik ömür boyunca ekipman maliyetlerindeki belirsizlikler nedeniyle, yenileme maliyetleri geri ödeme hesabı kapsamı dışında tutulmuştur.
- Elektrik Fiyatı: Gelir hesaplamalarında, EPİAŞ Şeffaflık Platformu verilerine göre son üç yılın ortalama Piyasa Takas Fiyatı (PTF) olan 76,43 $/MWh değeri baz alınmıştır (EPİAŞ, t.y).
- İnşaat Süresi: 12 ay olarak kabul edilmiştir.

4.2.2 İlk Yatırım Maliyetleri

Projenin ilk yatırım maliyeti; doğrudan malzeme giderleri, işçilik, nakliye ve mühendislik hizmetlerini kapsamaktadır. Sistemin temel bileşenlerine ait keşif bedelleri Tablo 2'de detaylandırılmıştır.

Yatırım maliyetlerinin belirlenmesinde kademeli bir hesaplama yöntemi izlenmiştir. İlk aşamada, sistem bileşenlerinin baz keşif bedeline, beklenmeyen giderler ve saha hazırlığı için %5 oranında ekleme yapılarak Tesis Bedeli Eşitlik 1 ile elde edilmiştir. Takip eden aşamada, mühendislik ve müşavirlik hizmetleri için bu tutar üzerinden %3 oranında artış öngörülmüş ve Proje Bedeli Eşitlik 2'de hesaplanmıştır. Bu iki eşitlikteki %3 ve %5'lik oranlar, referans alınan Gökçekaya Barajı Rezervuarında Kurulabilecek Yüzer GES Potansiyeli Belirleme Çalışması İşi raporundaki maliyet analizinden aynen korunmuştur.

Son olarak, 12 aylık inşaat süresi boyunca kullanılan sermayenin inşaat süresi faizi proje bütçesine dahil edilmiştir. Faiz oranı (i= %9.5) olarak kabul edilmiştir. Bu hesaplamada, yatırım tutarının inşaat

süresince eşit taksitlerle harcandığı varsayılmıştır. Projenin t=0 anındaki toplam ilk yatırım maliyeti Eşitlik 3'te sunulmuştur.

4.2.3 Gelir-Gider Dengesi ve Geri Ödeme Süresi

Projenin finansal sürdürülebilirliği, yıllık gelir ve gider kalemlerinin dengesine dayanmaktadır. Bu kapsamda, tesisin yıllık brüt geliri; öngörülen elektrik üretimi ve piyasa takas fiyatı (PTF) dikkate alınarak Eşitlik 4'te sunulmuştur. Gider kalemlerini oluşturan işletme-bakım maliyetleri ve su yüzeyi kira bedeli, sırasıyla tesis bedeli ve brüt gelir üzerinden belirli oranlarla Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 ile hesaplanmıştır. Bu iki bileşenin toplamı olan yıllık toplam gider ise Eşitlik 7'de ifade edilmiştir. Sonuç olarak, brüt gelirden toplam giderlerin düşülmesiyle elde edilen yıllık net gelir Eşitlik 8'de; toplam yatırımın net gelire bölünmesiyle bulunan geri ödeme süresi ise Eşitlik 9'da gösterilmiştir. Sonuç olarak, toplam yatırım bedelinin yıllık net gelire bölünmesiyle geri ödeme süresi 7,58 yıl olarak hesaplanmıştır.

$$Tesis\ Bedeli\ =\ Keşif\ Bedeli\ x\ 1{,}05\ =\ 31.933.015\ \$\ x\ 1{,}05\ =\ 33.529.665{,}75\ \$ \quad (1)$$

$$Proje\ Bedeli\ =\ Tesis\ Bedeli\ x\ 1{,}03\ =\ 33.529.665{,}75\ \$\ x\ 1{,}03\ =\ 34.535.555{,}72\ \$ \quad (2)$$

$$Yatırım\ Bedeli\ =\ A \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i}\right] = \frac{34.535.555{,}72\ \$}{12} \times \left[\frac{(1+0.095/12)^{12} - 1}{0.095}\right] = 36.079.949{,}72\ \$ \quad (3)$$

$$Yıllık\ Brüt\ Gelir\ =\ Yıllık\ Elektrik\ Enerjisi\ Üretimi\ x\ PTF\ =\ 69{,}530 MWh\ x\ 76{,}43\ \$/MWh =\ 5.314.177{,}9\ \$ \quad (4)$$

$$Yıllık\ İşletme\ -\ Bakım\ Gideri\ =\ Tesis\ Bedeli\ x\ 0.015\ =\ 33.529.665{,}75\ \$\ x\ 0.015\ =\ 502.944{,}99\ \$ \quad (5)$$

$$Yıllık\ Kira\ Bedeli\ =\ Yıllık\ Brüt\ Gelir\ x\ 0.01\ =\ 5.314.177{,}9\ \$\ x\ 0.01\ =\ 53.141.78\ \$ \quad (6)$$

$$Yıllık\ Toplam\ Gider\ =\ Yıllık\ İşletme\ -\ Bakım\ Gideri\ +\ Yıllık\ Kira\ Bedeli\ =\ 556.086{,}77\ \$ \quad (7)$$

$$Yıllık\ Net\ Gelir\ =\ Yıllık\ Brüt\ Gelir\ -\ Yıllık\ Toplam\ Gider\ =\ 4.758.091{,}13\ \$ \quad (8)$$

$$Geri\ Ödeme\ Süresi\ =\ \frac{36.079.949{,}72\ \$}{4.758.091{,}13\ \$} = 7{,}58\ yıl \quad (9)$$

Tablo 1. Güney yönlü ve doğu-batı yönlü yüzer GES yerleşim alternatiflerinin karşılaştırılması

	Güney Yönlü			Doğu-Batı Yönlü		
	A1	**A2**	**A3**	**B1**	**B2**	**B3**
Yüzer GES Ada Sayısı	4	5	6	4	5	6
Sıra Sayısı	62	76	64	122	109	95
Bir Sıradaki Panel Sayısı	299	195	193	152	136	130
Bir Adadaki Panel Sayısı	18.538	14.820	12.352	18.544	14.824	12.350
Bir Sıranın Uzunluğu (m)	355,97	232,83	230,46	381,54	341,54	326,54
Bir Sütunun Uzunluğu (m)	278,65	341,65	287,65	146,4	131,01	114,43
Bir Adanın Maksimum Güç Kapasitesi (MWp)	10,94	8,74	7,29	10,94	8,75	7,29
Bir Adanın Alanı (m^2)	99.189	79.546	66.292	55.857	44.744	37.366
Toplam Güç Kapasitesi (MWp)	43,75	43,72	43,73	43,76	43,73	43,42
Toplam Saha Alanı (m^2)	424.612	435.915	447.447	257.768	264.711	273.177
Rezervuar Kullanım Oranı (%)	0,93	0,96	0,98	0,57	0,58	0,60
Kapasite Yoğunluğu (kWp/m^2)	0,103	0,100	0,098	0,170	0,165	0,160
Yıllık Elektrik Enerjisi Üretimi (GWh/Yıl)	69,56	69,51	69,52	64,5	64,46	64,44

Tablo 2. 35 MWe kapasiteli Demirköprü Barajı yüzer GES sistemi bileşenleri ve keşif bedelleri

Tesis ve Operasyonlar	Keşif Bedeli ($)	Keşif Bedeli (₺)
Fiber Kompozit Yüzdürücü Sistem	4.305.000	183.393.000
Yüzdürücü Sistem Nakliyesi	262.500	11.182.500
Yüzer GES Taşıyıcı Sistem - Galvanizli Çelik Konstrüksiyon	3.325.000	141.645.000
Taşıyıcı Sistem Nakliyesi	65.625	2.795.625
Yüzer Sistem Sabitleme Ekipmanları (Tonoz-Zincir-Halat)	3.412.500	145.372.500
Ekipman, Sarf Malzemeler, Vinç, Lojistik, Sigorta ve Tekne	621.250	26.465.250
Yüzer Sistem Kurulum ve Dalgıç Operasyonları İşçilik	546.875	23.296.875
MonoPERC PV Panel	12.235.169	521.218.199
İnverter	1.575.000	67.095.000
OG Hücreler ve Sarf Malzemeler	2.326.188	99.095.609
6 mm^2 Solar Kablolar ve Solar Konnektörler	252.350	10.750.110
Alçak Gerilim Kabloları (İnverter TM arası - String) Alçak Gerilim Kabloları (DC BOX INV arası - Central)	241.369	10.282.319
AG Ana Toplama Panosu 1 set DC BOX	443.275	18.883.515
Topraklama Sistemi	351.138	14.958.479
Trafo İletim Hattı	270.000	11.502.000
Elektrik Ekipmanları Kurulum İşçilik	793.406	33.799.096
CCTV ve Aydınlatma	175.569	7.479.239
SCADA ve Uzaktan İzleme Sistemi	307.213	13.087.274
Proje Genel Giderleri	423.588	18.044.849
Toplam	31.933.015 $	1.360.346.439₺

5 Sonuç

Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesi kapsamında ele alınan bu çalışmada, Demirköprü Barajı rezervuar yüzeyinde kurulması planlanan 35 MWe kurulu gücündeki yüzer GES projesinin teknik ve ekonomik uygulanabilirliği detaylı olarak incelenmiştir. Rezervuar sahasının karakteristik özellikleri ve su seviyesi değişimleri dikkate alınarak geliştirilen altı farklı yerleşim alternatifi arasından, enerji üretim verimliliği esas alınarak optimum tasarım belirlenmiştir.

Yapılan simülasyonlar neticesinde; Doğu-Batı yönlü tasarımların, panellerin sırt sırta montajı sayesinde Güney yönlü sistemlere göre %40 oranında daha az su yüzey alanı kapladığı ve daha kompakt bir yapı sunduğu görülmüştür. Ancak, proje sahasının toplam rezervuar yüzeyinin %1'inden daha azını kaplaması ve baraj gölünde herhangi bir alan kısıtı bulunmaması nedeniyle, alan tasarrufu sağlayan Doğu-Batı tasarımı yerine, enerji üretimini maksimize eden Güney yönlü tasarımın uygulanmasına karar verilmiştir. Seçilen Güney yönlü konfigürasyonun, Doğu-Batı yönlü alternatiflere kıyasla yıllık yaklaşık %8,8 oranında daha yüksek verimle çalışarak, yılda ortalama 69,56 GWh elektrik enerjisi üretim potansiyeli sunduğu hesaplanmıştır. Projenin ekonomik boyutunun değerlendirilmesi amacıyla, 2024 yılı piyasa koşulları ve birim fiyatları temel alınarak kapsamlı bir mali analiz gerçekleştirilmiştir. Projenin toplam ilk yatırım maliyeti 36.079.949,72 $ olarak hesaplanmıştır. Santralin işletmeye alınmasıyla birlikte elde edilecek gelir-gider dengesi incelendiğinde, yıllık işletme-bakım masrafları ve su yüzeyi kiralama bedelleri düşüldükten sonra projenin yıllık 4.758.091,13 $ net nakit akışı sağlayacağı belirlenmiştir. Bu veriler ışığında yapılan hesaplamalar, yatırımın kendini 7,58 yıllık bir sürede amorti edeceğini göstermektedir. Fotovoltaik sistemlerin ortalama 25 yıllık ekonomik ömrü göz önüne alındığında, elde edilen bu geri ödeme süresi, projenin ekonomik açıdan uygulanabilir bir yatırım olduğunu ve yatırım maliyetinin sistemin ekonomik ömrü içerisinde geri kazanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma sonucunda, Demirköprü Barajı rezervuarında 35e MW kurulu gücündeki yüzer GES projesinin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olduğu ortaya konulmuştur. Projenin kesin tasarım aşamasında rezervuar tabanının detaylı batimetrik haritalanması ve zemin etütlerinin gerçekleştirilmesi, özellikle ankraj ve sabitleme sistem maliyetlerinin netleştirilmesi açısından önem arz etmektedir.

Yazarların Katkısı: Tüm yazarlar çalışmaya ve makalenin hazırlanmasına eşit miktarda katkı sağlamışlardır.

Etik Beyan ve Teşekkür: Yazarlar, çalışmada kullanılan verilerin temini konusundaki desteği nedeniyle Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder. Makalede yer verilen tüm veriler Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ait olup kurumun izniyle kullanılmıştır. Çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir kurum veya kuruluştan finansal destek alınmamış olup, yazar açısından herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalenin bilimsel içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazarlara aittir.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir makalenin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Akella, A. K., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, 34(2), 390–396. https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.002

Autarco. (t.y.). *kWh Face Off! East-West Vs South*. https://www.autarco.com/en/updates/kwh-face-off-east-west-vs-south

Bruce-Lockhart, C., Kaelin, C., & Black, R. (2024, 9 Şubat). *Why wind and solar are key solutions to combat climate change*. Ember. https://ember-energy.org/latest-insights/why-wind-and-solar-are-key-solutions-to-combat-climate-change/

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2024a, 26 Mart). *Yüzer GES'lerle hem temiz enerji hem su tasarrufu*. https://www.dsi.gov.tr/Haber/Detay/12128

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2024b). *Gökçekaya Barajı rezervuarında kurulabilecek yüzer GES potansiyeli belirleme çalışması işi*.

Energy Institute. (2024). *Statistical Review of World Energy – with major processing by Our World in Data. "Other renewables (including geothermal and biomass)"* [Data set]. https://ourworldindata.org/renewable-energy

EPİAŞ. (t.y.). *EPİAŞ Şeffaflık Platformu*. https://seffaflik.epias.com.tr/home

Fridriksson, T., Mateos, A., Audinet, P., & Orucu, Y. (2016). *Greenhouse gases from geothermal power production* (ESMAP Technical Report 009/16). World Bank. https://doi.org/10.1596/24691

Kaymak, M. K., & Şahin, A. D. (2022). The first design and application of floating photovoltaic (FPV) energy generation systems in Turkey with structural and electrical performance. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology, 9*(3), 827–839. https://doi.org/10.1007/s40684-021-00369-w

Kumar, M., Mohammed Niyaz, H., & Gupta, R. (2021). Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 233*, 111408. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111408

LowCarbonPower. (2021, 6 Aralık). *Where do our emissions numbers come from?* https://lowcarbonpower.org/blog/emissions

Richter, J. (2025, 8 Ağustos). *Solar panel direction and orientation: Complete 2025 guide to maximize energy output*. SolarTech. https://solartechonline.com/blog/solar-panel-direction-orientation-guide/

Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). *Floating photovoltaic power plant: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66*, 815–824. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051

Solargis. (t.y.). *Global Solar Atlas 2.0*. Global Solar Atlas. https://globalsolaratlas.info

DSİ Teknik Bülteni, Temmuz 2026, Sayı:148, p115-129 / Technical Bulletin of DSİ, July 2026, Issue:148, p115-129

Derleme / Review

Türkiye'de Tarımsal Sulamanın Tarihsel Gelişimi, Mevzuatı ve Kurumsal Yapısının Analizi

An Analysis of the Historical Development, Legislation, and Institutional Structure of Agricultural Irrigation in Türkiye

Erdem Eroğlu[1*]

[1]Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: erdem.eroglu@tarimorman.gov.tr*

Geliş (Received): 22.06.2026, Düzeltme (Revised): 17.07.2026, Kabul (Accepted): 20.07.2026

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'de tarımsal sulama yönetimini tarihsel, yasal ve kurumsal boyutlarıyla bütüncül bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, cumhuriyetin kuruluşundan günümüze kadar uzanan süreçte sulama yönetiminde yaşanan dönüşümler analiz edilerek, farklı dönemlerde uygulanan politikaların yönetim yapısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Tarihsel inceleme, sulama yönetiminin başlangıçta merkezi planlama ve kamu yatırımlarına dayalı bir yapı ile şekillendiğini, 1990'lı yıllardan itibaren kullanıcı katılımını esas alan yerinden yönetim modeline yöneldiğini ve son dönemde yeniden merkezi denetim mekanizmalarının güç kazandığını ortaya koymaktadır. Mevzuat analizi, su yönetiminin farklı dönemlerin ihtiyaçlarına göre şekillenen çok sayıda düzenleme ile yürütüldüğünü ve bu durumun günümüzde parçalı bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Kurumsal değerlendirme ise sulama hizmetlerinin merkezi otorite ile yerel kullanıcı örgütleri arasında paylaşıldığı çok aktörlü bir yapıya sahip olduğunu, ancak bu yapının koordinasyon sorunları ve etkinlik kayıpları ürettiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, Türkiye'de tarımsal sulama yönetiminde temel sorunun altyapı eksikliğinden ziyade kurumsal ve mevzuatsal parçalanmışlık olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, su yönetiminin etkinliğinin artırılması için bütünleşik bir yasal çerçevenin oluşturulması, kurumsal yapının sadeleştirilmesi ve havza bazlı yönetim yaklaşımının güçlendirilmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tarımsal sulama yönetimi, su yönetimi, mevzuat analizi, kurumsal yapı, havza bazlı yönetim

ABSTRACT

This study aims to provide a comprehensive analysis of agricultural irrigation management in Türkiye by examining its historical, legal, and institutional dimensions. The study evaluates the transformation of irrigation management from the early years of the Republic to the present, focusing on how policy changes have shaped governance structures over time. The historical analysis indicates that irrigation management initially developed under a centralized model based on public investment, shifted toward a decentralized and user-oriented approach in the 1990s, and has recently moved back toward stronger central oversight. The legal analysis reveals that irrigation management has been regulated through multiple legal arrangements shaped by different periods, resulting in a fragmented structure today. The institutional assessment shows that irrigation services are carried out through a multi-actor system involving both central authorities and local user organizations, but this structure often leads to coordination challenges and inefficiencies. The findings suggest that the main issue in irrigation management in Türkiye is not the lack of infrastructure, but rather institutional and legal fragmentation. In this context, improving irrigation management requires the establishment of an integrated legal framework, simplification of the institutional structure, and strengthening of basin-based management approaches.

Keywords: Agricultural irrigation management, water governance, legal framework, ınstitutional structure, basin-based management

1 Giriş

Sulama olgusu, insanlık tarihiyle eş zamanlı bir gelişim göstererek yerleşik hayata geçişle birlikte, doğadaki su kaynaklarının bitkisel üretim amacıyla sevk ve idare edilmesini sağlamış; bu süreç yerleşik toplumların ve ilk siyasi yapıların teşekkülünde temel rol oynamıştır. Tarihsel süreç incelendiğinde; Nil, Fırat-Dicle, İndus ve Sarı Irmak gibi büyük akarsu havzalarının, tarım ve sulama tekniklerinin sağladığı üretim artışı sayesinde şehir devletlerine dönüştüğü görülmektedir. Bu bağlamda su yönetimi, sadece teknik bir müdahale değil, aynı zamanda toplumsal hiyerarşinin ve merkezi otoritenin inşasında belirleyici bir unsur olmuştur (Üzen ve Çetin, 2012). Nitekim Wittfogel (1957), 'hidrolik toplum' olarak tanımladığı bu yapılarda, suyun yönetim ihtiyacının kaçınılmaz olarak merkezi ve mutlak bir siyasi otoriteyi ortaya çıkardığını savunmaktadır. Bronz Çağı öncesindeki tarım köylerinin antik dönemin büyük kentlerine evrilmesi, doğrudan sulama mühendisliğindeki ilerlemelerle ilişkilidir. Mithen (2012) ise bu gelişimi, antik dünyada su üzerindeki kontrolün doğrudan siyasi güç ve prestijle eşdeğer kabul edilmesine bağlamaktadır. Orta Çağ'dan Sanayi Devrimi'ne uzanan süreçte su yönetimi, teknik bir mesele olmanın ötesine geçerek hukuki ve ekonomik bir boyut kazanmış; su, ticari bir değer taşıyan stratejik bir kaynağa dönüşmüştür (Fagan, 2011).

Söz konusu stratejik dönüşüm, suyun paylaşımı ve korunması üzerindeki toplumsal mutabakatı zamanla yazılı normlara dayalı sistematik bir devlet disiplinine taşımıştır. Bu kurumsallaşmanın en köklü ve bilinen ilk örneklerinden biri, MÖ 1700'lerde Babil Kralı Hammurabi tarafından yürürlüğe konulan kanunlardır (Eroğlu, 2024). Dellapenna ve Gupta (2009), suyun bu dönemde hukuki bir zemine oturtulmasını, insanlık tarihindeki 'ilk düzenli su hukuku rejimleri' olarak nitelendirmektedir. Sulama sistemlerinin inşasını devletin asli görevleri arasına dahil eden bu düzenlemeler, su kullanım hakkını ilk kez yazılı hukuk kurallarıyla güvence altına alarak "merkezi su yönetimi" anlayışının tarihsel temelini atmıştır.

Mezopotamya'da belirginleşen bu yönetimsel anlayış, zamanla Anadolu medeniyetlerinin ve Osmanlı Devleti'nin su kültürüyle harmanlanmış; bu birikim Türkiye Cumhuriyeti'nin kuruluşundan itibaren hayata geçirilen su politikalarının tarihsel zeminini oluşturmuştur. Hassan (2011), toplumların su ile kurduğu bu tarihsel bağın, modern su yönetimi stratejilerinin başarısında belirleyici bir "kültürel sermaye" olduğunu vurgulamaktadır. Dolayısıyla Cumhuriyet dönemi sulama hamleleri; bu topraklarda kökleşmiş olan su yönetimi geleneğinin, modern tekniklerle harmanlanarak planlı ve kapsamlı bir devlet politikası haline getirilmesi süreci olarak ele alınmalıdır. Mays (2010) ise antik dönemden miras kalan su toplama ve dağıtım mantığının, modern mühendislik çözümleriyle entegre edilerek süreklilik arz ettiğine dikkat çekmektedir. Bu tarihsel birikim, modern Türkiye'nin su yönetimi mimarisinin temelini oluştururken, günümüzün karmaşık sosyo-ekonomik dinamikleri bu yapının yeniden yorumlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Günümüzde ise tarımsal sulama; iklim değişikliği ve su stresi gibi küresel risklerin gölgesinde, teknik mühendislik çözümlerini stratejik bir düzlemle destekleyen yönetsel ve hukuki bir disiplin çerçevesinde ele alınmaktadır. Pahl-Wostl (2015), modern su yönetiminin artık sadece suyun iletimi değil, küresel belirsizliklere karşı 'kurumsal adaptasyon kapasitesi' geliştirme süreci olduğunu vurgulamaktadır. Türkiye'de Cumhuriyet sonrası dönemde suyun mülkiyeti ve yönetimi konusunda önemli mesafeler katedilmiş olsa da farklı dönemlerin ihtiyaçlarına göre şekillenen mevzuat yapısı, günümüzde yer yer koordinasyon gerektiren parçalı bir görünüm sergilemektedir. Bu durum, teknik altyapının sürdürülebilirliğini sağlamak adına su kaynaklarının, mevcut parçalı kurumsal ve mevzuatsal yapıdan çıkarılarak, yetki ve sorumlulukların tek bir koordinasyon otoritesi altında bütünleştirildiği, merkezi olarak yönlendirilen bir yönetim çerçevesinin oluşturulması zaruret arz etmektedir. Bu bütünleşme ihtiyacı, dünya genelinde kabul gören ve suyun havza bazlı, tekil bir otorite koordinasyonunda yönetimini öngören Entegre Su Kaynakları Yönetimi prensipleriyle tam bir uyum içerisindedir.

Türkiye'de su yönetimi üzerine son dönemde üretilen ulusal literatür, özellikle havza bazlı yönetim modeline geçişin stratejik önemine odaklanmaktadır. Kimençe (2023), Türkiye'nin su yönetimi pratiklerinde havza ölçekli planlamanın, idari bir zorunluluktan öte, kaynakların korunumu ve sürdürülebilirliği için temel bir yönetişim aracı olduğunu vurgulamaktadır. Benzer bir perspektifle, su tahsis süreçlerindeki yönetsel karmaşayı irdeleyen çalışmalar (Gönenç, 2006; Öztürk vd., 2014; Aküzüm vd., 2010; Kızıltoprak & Arıkoğlu Ündücü, 2022), Türkiye'nin coğrafi ve hidropolitik gerçeklikleriyle uyumlu, idari parçalanmışlığı minimize ederek eşgüdümü esas alan bütüncül bir kurumsal yapının tesisini zorunlu kılmaktadır. Literatürdeki bulgular, kurumsal hiyerarşideki 'yatay ve dikey etkileşim' eksikliğinin tarımsal su yönetimi üzerindeki kısıtlayıcı etkisini ortaya koymakta ve suyun yalnızca teknik bir mühendislik nesnesi değil, paydaş çıkarlarının çatıştığı çok katmanlı bir yönetişim gerektiren 'sosyo-teknik bir süreç' olarak ele alınması gerektiğini savunmaktadır. Bu doğrultuda, Türkiye'de su yönetiminin idari hiyerarşisi; stratejik karar alma mekanizması olarak yapılandırılan Ulusal Su Kurulu'nun en üst otorite olduğu, bunu takiben bölgesel ölçekte eşgüdümü sağlayan Havza Su Kurulları ve operasyonel

uygulamaların yerel düzeyde yürütüldüğü İl Su Kurullarından oluşan hiyerarşik bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu yeni kurumsal mimari; ulusal stratejilerin havza ölçeğinde planlanması ve il düzeyinde etkinlikle hayata geçirilmesi hedefiyle, teknik ve hukuki bütünlüğü sağlayan bir yönetişim arayışının somut bir tezahürü olarak değerlendirilmektedir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2026).

Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurarak Türkiye'de tarımsal sulama yönetimini çok boyutlu bir perspektifle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda yapılandırılan çalışma, Türkiye'de tarımsal sulama yönetimini tarihsel, mevzuatsal ve kurumsal boyutlarıyla bütünleşik olarak analiz eden kapsamlı çerçevelerden birini sunmaktadır. Bu kapsamda çalışmanın temel amacı; Türkiye'de tarımsal sulama yönetiminin tarihsel süreçteki sürekliliklerini ve kurumsal gelişim aşamalarını analiz ederek, farklı mevzuat uygulamalarının yönetimsel süreçler üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Bu çerçevede Cumhuriyetin ilk yıllarından günümüze kadar gerçekleşen yasal dönüşümler incelenmekte; sulama birlikleri, kooperatifler ve yerel yönetimler arasındaki yetki çakışmalarının giderilmesi ve hizmet standartlarının uyumlaştırılması amacıyla bütüncül bir yasal çerçeve ve yönetim stratejisine yönelik değerlendirmeler sunulmaktadır.

2 Materyal ve Metot

Türkiye'deki tarımsal sulama yönetimini teknik, tarihsel, mevzuatsal ve kurumsal boyutlarıyla ele alan bu çalışma, nitel doküman analizi metodolojisine dayanmaktadır. Araştırmanın temel amacı, sulama sistemindeki yönetsel çok başlılığı ve hukuki yapının gelişimini; Cumhuriyet döneminden bugüne, özellikle 2005 yılındaki yapısal dönüşüm süreci de dahil olmak üzere, temel kanunlar, dönemsel yasal düzenlemeler, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün (DSİ) güncel faaliyet raporları ve ilgili akademik çalışmalar üzerinden çok boyutlu bir perspektifle irdelemektir.

Çalışmanın yöntemsel şeffaflığını artırmak amacıyla, doküman tarama süreci sistematik bir çerçevede yürütülmüştür. Veri kaynakları hukuk sistemindeki hiyerarşiye uygun olarak; temel kanunlar, Cumhurbaşkanlığı kararnameleri, sulamaya ilişkin teknik ve kurumsal yapıyı düzenleyen diğer mevzuatlar ile ilgili tebliğlerin yanı sıra, konuyla ilgili güncel akademik makaleler ve tezler şeklinde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında toplam 40 farklı doküman (25 resmi rapor ve 15 yasal düzenleme) analiz kapsamına alınmıştır. Bu resmi raporlar içerisinde başlıca; DSİ İdare Faaliyet Raporları, On İkinci Kalkınma Planı (2024–2028), Ulusal Su Planı (2026–2035), I. Su Şurası Sonuç Bildirgesi ve Tarımsal Sulama Sektör Politika Belgesi (2021-2025) gibi kurumsal politikaların temelini oluşturan belgeler yer almaktadır. Belge seçiminde; içeriklerin ilgili dönemlerin sulama politikalarını temsil etme gücü, kurumsal işleyişe dair temel mevzuat değişimlerini yansıtma ve tarımsal sulama literatürüne özgün katkı sağlama kriterleri esas alınmıştır. Doküman tarama süreci Ocak 2026 ile Haziran 2026 tarihleri arasında, "kurumsal yetki devri", "sulama yönetimi", "havza bazlı planlama", "tarımsal sulama mevzuatı" ve "su hukuku" anahtar kelimeleri kullanılarak dijital ve fiziksel arşivler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veriler, nitel araştırmalarda başvurulan tematik analiz yöntemiyle sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir. Analiz süreci üç temel aşamadan oluşmaktadır: İlk aşamada, verilerin kavramsal düzeyde yapılandırılması amacıyla içerik analizi tekniklerine başvurulmuş; dokümanlar üzerinde derinlemesine bir okuma gerçekleştirilerek tümevarımsal bir yaklaşım sergilenmiştir. Bu süreçte; 'merkeziyetçilik', 'yerelleşme', 'mali disiplin' ve 'hukuki yapıdaki çeşitlilik' gibi temel kavramsal kodlar tanımlanarak veri seti kategorize edilmiştir. Temaların oluşturulması aşamasında, bu kodlar bir araya getirilerek "Tarihsel Dönüşüm", "Mevzuatın Gelişimi" ve "Kurumsal Yönetişim Modelleri" olmak üzere üç ana tema belirlenmiştir. Son aşamada ise bu temalar, tarihsel süreç ve idari hiyerarşi kategorileri altında sentezlenerek tartışma bölümüne aktarılmıştır. Bu metodolojik yaklaşım, Türkiye'nin tarımsal sulama yönetimindeki yapısal sorunların yalnızca teknik değil, yönetsel ve hukuki boyutlarıyla da analitik bir zeminde sunulmasına olanak tanımıştır.

3 Tarımsal Sulamanın Tarihsel Gelişimi

Türkiye'de tarımsal sulama yönetimi; kurumsal yapılanma, mevzuatsal düzenlemeler ve yönetişim anlayışındaki dönüşümlerle şekillenen çok katmanlı bir süreçtir. Çalışmada bu süreç, devletin rolü ve kullanıcı katılımı düzeyi baz alınarak üç temel dönem altında sınıflandırılmıştır. Bu dönemlendirme yapılırken; kurumsal yetki devirleri, yasal mevzuat değişiklikleri ve işletme sorumluluklarındaki temel kırılma noktaları metodolojik ölçüt olarak benimsenmiştir.

Türkiye'deki tarımsal sulama yönetiminin tarihsel gelişim süreci, yapısal ve işlevsel değişimler temelinde üç ana evreye ayrılmaktadır: 1923–1950 dönemini kapsayan "Devlet Eliyle Kurumsal İnşa Süreci", yerel odaklı yönetim anlayışından merkezi planlamaya geçişin yaşandığı ve kurumsal temellerin atıldığı bir aşamadır; 1950–1990 yılları arasındaki "Hidrolik Misyon ve Merkeziyetçi Model" dönemi, DSİ'nin kuruluşuyla birlikte su yönetiminin stratejik bir merkeziyetçilikle yürütüldüğü, kalkınmacı hidrolik

misyonun benimsendiği bir süreci ifade ederken; 1990 sonrasını kapsayan "Yönetişim Dönüşümü" dönemi ise küresel yapısal uyum politikalarının etkisiyle merkezi yönetimden katılımcı ve kullanıcı odaklı modellere geçişin yaşandığı, ardından 2018 yılı sonrasında merkezi denetimin yeniden güçlendiği bir evre olarak öne çıkmaktadır. Dönemlerin karakteristik özellikleri ve kurumsal yapı üzerindeki yansımaları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Türkiye'de Tarımsal Sulama Yönetimi Dönemleri ve Temel Karakteristikleri

Dönem	Hakim Yönetişim Modeli	Temel Kurumsal Yapı	Temel Odak Noktası
1923–1950	Devlet Eliyle İnşa	Sular Fen Heyeti, Sular Umum Müdürlüğü	Altyapı İnşası ve Planlama
1950–1990	Merkeziyetçi Model	DSİ, Toprak-Su Genel Müdürlüğü	Makro Yatırımlar ve Hidrolik Misyon
1990–2018	Katılımcı/Yerel Model	Sulama Birlikleri, Kooperatifler	İşletme Devirleri ve Kullanıcı Katılımı
2018–	Merkezi Denetim	DSİ (Denetim), Bakanlık (Politika)	Mali Disiplin ve Teknik Standardizasyon

3.1 Devlet Eliyle Kurumsal İnşa Süreci (1923–1950)

Türkiye'de tarımsal sulamanın gelişimi, Cumhuriyetin kuruluşundan itibaren ekonomik kalkınma ve tarımsal üretim artışı hedefleriyle doğrudan ilişkilendirilmiştir. Osmanlı Dönemi'nde su yapılarının inşası büyük oranda vakıflar eliyle yürütülmüş; Konya Ovası Sulaması ile bazı kısıtlı su yolları ve bentler dışında makro ölçekli projelere rastlanmamıştır. Su yönetiminin örgütlü bir yapıya kavuşması, imparatorluğun son döneminde Bayındırlık İşleri Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla başlamıştır. Cumhuriyetin ilanıyla birlikte, 1925 yılında bu yapıya bağlı olarak kurulan Sular Fen Heyeti Müdürlüğü; Bursa, Adana, Ankara, Edirne ve İzmir'de taşra teşkilatını oluşturarak yerel su işlerini idare etmeye başlamıştır. Ancak 1920'li yılların sonlarında yaşanan şiddetli kuraklıklar ve ödenek yetersizliği, yerel odaklı mühendislik yaklaşımından daha kapsamlı bir idari yapıya geçilmesini zorunlu kılmış; bu doğrultuda önce Sular Umum Müdürlüğü, ardından da Bayındırlık Bakanlığı'na bağlı Su İşleri Reisliği kurularak su idaresi merkezi hükümetin doğrudan sorumluluk alanına çekilmiştir (Üzen ve Çetin, 2012; Güngör vd., 2018).

Bu dönemde yürütülen Çubuk Barajı inşaatı, Ankara ve Bursa Ovaları sulamaları ile Tarsus Aynaz Bataklığının ıslahı devletin ilk somut altyapı icraatları olarak öne çıkmıştır. 1940'lı yıllardan itibaren Gediz, Berdan ve Beyşehir gibi büyük projelerle ilk modern sulama şebekeleri inşa edilirken; bu fiziksel gelişime çeltik ekimi ve taşkın koruma gibi tarımsal üretimi doğrudan regüle eden ilk sektörel hukuki düzenlemeler eşlik etmiştir (Üzen ve Çetin, 2012). Söz konusu düzenlemeler, ilerleyen yıllarda kurulacak olan daha büyük su otoritelerinin idari felsefesine öncülük etmiştir. Özetle bu erken dönem, tarımsal su yönetiminin kurumsal ve teknik temellerinin atıldığı, dağınık yerel pratiklerin yerini merkezi planlamaya bırakmaya başladığı ve devletin birincil altyapı üreticisi rolünün kesinleştiği bir kurumsal inşa süreci olarak değerlendirilmektedir.

3.2 Hidrolik Misyon ve Merkeziyetçi Yönetim Modeli (1950–1990)

Türkiye'nin su yönetimi stratejileri ve kurumsal mimarisi açısından 1950'li yıllar, önemli bir kurumsallaşma ve makro planlama evresinin başlangıcı olmuştur. Bu dönemde su, sadece tarımsal bir girdi değil, ulusal kalkınmanın, sanayileşmenin ve modernleşmenin en stratejik aracı olarak görülmüştür.

Bu "hidrolik misyon" doğrultusunda, yüzyılın ortasında kurulan DSİ; katma bütçeli yapısı, tüzel kişiliği ve yüksek teknik kapasitesiyle su yönetimini tek bir merkezde toplayan ana aktör haline gelmiştir. DSİ'nin kuruluşu, Erken Cumhuriyet dönemindeki yerel ve parçalı su yönetiminden, devlet eliyle yürütülen büyük ölçekli ve merkeziyetçi bir planlama modeline geçişin en somut adımıdır.

Başlangıçta temel odağı büyük su yapıları, barajlar ve makro ölçekli tarımsal sulama olan bu merkezi idarenin yetki alanı, ülkenin sosyo-ekonomik dönüşümüne paralel olarak hızla genişlemiştir. 1960'ların başlarında köylerin ve küçük yerleşim yerlerinin içme suyu sorumluluğunu üstlenen kurum, kırsal kalkınmanın altyapısını hazırlamış; bu görev daha sonra 1964 yılında yeni kurulan Köy İşleri Bakanlığı'na devredilmiştir. 1968 yılına gelindiğinde ise hızlı kentleşme ve nüfus artışının meydana getirdiği baskı ile, nüfusu yüz bini geçen büyükşehirlerin içme suyu temini de merkezi yönetimin ve dolayısıyla DSİ'nin sorumluluk alanına dahil edilmiştir. Kurumsal yetkilerdeki bu kademeli genişleme; su yönetiminin tarım, enerji ve kentsel yaşamı birbirine bağlayan, ulusal ölçekte bütüncül ve stratejik bir üst yapı yönetimine dönüştüğünü göstermektedir.

Bu süreçte su yönetiminin kurumsal altyapısı, 1954 yılında DSİ'nin, 1960 yılında ise Toprak-Su Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla bu iki kurumun üstlendiği tamamlayıcı roller üzerinden şekillenmiştir. DSİ, suyun kaynağından ana kanallara iletilmesini içeren makro ölçekli "üst yapı" hizmetlerine odaklanırken; Toprak-Su Genel Müdürlüğü ise tarla içi hizmetlerde "mikro ölçekli" bir teknik uzmanlaşma dönemi başlatmıştır. Bu iki kurum arasındaki görev dağılımı, su yönetiminde fonksiyonel bir ayrışmayı ve uygulama verimliliğini beraberinde getirmiştir. Süreç içinde sulama yatırımları, 1960'lı yıllardan itibaren yeraltı sularının da yönetim mekanizmasına dahil edilmesiyle çeşitlenmiş ve zamanla havza bazlı entegre projelere evrilmiştir. Bu doğrultuda 1970 yılında kurulan Aşağı Fırat Planlama Amirliği, Türkiye'nin en kapsamlı bölgesel kalkınma hamlesi olan Güneydoğu Anadolu Projesi'nin (GAP) teknik ve planlama temelini oluşturmuştur (Ökten ve Çeken, 2008). Eş zamanlı olarak, 1960'lı ve 1970'li yıllar boyunca su yönetiminin toplumsal ayağı da kooperatifleşme hareketleri üzerinden güçlendirilmiş, kırsal kalkınma kooperatiflerinin yaygınlaşmasıyla yerel katılım ulusal bir ağa dönüştürülmüştür.

1980'li yılların ortalarından itibaren yaşanan ekonomik dalgalanmalar ile derinleşen bütçe açıkları, kamu kaynaklarından su yatırımlarına aktarılan mali desteğin azalmasına neden olmuştur. Bu mali kısıtlar, bir yandan DSİ bünyesinde yürütülen sulama altyapısı bakım-onarım hizmetlerinin sistematik olarak sürdürülmesini zorlaştırmış; diğer yandan da işletme masraflarının kullanıcılardan tahsil edilmesinde yaşanan aksaklıklar, sistemin mali sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemeye başlamıştır. Söz konusu finansal daralma, sulama şebekelerinde periyodik olarak yapılması gereken yenileme yatırımlarının aksamasına yol açarak tesislerin fiziksel yıpranma sürecini hızlandırmış ve devlet eliyle yönetim modelinin sınırlarına gelindiğini göstererek, kapsamlı bir rehabilitasyon ve yönetimsel değişim ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (Kibaroğlu, 2022).

Nitekim bu dönemsel koşulların ve katılımcı süreçlerde yaşanan siyasi kesintilerin kırsal örgütlenmeyi zayıflatmasıyla birlikte, idari yapıda da bir merkezileşme ve konsolidasyon dalgası yaşanmıştır. Bu doğrultuda 1984 yılında mülga Toprak-Su Genel Müdürlüğü'nün kapatılarak yetkilerinin Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü'ne (KHGM) devredilmesi, su politikasında önemli bir eksen kaymasına yol açmıştır. Bu idari tasarruf, sulama ve tarla içi geliştirme hizmetlerini müstakil bir teknik disiplin ve mühendislik odağı olmaktan çıkararak, yol ve elektrik gibi genel kırsal altyapı faaliyetleri içerisine dahil etmiştir.

3.3 Yönetişim Dönüşümü: Yerelleşme ve Yeniden Merkezileşme (1990 Sonrası)

1990'lı yıllara gelindiğinde, makroekonomik dengelerdeki değişimler ve uluslararası finans kuruluşlarının dünya genelinde teşvik ettiği yapısal uyum politikaları doğrultusunda, Türkiye'de su yönetimi anlayışında köklü bir paradigma değişimi yaşanmıştır. Bu süreçte devletin doğrudan işletmeci ve bakım sorumlusu olan geleneksel rolü, 1993 yılında uygulamaya konulan "Hızlandırılmış Sulama Yönetimi Devir Programı" ile yerini kullanıcı temelli bir modele bırakmaya başlamıştır. Söz konusu programla birlikte, sulama tesislerinin işletme, bakım ve yönetim sorumlulukları büyük oranda yerel kullanıcılardan oluşan sulama birliklerine devredilerek yerinden yönetim ilkesi kurumsallaştırılmıştır. 2000'li yılların başından itibaren ise bu idari dönüşüme teknolojik bir hamle eşlik etmiştir. Kamu bankaları kanalıyla sunulan düşük faizli krediler ve bakanlık bünyesindeki hibe programları, geleneksel yöntemlerden modern basınçlı sulama (damla ve yağmurlama) sistemlerine geçişi teşvik ederek suyun tarla düzeyindeki kullanım etkinliğini artırmıştır. Bu dönüşüm, suyun maliyet geri kazanımı odaklı bir ekonomik değer olarak tanımlandığı ve kamunun üzerinden operasyonel yükün alınarak yerel kullanıcı örgütlerine aktarıldığı yeni bir dönemi başlatmıştır (Kibaroğlu, 2022; Çakmak vd., 2009; Çakmak ve Avcı, 2017).

Türkiye'de yerel ölçekli sulama hizmetlerinin yönetimsel serüveni, merkezi yapıların yerini kademeli olarak yerinden yönetim modellerine bıraktığı dinamik bir süreci yansıtmaktadır. Geçmiş dönemlerde Toprak-Su Genel Müdürlüğü, sonrasında ise KHGM tarafından yürütülen çalışmalar kırsal kalkınmaya

ivme kazandırmış ve mikro ölçekli çok sayıda yerel projenin hayata geçirilmesini sağlamıştır. Ancak, kamu yönetiminde etkinlik, tasarruf ve yerelleşme arayışlarının bir sonucu olarak 2005 yılında KHGM'nin tasfiye edilmesi, tarımsal sulama yönetiminde yerinden yönetim sürecini en geniş sınırlarına ulaştırmıştır. Söz konusu kurumsal dönüşümle birlikte yerel sulama projelerinin operasyonel sorumluluğu tamamen yerelleştirilmiş; bu görevler 2005-2014 yılları arasında kademeli olarak Büyükşehir statüsündeki illerde ilgili belediyelere, diğer illerde ise il özel idarelerine devredilmiştir. Yerelleşmenin getirdiği bu yeni idari yapıyı stratejik bir denetim ve politika mekanizmasıyla desteklemek amacıyla, 2011 yılında gerçekleştirilen Bakanlık yeniden yapılanmasıyla birlikte TRGM yetki alanı genişletilmiştir. Bu kapsamda kurum; modern sulama tekniklerinin yaygınlaştırılması, sulamada verimlilik artışının sağlanması ve norm kadro standartlarının belirlenmesi gibi makro görevleri üstlenerek sistemin yönlendirici merkezi birimi haline gelmiştir. Süreç, 2010'lu yıllardan itibaren bölgesel kalkınma idarelerinin de havza bazlı stratejik yapılanmayı pekiştirmesiyle birlikte, yerel su politikasını çok daha kompleks, çok aktörlü ve katmanlı bir yönetişim modeline taşımıştır (Çevik vd., 2000; Tekiner, 2023). Bahse konu kurumsal dönüşüm, su yönetimini sadece bir mühendislik işi olmanın ötesine taşıyarak hukuki güvence, mali sürdürülebilirlik ve yerel katılım temelinde çok boyutlu bir idari yapıya dönüştürmüştür.

Gelinen noktada, 2018 yılında hayata geçirilen kapsamlı idari reformlar ve hükümet sistemi değişikliği, su yönetiminde merkezi kontrol ve eşgüdümün yeniden ön plana çıktığı yeni bir dönemi başlatmıştır. Özellikle DSİ'nin sulama birlikleri üzerindeki doğrudan idari, teknik ve mali denetim yetkilerinin artırılması, devletin sistem üzerindeki "üst karar verici ve denetleyici" rolünü perçinlemiştir. Bu kurumsal değişim, sadece bir yapı değişikliği değil; işletme haklarından mali sorumluluklara kadar tüm süreçlerin merkezi bir disiplin ve verimlilik odağında toplanmasını sağlamıştır. Böylece su yönetimi, yerel inisiyatiflerin serbest hareket alanından ziyade, merkezi teknik standartların ve sıkı denetim mekanizmalarının uygulandığı daha profesyonel bir zemine oturtulmuştur.

Özetle, Türkiye'de tarımsal sulama yönetiminin tarihsel gelişimi incelendiğinde, üç temel yönetişim modelinin öne çıktığı görülmektedir. Bunlardan birincisi, 1950–1980 döneminde belirginleşen merkezi planlama ve kamu yatırımlarına dayalı modeldir. İkincisi, 1990'lı yıllardan itibaren uygulamaya konulan kullanıcı temelli ve yerinden yönetim modelidir. Üçüncüsü ise 2018 sonrası dönemde yeniden güç kazanan merkezi denetim modelidir. Bu üçlü yapı, Türkiye'de su yönetiminin doğrusal bir gelişimden ziyade ekonomik, politik ve kurumsal koşullara bağlı olarak dalgalı bir dönüşüm süreci geçirdiğini göstermektedir. Bu dönüşüm, mevcut kurumsal yapının neden parçalı ve çok katmanlı bir karakter taşıdığını açıklayan temel dinamiklerden biri olarak değerlendirilebilir.

Günümüzde bu süreç; iklim projeksiyonları, su kısıtı ve teknolojik modernizasyon gibi güncel parametreler doğrultusunda, havza bazlı sürdürülebilir bir yönetim modeline doğru evrilme eğilimine girmiştir. Ancak tarihsel gelişim göstermektedir ki; sadece fiziksel altyapının tesisi yeterli olmamakta, bu altyapıyı yönetecek idari mekanizmaların ve yasal çerçevelerin ekonomik gerçeklerle uyumlu şekilde kurumsallaşması hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda Türkiye'deki sulama hizmetlerinin etkinliği; merkezi otoritenin denetim gücü ile kullanıcı örgütlenmelerinin operasyonel esnekliği arasındaki dengenin, havza bazlı yaklaşımı da kapsayacak şekilde, rasyonel bir yönetim yapısı üzerine inşa edilmesine doğrudan bağlıdır.

4 Tarımsal Sulama Yönetiminin Yasal Analizi

Türkiye'de tarımsal sulama mevzuatı, Cumhuriyet'in ilk yıllarından itibaren suyun bir doğal kaynak olarak korunmasından, stratejik bir ekonomik değer olarak yönetilmesine kadar geniş bir hukuki dönüşüm sürecini yansıtmaktadır. Bu sürecin yasal temelini, 1926 tarihli ve 831 sayılı Sular Hakkında Kanun oluşturmuş; su kaynaklarının mülkiyet ve tasarruf rejimine ilişkin genel çerçeve ise Türkiye Cumhuriyeti Anayasası'nın 168. maddesinde yer alan "Tabii servetler ve kaynaklar, Devletin hüküm ve tasarrufu altındadır" hükmüyle anayasal güvenceye kavuşturulmuştur. Ancak erken dönemdeki bu düzenlemeler daha çok suyun fiziksel paylaşımına ve yerel haklara odaklanırken, zamanla artan sosyo-ekonomik dinamikler, su idaresinin özel kanunlarla yürütülen merkezi bir yapıya kavuşturulmasını zorunlu kılmıştır. Cumhuriyetin kuruluşundan günümüze kadar tarımsal sulama alanında hayata geçirilen temel yasal düzenlemeler ve bu düzenlemelerin kurumsal yapı üzerindeki yansımaları Tablo 2'de kronolojik bir perspektifle sunulmuştur.

Tablo 2. Türkiye’de Tarımsal Sulama Mevzuatı ve Kurumsal Dönüşüm Kronolojisi

Yıl	Mevzuat / Düzenleme	Amaç ve Kapsam
1926	831 sayılı Sular Hakkında Kanun	Su kaynaklarının mülkiyet ve tasarruf rejimi
1954	6200 sayılı DSİ Kanunu	Merkezi planlama ve yönetim dönemi
1960	167 sayılı Yeraltı Suları Kanunu	Yeraltı sularının devlet denetimine alınması
1960	7457 sayılı Topraksu Genel Müd. Kanunu	Tarla içi geliştirme ve toprak muhafaza hizmetleri
1968	1053 sayılı Belediye Su Kanunu	Büyükşehirlerin içme ve endüstri suyu temini
1969	1163 sayılı Kooperatifler Kanunu	Sulama kooperatiflerinin hukuki altyapısı
1985	3202 sayılı Köy Hizmetleri Kanunu	Kırsal altyapının merkezileşmesi
2011	6172 sayılı Sulama Birlikleri Kanunu	Sulama birliklerine tüzel kişilik ve özerklik kazandırılması
2018	7139 sayılı Kanun	Birliklerin merkezi denetimi ve atama usulüne geçiş

4.1 Kurumsal Yapılanma (1950–1980)

Türkiye’nin su politikalarında ve tarımsal sulama hukukunda kurumsal anlamdaki ilk büyük kırılma 1950’li yıllarda gerçekleşmiştir. 18 Aralık 1953 tarihinde kabul edilen ve 28 Şubat 1954 tarihli Resmî Gazete ‘de yayımlanarak yürürlüğe giren 6200 sayılı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun ile DSİ; katma bütçeli, kamu tüzel kişiliğine sahip merkezi bir amme müessesesi olarak teşkil edilmiştir. Bu kanun, ülkedeki su kaynaklarının planlanması, inşası ve işletilmesi yetkisini tek bir otoriteye vererek merkeziyetçi bir dönemi başlatmıştır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2026). Zamanla sosyo-ekonomik dönüşüm, merkezi idarenin yasal yetki sınırlarının kentsel ve kırsal altyapıyı da kapsayacak şekilde genişlemesini zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda, 9 Mayıs 1960 tarihinde yürürlüğe giren 7478 sayılı Köy İçme Suları Kanunu ile köylerin ve küçük yerleşim yerlerinin içme suyu temini sorumluluğu ve yetkisi DSİ’ye yüklenmiş; kurum bu yasal yükümlülüğü 1964 yılında 441 sayılı Kanun ile Köy İşleri Bakanlığı kurulana kadar idame ettirmiştir. Kentleşme baskısının artmasıyla birlikte, 3 Temmuz 1968 tarihinde yürürlüğe giren 1053 sayılı Belediye Teşkilatı Olan Yerleşim Yerlerine İçme, Kullanma ve Endüstri Suyu Temini Hakkında Kanun ile nüfusu 100 binden fazla olan şehirlerin içme ve endüstri suyu organizasyonu da DSİ’nin yasal yetki alanına dahil edilmiştir.

Bu kurumsal genişleme sürecinde, tarımsal sulama hizmetlerindeki yasal yetki alanları kanunlarla ikiye bölünmüştür. 6200 sayılı Kanun kapsamında DSİ makro ölçekli yatırımlara odaklanırken, 27 Şubat 1960 tarihli Resmî Gazete ‘de yayımlanan 7457 sayılı Topraksu Genel Müdürlüğü Teşkilat Kanunu ile ziraat arazilerinin sulanması, toprak muhafazası ve tarla içi geliştirme hizmetlerini yürütmek üzere Tarım Bakanlığı'na bağlı Toprak-Su Genel Müdürlüğü kurulmuştur. 1960’lı yıllardan itibaren sulama hukuku, salt yüzey sularının ötesine geçerek yeraltı sularını da regülasyon altına almıştır. 23 Aralık 1960 tarihli Resmi Gazete ‘de yayımlanan 167 sayılı Yeraltı Suları Hakkında Kanun, yeraltı sularını devletin hüküm ve tasarrufu altına alarak arama ve kullanma faaliyetlerini DSİ'nin iznine ve "belge" şartına bağlamıştır. Bu yasal çerçeve, 1962 yılında kurulan Aşağı Fırat Planlama Amirliği’nin havza bazlı teknik planlamalarına da hukuki dayanak oluşturmuştur.

Yeraltı sularının devlet denetimine alınmasını takiben, söz konusu kaynakların yereldeki kullanıcılar eliyle örgütlü bir biçimde işletilmesi ihtiyacı, su yönetiminin toplumsal ayağını gündeme taşımıştır. Bu ihtiyaca cevap veren en temel yasal düzenleme, 1969 yılında yürürlüğe giren 1163 sayılı Kooperatifler Kanunu olmuştur. Bu kanun, sulama kooperatiflerinin kuruluşu, işleyişi ve denetimi için sağlam bir hukuki altyapı oluşturarak; tarımsal sulamanın sadece devlet eliyle değil, "kendi kendine yardım" ilkesiyle

kullanıcılar tarafından da yönetilmesine imkan tanımıştır. Bu sayede Köy Kalkınma Kooperatifleri yasal bir kimlik kazanmış, özellikle DSİ'nin ana kanallarının ulaşmadığı alanlarda ve yer altı suyu kullanımında kırsal kalkınmanın hukuki taşıyıcısı haline gelerek 1971 yılında KÖY-KOOP merkez birliği altında ulusal bir ağa dönüşmüştür. Ancak bu kanunun genel bir kooperatifçilik mantığıyla kurgulanmış olması, ilerleyen yıllarda suyun teknik ve kıt bir kaynak olarak yönetilmesinde, sulama birlikleri gibi daha spesifik mevzuatlara ihtiyaç duyulmasına zemin hazırlamıştır.

4.2 İdari Konsolidasyon (1980–1990)

1980 sonrası dönemde, kamu yönetimindeki yapısal uyum politikalarının etkisiyle su ve tarım idaresinin yasal mevzuatında tasfiye ve birleştirme süreçleri yaşanmıştır. 18 Haziran 1984 tarihli Resmî Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe giren 235 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ve ardından bu düzenlemeyi yasalaştıran 9 Mayıs 1985 tarihli 3202 sayılı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun ile 7457 sayılı Kanun'a tabi Toprak-Su Genel Müdürlüğü kapatılarak tüm mülkiyet, yetki ve görevleri KHGM'ye devredilmiştir. Kırsal altyapı hizmetlerinin tek bir çatı altında toplanmasını amaçlayan bu hukuki tasarruf, sulama ve tarla içi geliştirme hizmetlerini müstakil bir kanuni organizasyon ve teknik disiplin olmaktan çıkararak genel kırsal altyapı mevzuatına dahil etmiştir.

Bu kurumsal dağınıklığa, 1980'li yılların ortalarından itibaren derinleşen bütçe açıkları süreci eklenmiştir. Bu dönemde, 6200 sayılı Kanun'un işletme, bakım ve onarım masraflarının kullanıcılardan tahsil edilmesini öngören ilgili maddelerinin işletilmesinde hukuki ve finansal aksaklıklar yaşanmıştır. Yatırım bütçelerindeki daralma, kanunla işletilmesi zorunlu kılınan sulama şebekelerinin periyodik yenileme yatırımlarının mevzuata uygun şekilde yürütülememesine neden olmuş ve tesislerde ciddi bir fiziksel yıpranma süreci başlatmıştır (Kibaroğlu, 2022). Söz konusu mali ve operasyonel tıkanıklık, devleti 1990'lı yılların başından itibaren sulama tesislerini yerel kullanıcılara devretmeye zorlayan "Devir Genelgeleri" sürecinin hukuki ve ekonomik gerekçesini oluşturmuştur.

4.3 Katılımcı Yönetime Geçiş (1990–2018)

1960 tarihli ve 167 sayılı Kanun ile yeraltı sularının devlet denetimine alınması, söz konusu kaynakların yereldeki kullanıcılar eliyle örgütlü bir biçimde işletilmesi ihtiyacını doğurarak su yönetiminin toplumsal ayağını gündeme taşımıştır. Bu yasal hamle, suyun sadece bir "doğal hak" değil, devlet tarafından tahsis edilen "teknik bir kaynak" olarak tanımlandığı bir dönemi başlatmış; ancak bu kaynağın yerelde yönetilme biçimine dair kurumsal boşluklar, 1990'lı yıllara kadar genel hükümler çerçevesinde yönetilmeye çalışılmıştır. 1990'lı yılların başında hız kazanan "sulama tesislerinin devri" süreci, uzun bir süre müstakil bir yasal dayanaktan yoksun kalarak belediye ve kooperatif kanunlarının gölgesinde yürütülmüştür. Bu belirsizliği ortadan kaldırmak ve sulama birliklerine kurumsal bir kimlik kazandırmak amacıyla 2011 yılında ihdas edilen 6172 sayılı Sulama Birlikleri Kanunu, mevzuatta yeni bir dönemi simgelemektedir. Bu kanunla sulama birlikleri; kamu tüzel kişiliğine sahip, idari ve mali özerkliği olan yapılara dönüştürülmüş; "maliyet geri kazanımı" ve "kendi kendine yeterlilik" prensipleri sulama yönetiminin yasal zorunluluğu haline getirilmiştir. 6172 sayılı düzenleme, katılımcı yönetiminin hukuki çerçevesini çizmiş olsa da birliklerin mali denetimi ve operasyonel verimliliği konusundaki tartışmalar, mevzuatın 2018 yılında yeni bir faza geçmesine neden olmuştur.

Mevzuat tarihindeki en güncel yönetimsel dönüşümü simgeleyen 19 Nisan 2018 tarihli ve 7139 sayılı Kanun, sulama birliklerinin yönetim modelini yerel demokratik seçim odaklı yapıdan, DSİ denetimli ve atama usulüne dayalı merkezi bir eşgüdüm modeline taşımıştır. Bu kapsamda birlik başkanlarının, doğrudan Bakanlık tarafından atanan ve kamu görevlisi statüsüne sahip DSİ personeli arasından belirlenmesi, merkezi idarenin yereldeki teknik ve idari denetim gücünü doğrudan bir kurumsal hiyerarşiye bağlamıştır. Bu hamle, yerel kullanıcı örgütlerinin idari özerkliği ile merkezi idarenin teknik denetim gücü arasındaki hassas dengenin; kamu yararı, mali disiplin ve teknik rasyonalite ekseninde yeniden kurgulanmasıdır. Söz konusu kanun, özellikle işletme ve bakım süreçlerinde kronikleşen mali zafiyetleri gidermeyi hedeflerken, su hukukunu "katılımcılık" ekseninden "denetim ve verimlilik" eksenine sabitlemiştir.

7139 sayılı Kanun ile 6172 sayılı Sulama Birlikleri Kanunu'nda yapılan değişiklikler, Türkiye'de sulama yönetiminde merkezi denetimi güçlendiren temel bir kırılma noktası oluşturmuştur. Ancak 2018 sonrası süreç, yalnızca yasal metinlerdeki değişikliklerle sınırlı kalmamış; ikincil mevzuat düzenlemeleri ve yargısal denetim mekanizmalarıyla şekillenmeye devam etmiştir. Özellikle bu dönemde yürürlüğe giren yönetmelikler ve DSİ genelgeleri, birliklerin gelir-gider dengesini korumaya yönelik mali disiplin önlemlerini ön plana çıkarırken, idari yargıya intikal eden uyuşmazlıklar da sürecin hukuki boyutunu genişletmiştir. İdari yargı kararları, bir yandan merkezin (DSİ) denetim yetkisinin sınırlarını çizerken diğer yandan kullanıcı örgütlerinin özerklik alanlarını yeniden tanımlamıştır. Bu bağlamda 2018 sonrası

dönem, teknik standardizasyonun arttığı, yerel katılımın ise yeniden yapılandırılmaya ihtiyaç duyduğu bir evre olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla bu süreç, Türkiye'nin tarımsal sulama mevzuatı tarihinin durağan bir sonu değil, yaşayan ve idari-yargısal pratiklerle sürekli güncellenen dinamik bir parçası niteliğindedir.

4.4 Tarife Regülasyonu

Bu denetim ve verimlilik odaklı yaklaşım, hizmet bedellerinin belirlenme usullerinde de kendini göstermektedir. Doğrudan DSİ tarafından işletilen tesislerde ücretlendirme esasları 6200 sayılı Kanun uyarınca DSİ'nin teklifi ve Cumhurbaşkanı Kararı ile yürürlüğe girerken; işletme hakları sulama birliklerine devredilen tesislerde 6172 sayılı Kanun hükümleri gereği Tarım ve Orman Bakanı onayı esas alınmaktadır. Öte yandan, sulama kooperatifleri, belediyeler, il özel idareleri ve muhtarlıklar gibi farklı idari yapılar altındaki halk sulamalarında ise ücretlendirme disiplini, Sulama Sistemlerinde Su Kullanımının Kontrolü ve Su Kayıplarının Azaltılmasına İlişkin Yönetmelik'in 7. ve 10. maddelerinde yer alan teknik ve mali kriterler çerçevesinde regüle edilmektedir.

4.5 Finansman Çeşitliliği

Türkiye'den tarımsal sulama yatırımlarının finansman çeşitliliği ve özel sektör katılımı, 3996 sayılı Bazı Yatırım ve Hizmetlerin Yap-İşlet-Devret Modeli Çerçevesinde Yaptırılması Hakkında Kanun ile yasal bir statü kazanmıştır. Kamu bütçesi üzerindeki yatırım yükünü hafifletmeyi amaçlayan bu düzenleme, büyük ölçekli sulama şebekelerinin inşası ve belirli bir süre boyunca işletilmesi görevini özel girişimlere devreden bir mekanizma sunmaktadır. Sulama yönetimi açısından bu modelin temel fonksiyonu; yatırımın geri dönüş süresi boyunca tesisin bakım, onarım ve işletme sorumluluğunun, belirli bir hizmet standardı ve tarife disiplini çerçevesinde yüklenici firmaya bırakılmasıdır. Ancak 3996 sayılı Kanun kapsamında kurgulanan bu yapı; işletme süresi sonundaki devir süreçleri, su kullanım bedellerinin belirlenmesi ve havza genelindeki diğer kullanıcı örgütleri ile olan koordinasyon ihtiyacı bakımından kendine özgü bir yönetim alanı oluşturmaktadır. Nihayetinde bu kanun; suyun iletim maliyetlerinin finansal sürdürülebilirliği ile tarımsal üretim üzerindeki girdi yükü arasındaki dengeyi, sözleşme hukukuna dayalı bir işletme disipliniyle yönetmeyi amaçlamaktadır.

Bu dönüşüm, tarımsal sulama mevzuatını tekil bir işletme kanunu olmaktan çıkararak, daha geniş bir tarım politikası ağının stratejik bileşeni haline getirmiştir. Sulama yönetimi artık sadece suyun iletimini değil, 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu ile arazilerin toplulaştırılmasını ve verimli kullanımını, 5488 sayılı Tarım Kanunu ile de havza bazlı üretim planlamasını doğrudan destekleyen hukuki bir sacayağına dönüşmüştür. Nihayetinde bugün Türkiye'de sulama hukuku; toprağın mülkiyeti, suyun tahsisi ve ürünün planlanması süreçlerinin birbirinden bağımsız düşünülemeyeceği, birbirini denetleyen ve tamamlayan bütüncül bir mevzuat ekosisteminin parçasıdır.

Büyükşehir statüsünde olmayan illerde tarımsal sulama hizmetlerinin yerel yönetim ayağı, 5302 sayılı İl Özel İdaresi Kanunu çerçevesinde yürütülmektedir. KHGM'nin teknik mirasını devralan bu yapı, mahalle (köy) tüzel kişilikleri sınırları içerisindeki küçük ölçekli sulama tesislerinin ve göletlerin inşası ile işletilmesinde doğrudan yetkilendirilmiştir. Bu modelde, teknik personel ve makine parkının "Tarımsal Hizmetler Müdürlükleri" bünyesinde birleştirilmesi, kurumsal hafızanın ve mühendislik birikiminin korunmasına imkan tanımıştır. Ancak 5302 sayılı Kanun kapsamındaki bu kurumsal süreklilik, büyükşehir belediye modeline geçişle birlikte yapısal bir değişime uğramıştır.

6360 sayılı Kanun ile büyükşehirlerde İl Özel İdarelerinin tüzel kişiliğinin sona erdirilmesi, KHGM döneminden devralınan "Halk Sulamaları" açısından bir idari boşluk doğurmuştur. İlgili düzenleme, bu tesislerin mülkiyetini belediyelere devretmiş; ancak 2560 sayılı İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü Kuruluş ve Görevleri Hakkında Kanun'un su ve kanalizasyon idarelerine tanıdığı görev tanımının, DSİ'nin teknik kapasite veya proje ölçeği bazlı sınırlamalarından bağımsız bir yasal çerçeve sunması, kurumlar arası işlevsel bir görev paylaşımı tanımlanmasını güçleştirmiştir. Bu durum, KHGM'den devralınan mühendislik birikimi ve teknik personel kapasitesinin devir sürecinde kurumsal bütünlüğünü kaybetmesine yol açmış; mülkiyeti belediyelere geçen birçok küçük ölçekli tesisin, yerel idarelerin öncelikli faaliyet alanının içme suyu ve kanalizasyon hizmetleri olması nedeniyle etkin bir işletme yapısına kavuşturulamamasına neden olmuştur. Bu durum, söz konusu tesislerin hukuki ve teknik açıdan sahipsiz bir nitelik kazanmasına yol açmıştır. Neticede tarımsal su yönetimi; yerel yönetimlerin 2560 sayılı Kanun'dan doğan geniş yetki alanı ile sulama birliklerinin teknik disiplini arasında bir yetki çatışmasına dönüşerek, suyun havza bazlı yönetiminin önündeki operasyonel engellerden birini oluşturmuştur.

4.6 Yapısal Sorun: Mevzuat Heterojenliği ve "Yönetim Birliği" İhtiyacı

Bu tarihsel süreçte kat edilen mesafe, günümüzde aşılması gereken temel bir yapısal sorunu da beraberinde getirmiştir: Mevzuat heterojenliği ve parçalı yönetim yapısı. Mevcut sistemde sulama hizmetlerinin; birlik, kooperatif ve yerel yönetim kanunları gibi farklı idari felsefelerle kurgulanmış yasal metinler üzerinden yürütülmesi, havza ölçeğinde yetki çakışmalarına ve kaynak israfına sebebiyet vermektedir.

Küresel su yönetimi anlayışında; 1992 Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı (Gündem 21) ve aynı yıl yayınlanan Dublin Prensipleri ile çerçevesi çizilen 'Entegre Su Kaynakları Yönetimi' (IWRM), suyun yönetiminde ekonomik verimlilik, sosyal eşitlik ve ekolojik sürdürülebilirlik sacayağını esas almaktadır (United Nations, 1992; World Meteorological Organization, 1992). Bu yaklaşım, su kaynaklarının parçalı bir idari yapı yerine havza ölçekli, tekil ve entegre bir otorite tarafından yönetilmesinin; kurumsal kapasiteyi artırdığını ve iklim değişikliği gibi küresel belirsizliklere karşı adaptasyon kabiliyetini geliştirdiğini savunmaktadır. Ayrıca, gelişmiş su yönetimi pratiklerinde görülen havza merkezli modeller, mükerrer yapılanmaların tasfiye edilmesi ve teknik standartların ülke genelinde uyumlaştırılması noktasında temel referans noktası kabul edilmektedir.

Bu perspektifle; sulama hizmetlerinin kurumsal bir sadeleşme ile birlik esaslı, merkezden denetlenebilir ve hesap verebilir bütünleşik bir yapıya kavuşturulması, mevcut çok başlılığın sebep olduğu etkinlik kayıplarını minimize etmeye yönelik rasyonel bir çözüm odağı olarak değerlendirilmektedir. Bu modelin, tamamen merkeziyetçi veya tamamen yerinden yönetim yaklaşımları karşısında tercih edilmesinin temel gerekçesi; teknik denetim zafiyetlerini merkezi standartlar ile gidermesi ve yerel katılımın getirdiği operasyonel esnekliği, uygulama süreçlerinde yerel aktörlere rol vererek korumasıdır. Dolayısıyla, dağınık yapıların belirli bir geçiş süreci dahilinde tekil bir sistem disiplinine entegre edilmesi hem mali şeffaflığı artıracak hem de ulusal düzeyde bir yönetim birliği tesis ederek Türkiye'nin su bütçesinin rasyonel yönetimine hizmet edecektir.

5 Mevcut Kurumsal Yapı ve Sulama Yönetimi

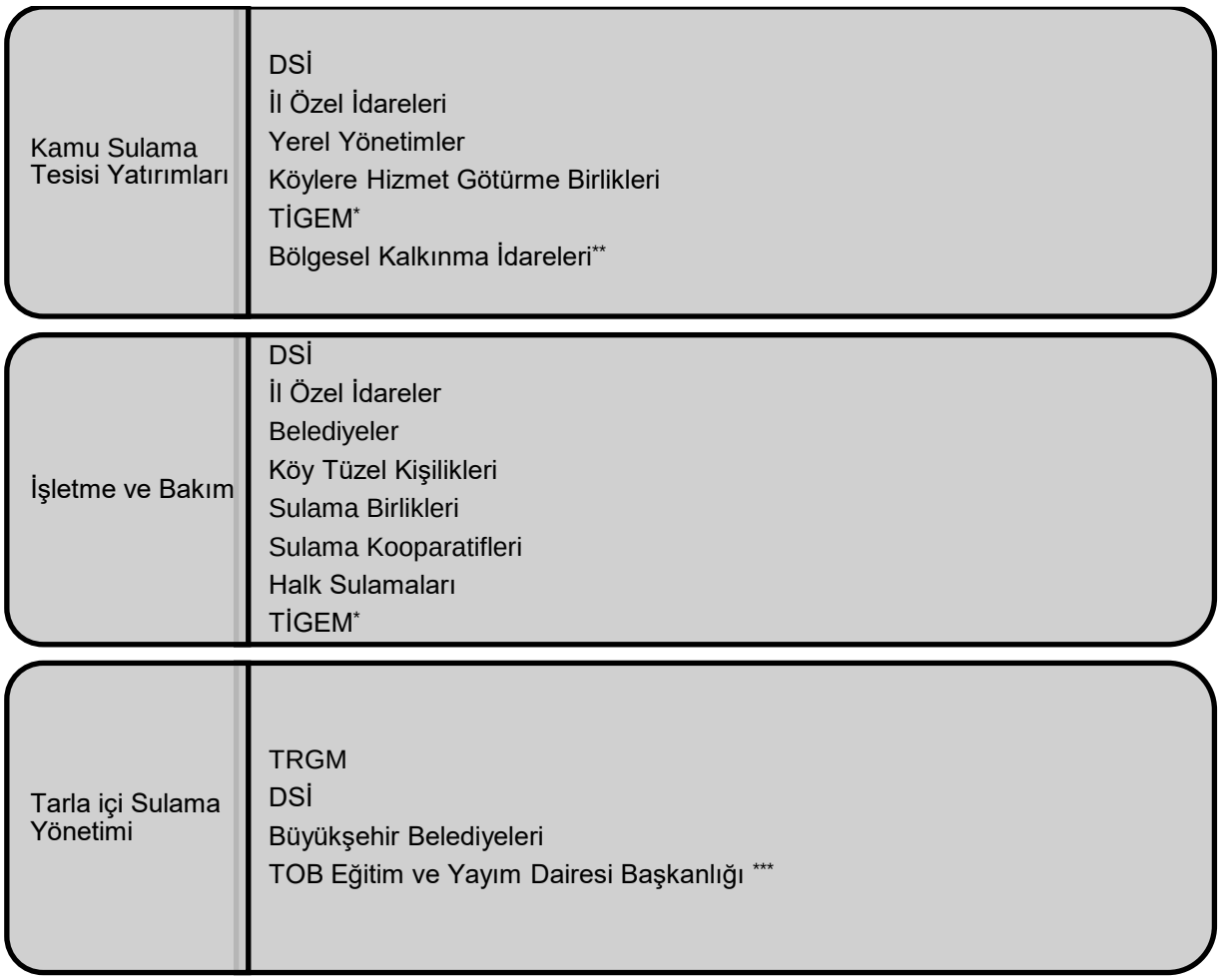
Türkiye'nin toplam yıllık yenilenebilir su potansiyeli 112 milyar metreküp olarak belirlenmiştir. Bu miktarın 94 milyar metreküpü yer üstü su kaynaklarından, 18 milyar metreküpü ise yer altı su kaynaklarından oluşmaktadır. Türkiye, kişi başına düşen yıllık yaklaşık 1.301 metreküp kullanılabilir su miktarıyla "su stresi" yaşayan ülkeler sınıfında yer almaktadır. Bu kısıtlı su kaynakları üzerindeki en büyük baskı ise tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmaktadır; nitekim tarımsal sulamada kullanılan su miktarı, Türkiye'nin yıllık toplam su tüketiminin yaklaşık %79'unu oluşturmaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2026; SYGM, 2026).

Türkiye'nin yaklaşık 78 milyon hektarlık yüz ölçümü içerisinde, ekonomik olarak sulanabilir tarım arazisi varlığı yapılan etüt çalışmaları neticesinde 8,5 milyon hektar olarak belirlenmiştir. Bu potansiyel doğrultusunda, 2028 yılı sonuna kadar 7,85 milyon hektar alanın sulamaya açılması hedeflenmiştir. Güncel veriler itibarıyla, sulamaya açılan brüt alan miktarı 7,28 milyon hektar seviyesine ulaşırken; bu alanların fiilen sulanma durumunu ifade eden sulama oranı tüm sulamalar için yaklaşık %69'a yükselmiş ve sulama randımanı %52 olarak gerçekleşmiştir. Sulama sahalarındaki altyapı durumu incelendiğinde, kapalı sistem sulama oranının %38 seviyesinde olduğu görülmektedir. Ülke genelinde tarımsal sulamada birim alana (hektar başına) düşen yıllık ortalama su tüketimi ise 9.044 metreküp seviyesindedir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2025; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2026).

Türkiye'de tarımsal sulama şebekelerinin işletilmesi, bakım-onarımı ve yönetimi temel olarak; "Devlet Sulama İşletmeciliği", "Katılımcı Yönetim Sulama İşletmeciliği" ve "Kamu-Özel Sektör Sulama İşletmeciliği" olmak üzere üç ana model üzerinden yürütülmektedir (Çevik vd., 2000). Bu modeller çerçevesinde, DSİ tarafından inşa edilerek işletmeye açılan sulama alanlarının yönetimsel sorumluluğu farklı kuruluşlar arasında dağılım göstermektedir. 2024 yılı sonu kesinleşmiş verilerine göre, söz konusu alanların %80,7'si tesislerin işletme, bakım ve yönetim sorumluluğunu devralan sulama birlikleri ve ilgili kuruluşlar tarafından idare edilmektedir. Yeraltı suyu (YAS) sulama kooperatifleri toplam alanın %13,4'ünün sorumluluğunu üstlenmişken, doğrudan DSİ eliyle yürütülen devlet sulama işletmeciliğinin payı %5,4 düzeyindedir. Geriye kalan %0,5'lik kısım ise tesis bedelini karşılayarak inşa ettiren tarım işletmeleri gibi kurum ve kuruluşların idaresi altındadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2025).

Türkiye'deki tarımsal sulama yönetimi, Şekil 1'de görüldüğü üzere, yatırım aşamasından tarla içi uygulamalara kadar uzanan ve DSİ, TRGM, belediyeler, sulama birlikleri ile kooperatifler gibi birçok farklı kurumu içeren çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu kurumsal çeşitlilik içerisinde, suyun verimli kullanımı adına geliştirilen sektörel su tahsis planları, özellikle suyun farklı kullanım alanları arasında hakkaniyetli ve sürdürülebilir bir şekilde paylaştırılmasını sağlayan temel bir çerçeve sunmaktadır. Bu planlama yaklaşımı, sadece su kaynaklarının korunmasına değil, aynı zamanda tarımsal üretimde

karşılaşılabilecek risklerin yönetilmesine ve kaynakların öncelikli ihtiyaçlar doğrultusunda dengeli bir biçimde kullanılmasına olanak tanıyan önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, 2021; Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2026).



Şekil 6. Türkiye'de Tarımsal Sulama Yönetiminde Kurumsal Görev Paylaşımı ve Aktör Dağılımı (Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, 2021; Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023; Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2026).
* Kendi Tesisleri; ** Finansman Temini; *** Eğitim ve Yayım Faaliyetleri

5.1 Devlet Sulama İşletmeciliği ve Yasal Çerçeve

DSİ aracılığıyla sulamaya açılan alanlarda şebekelerin işletme, bakım ve yönetim süreçlerine dair tüm sorumluluklar, kurumun kendisi veya yetki devri yapılan kuruluşlarca yerine getirilmektedir. Söz konusu sorumlulukların devrine ilişkin yasal dayanak, 4 nolu "Bakanlıklara Bağlı, İlgili, İlişkili Kurum ve Kuruluşlar ile Diğer Kurum ve Kuruluşların Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi'nin 121. maddesinin (i) fıkrasında düzenlenmiştir. Bu hüküm, ilgili tesislerin hakiki ve hükmi şahıslara devredilmesi hususunda Bakanlığa teklifte bulunma yetkisini DSİ'ye tanımaktadır.

Bu model içerisinde doğrudan DSİ eliyle yürütülen %5,4'lük payın yanı sıra, Tarım İşletmeleri Genel Müdürlüğü (TİGEM) gibi kamu tüzel kişiliğine sahip kuruluşların kendi bünyelerinde yürüttüğü işletmecilik faaliyetleri de yer almaktadır. Metinde %0,5'lik pay ile ifade edilen ve tesis bedelini karşılayarak inşa ettiren kurumlar kategorisinde bulunan TİGEM işletmeleri, modern sulama tekniklerinin (basınçlı borulu sistemler) mevcut veriler ışığında, uygulamanın yaygınlaştığı alanlardır. Bu yapılar, devletin sulama yatırımını bizzat yaptığı ancak işletme disiplininin kurumsal bir kamu işletmesi tarafından deruhte edildiği "devlet işletmeciliğinin özel bir formunu temsil etmektedir

5.2 Katılımcı Yönetim Modeli ve Su Kullanıcı Teşkilatları

Katılımcı sulama yönetimi anlayışı çerçevesinde tesislerin sorumluluğunu üstlenen su kullanıcı teşkilatları; sulama birlikleri, sulama kooperatifleri, belediyeler, köy tüzel kişilikleri ve üniversitelerden oluşmaktadır. Bu yapılar arasında temel aktör olan sulama birlikleri, kamu tüzel kişiliği niteliğine sahiptir. Birliklerin yönetimsel altyapısı tarihsel süreçte; 1580 nolu Belediye Kanunu ve 5355 nolu Mahalli İdare Birlikleri Kanunu üzerinden şekillenmiş, günümüzde ise 6172 nolu Sulama Birlikleri Kanunu ile müstakil bir zemine kavuşmuştur. Birlikler, işletme ve bakım maliyetlerini kullanıcılardan "su ücreti" adı altında tahsil ederek karşılamakta ve DSİ'ye olan yatırım bedeli borçlarını taksitler halinde geri ödemektedir.

Sulama kooperatifleri ise 1163 nolu Kooperatifler Kanunu kapsamında, özellikle küçük ölçekli ve tek bir yerleşim birimi sınırlarındaki şebekelerin yönetimini üstlenmektedir. Birliklerin denetimi mülki idare ve DSİ arasında paylaştırılmışken, kooperatiflerin teknik ve mali denetimleri tamamen Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yürütülmektedir. Yerel yönetim ayağında ise belediyeler, 5393 nolu Belediye Kanunu uyarınca kendi sorumluluk sahalarındaki tesislerin işletilmesinden sorumlu tutulurken; köy tüzel kişilikleri de 5442 nolu İl İdaresi Kanunu çerçevesinde küçük ölçekli tesislerde suyun dağıtımını sevk ve idare etmektedir. Ayrıca üniversiteler, 2547 nolu Yükseköğretim Kanunu kapsamında kendi araştırma çiftliklerinde bulunan şebekelerin yönetimini doğrudan deruhte edebilmektedir. Yönetimsel payı sınırlı olsa da bu alanlar; modern sulama teknolojilerinin test edildiği ve çiftçilere aktarıldığı 'teknoloji transferi ve örnek uygulama sahaları' olarak, sulama yönetiminin bilgi üretimi boyutunda stratejik bir işlev üstlenme potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

5.3 Kamu-Özel Sektör İşletmeciliği ve Halk Sulamaları

Halk sulamaları veya özel sulamalar, tarım arazisi sahiplerinin kendi imkanlarıyla hayata geçirdikleri küçük ve orta ölçekli tesisleri kapsamaktadır. Su kaynağı olarak akarsular, kuyular ve göletlerden faydalanılan bu tesisler, şahsi mülkiyetin yanı sıra ortaklık veya kiralama modelleriyle işletilmektedir. Mevcut envanterde bu alanların büyüklüğü 1 milyon hektar olarak ifade edilse de uzun süredir güncellenmeyen bu veriler, saha gerçekleri ile karşılaştırıldığında beklentilerin altında kaldığına işaret etmektedir. Kayıt dışı alanların tespiti, ulusal su yönetimi planlamasının sağlıklı yürütülebilmesi adına sistemin iyileştirilmesine yönelik kapsamlı bir etüt çalışmasının literatür ve uygulama açısından elzem olduğu görülmektedir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2026).

6 Sonuç

Bu çalışma, Türkiye'nin tarımsal sulama yönetimindeki tarihsel ve kurumsal gelişimini analiz ederek, sektördeki temel zorluğun fiziksel altyapı kapasitesinden ziyade, idari yapıda gözlemlenen "yönetsel parçalanmışlık" olduğunu ortaya koymaktadır. 1990'lardan bu yana yürütülen sulama hizmetlerinin devri politikaları, operasyonel esneklik sağlama hedefiyle başlatılmışsa da, zaman içerisinde merkezi denetim ve yerel uygulama arasındaki mekanizmaların kısıtlanmasına yol açmıştır. Literatürde "çok katmanlı yönetişim" ve "sosyo-teknik sistemler" bağlamında ifade edilen bütüncül su yönetişimi ilkeleriyle karşılaştırıldığında; Türkiye'deki yapının, havza ölçeğindeki kaynak yönetiminde koordinasyon ihtiyaçlarına yanıt vermekte zorlandığı görülmektedir. Bu yapısal durum, merkezi stratejik öncelikler ile yerel saha uygulamaları arasındaki etkileşimin zayıflamasına ve kaynak yönetiminde bütüncül bir perspektifin geliştirilmesinde idari darboğazların oluşmasına neden olmaktadır.

Çalışma, literatürde sıklıkla ifade edilen "yetki karmaşası" ve "planlama-uygulama eşgüdümsüzlüğü" gibi sorunların, sadece teknik bir koordinasyon eksikliğiyle açıklanamayacağını savunmaktadır. Aksine bu durum, kamu tüzel kişiliği ile özel hukuk tüzel kişiliğine tabi aktörlerin, farklı idari işleyiş prensiplerine sahip olmasından kaynaklanan yapısal bir uyum gereksinimini yansıtmaktadır. Literatürde genellikle bir "uygulama açığı" olarak nitelendirilen havza yönetimi süreci, bu çalışma ile mevzuatsal farklılıklar ve kurumsal eşgüdüm mekanizmalarının yetersizliği üzerinden tanımlanmıştır. Dolayısıyla, Türkiye'nin sulama yönetimindeki reform gereksinimi, kurumlar arası görev paylaşımını düzenleyen teknik bir revizyondan ziyade; hukuki statü uyumunu gözeten, havza ölçeğinde yönetim felsefesini bütünleştiren ve kurumsal etkileşimi güçlendiren sistematik bir dönüşüm ihtiyacını temsil etmektedir.

Bu kuramsal çerçeve ve ulaşılan bulgular, Türkiye'nin tarımsal sulama yönetiminde operasyonel verimliliği ve yönetsel bütünlüğü tesis etmek adına üç temel stratejik aksiyonun hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır:

Su yönetimi disiplininde kurumsal bütünlüğü tesis etmek adına, kullanım ve denetim süreçlerini parçalı yapısından kurtararak tekil ve kapsamlı bir yasal çerçevede birleştiren yeni bir mevzuat düzenlemesi, sürdürülebilir yönetişimin en temel gereksinimidir. İkinci olarak, sulama hizmetlerinde yaşanan yetki karmaşasının, idari dağınıklığın ve kaynak israfının önüne geçebilmek adına, 1163 sayılı

Kooperatifler Kanunu ile 6172 sayılı Sulama Birlikleri Kanunu arasındaki hukuki ayrışmanın sonlandırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, yeni sulama kooperatifi kurulmasının durdurulması ve mevcut kooperatiflerin belirli bir takvim çerçevesinde, faaliyetlerini sulama birlikleri çatısı altında birleştireceği aşamalı bir dönüşüm yol haritasının izlenmesi elzemdir. Bu geçiş süreciyle birlikte; birlik esaslı, merkezden denetlenebilir ve şeffaf bir hesap verebilirlik mekanizmasına sahip bir yapıya geçilmesi, sulama yönetiminin işlevselliğini ve etkinliğini artıracak temel bir öneri olarak öne çıkmaktadır. Son olarak, planlama süreçlerinde idari sınırların yerine hidrolojik havza sınırlarının esas alınması; literatürde savunulan "entegre havza yönetimi" modelinin, Türkiye pratiğinde daha etkin uygulanmasını sağlayacak en temel adımdır.

Sonuç olarak; Türkiye'nin tarımsal sulama yönetimi, sahip olduğu tarihsel birikimi modern ve esnek bir yönetişim modeline taşıyacak bir dönüşüm sürecine ihtiyaç duymaktadır. Çalışma, sulama yönetiminin sadece işletme odaklı bir süreçten ibaret olmadığını; aksine, çok aktörlü ve çok katmanlı bir yönetişim meselesi olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecek dönemde sürdürülebilir bir yapı; mevzuatın kuramsal bütünlük temelinde sadeleştirilmesine, hukuki ikiliğin giderilmesine ve tüm aktörlerin, uyumlu bir yönetim çerçevesi içerisinde, ortak stratejik hedefler doğrultusunda faaliyet göstermesine bağlıdır.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan tüm makaleler tamamen açık erişimlidir; yayımlandıkları anda ücretsiz olarak okunabilir, indirilebilir ve paylaşılabilir. Tüm makaleler, Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) lisansı kapsamında yayımlanır. Bu lisans, eserlerin uygun atıf yapılması koşuluyla ticari olmayan amaçlarla paylaşılmasına izin verir; ancak eserler üzerinde değişiklik yapılmasına izin verilmez. DSİ Teknik Bülteni'nde yayımlanan herhangi bir araştırma makalesinin telif hakkı yazarlara aittir.

Kaynaklar

Aküzüm, T., Çakmak, B., & Gökalp, Z. (2010). Türkiye'de su kaynakları yönetiminin değerlendirilmesi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 3*(1), 67–74.

Çakmak, B., & Avcı, S. (2017). Türkiye'de sulama sistemlerine uygulanan destekler. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 172–177. https://doi.org/10.17100/nevbiltek.332091

Çakmak, B., Yıldırım, M., & Aküzüm, T. (2009). Türkiye'de tarımsal sulama yönetimi, sorunlar ve çözüm önerileri. İçinde *TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi Bildiriler Kitabı* (ss. 215–224). TMMOB.

Çevik, B., Kırda, C., & Sayın, S. (2000). *Sulama araç, yöntem ve organizasyonu*. İçinde *V. Türkiye Ziraat Mühendisliği Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı* (Cilt 2, ss. 959–983). TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası.

Dellapenna, J. W., & Gupta, J. (Eds.). (2009). *The evolution of the law and politics of water*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9867-3

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2025). *2024 yılı DSİ'ce işletilen ve devredilen sulama tesisleri değerlendirme raporu*.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2026). *DSİ 2025 yılı faaliyet raporu*. https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/759

Eroğlu, V. (2024). *Su ve medeniyet: Mühendislik destanı hâtıralarım – 2*. İTÜ Yayınevi.

Fagan, B. (2011). *Elixir: A history of water and humankind*. Bloomsbury Press.

Hassan, F. A. (2011). *Water history for our times* (IHP Essays on Water History, Vol. 2). UNESCO.

Gönenç, İ. E. (2006). *Sürdürülebilir havza yönetimi. Cilt 1: Havzalarda doğal ve sosyoekonomik sistemin özellikleri*. İGEM Danışmanlık, Organizasyon ve Araştırma.

Güngör, Y., Erözel, A. Z., & Yıldırım, O. (2018). *Sulama* (6. baskı). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.

Kızıltoprak, F., & Arıkoğlu Ündücü, C. (2022). Dünyada ve Türkiye'de havza yönetimleri. *Su Ürünleri Dergisi, 39*(4), 349–357. https://doi.org/10.12714/egejfas.39.4.12

Kibaroğlu, A. (2022). Türkiye sulama yönetimi politikaları ve sulama birlikleri. *Eurasian Journal of Agricultural Economics (EJAE), 2*(2), 24–31. https://doi.org/10.5281/zenodo.7305523

Kimençe, T. (2023). Su kaynakları yönetiminde havza ölçekli faaliyetler. M. E. Aydın & A. D. Şahin (Ed.), *İklim değişimi çerçevesinde su kaynaklarının mevcut durumu ve geleceği* içinde (ss. 155–170). Türkiye Bilimler Akademisi. https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch08

Mays, L. W. (Ed.). (2010). *Ancient water technologies*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8632-7

Mithen, S. (2012). *Thirst: Water and power in the ancient world*. Harvard University Press. https://doi.org/10.4159/harvard.9780674072183

Ökten, Ş., & Çeken, H. (2008). GAP Projesi'nin Türkiye'nin kırsal kalkınma politikaları içindeki yeri ve önemi. *Tarım Ekonomisi Dergisi, 14*(1–2), 13–22.

Öztürk, S., Ubay Tönük, G., & Gülgün, B. (2014). Türkiye'de havza yönetimi ve yönetim planı yaklaşımları. *Ziraat Mühendisliği*, (361), 59–63.

Pahl-Wostl, C. (2015). *Water governance in the face of global change: From understanding to transformation*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21855-7

Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *On ikinci kalkınma planı (2024–2028).* https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/11/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_17112023.pdf

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2026). *Ulusal su planı (2026–2035).* https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Ulusal%20Su%20Plan%C4%B1%20%20Resmi%20Gazete/Ulusal%20Su%20Plan%C4%B1%20(2026-2035).pdf

Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü. (2021). *Tarımsal sulama sektör politika belgesi (2021–2025).*

https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/yayin/Tarımsal%20Sulama%20SPB_2021-2025.pdf

Tekiner, M. (2023). Türkiye'de uygulanan tarımsal su kullanım hizmet bedeli algoritmaları ve tarifelerinin değerlendirilmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 10*(3), 681–691. https://doi.org/10.30910/turkjans.1289131

United Nations. (1992). *Agenda 21: Programme of action for sustainable development*. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf

Üzen, N., & Çetin, Ö. (2012). Geçmişten günümüze su ve sulama yönetimi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 1*(2), 281–290.

Wittfogel, K. A. (1957). *Oriental despotism: A comparative study of total power*. Yale University Press.

World Meteorological Organization. (1992). *The Dublin statement on water and sustainable development*. International Conference on Water and the Environment. https://www.ielrc.org/content/e9209.pdf

DSİ Destek Hizmetleri Dairesi Bşk.
Basın ve Foto-Film Servisi
Ankara-2026