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

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Technical Bulletin of DSI

SAYI: 147
YIL : OCAK 2026



Ermenek Barajı-Karaman

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

YIL:2026 **SAYI: 147** **ISSN: 1012-0726**
E-ISSN: 1308-2477

İçindekiler

Araştırma Makalesi
Sarıgöl Afşar Baraj Akımlarının Dinamik Su Bütçesi Yöntemiyle Modellenmesi.....9
Umut SUZAN, Mehmet Ali UL, Umut OKKAN

Araştırma Makalesi
İnklinometre Yöntemi ile Kralkızı-Dicle P-3 Pompaj Sulaması (Diyarbakır) İletim Kanalında Meydana Gelen Kütle Hareketlerinin Karakterizasyonunun Belirlenmesi 26
Hayrullah YÜREKLİ, Veysi KANAT, Erhan HEKİMHANOĞLU, Kübra GÖLBAŞI, Cemal YILDIZ, Ayhan KOÇBAY

Araştırma Makalesi
Effects of Asbestos and Inorganic Contaminants on Groundwater Chemistry at Earthquake Debris Disposal Sites 39
Aylin CİVAN, Adnan MORKOÇ, Elçin KABADAYI

Araştırma Makalesi
Yeraltı Suyu Suni Beslemenin Önemi: Kemalpaşa (Sinancılar, İzmir) Uygulaması 55
Meral ERDOĞAN TOPÇUOĞLU, Ergin DOĞAN, Adem SÖMER

Araştırma Makalesi
Kovada Gölü'nün Trofik Durumundaki Değişimler, Hidrolojik Baskılar ve Ekosistem Risklerinin Değerlendirilmesi 64
Cafer BULUT

Araştırma Makalesi
Gölge Süper Bilgisayar: Kamu Sektöründe Dağıtık Yüksek Başarımlı Hesaplama ile Atıl GPU Kaynaklarının Taşkın Modelleme ve Yapay Zeka İş Yükleri İçin Fırsatçı Kullanımı 74
Önder KARAGÖZ, Salih BABAGİRAY

Araştırma Makalesi
Probabilistic Design of River Jetties by Monte Carlo Simulation.....87
Arif UĞURLU, Can Elmar BALAS

Derleme
İslam İşbirliği Teşkilatının Su Yönetimi Alanındaki Faaliyetleri ve Türkiye'nin İşbirliği Fırsatları 107
Özlem ŞENOL, Ahmet ŞEREN, Özlem İRİTAŞ

TECHNICAL BULLETIN OF DSI

YEAR: 2026 **ISSUE:147** **ISSN: 1012-0726**
E-ISSN: 1308-2477

Contents

Research Article
Modeling of Sarigol Afsar Dam Flows with Dynamic Water Budget Method.....9
Umut SUZAN, Mehmet Ali UL, Umut OKKAN

Research Article
Determination of the Characterization of Mass Movements Occurring in the Kralkızı–Dicle P-3 Pumped Irrigation Transmission Canal (Diyarbakır) Using the Inclinometer Method.....26
Hayrullah YÜREKLİ, Veysi KANAT, Erhan HEKİMHANOĞLU, Kübra GÖLBAŞI, Cemal YILDIZ, Ayhan KOÇBAY

Research Article
Effects of Asbestos and Inorganic Contaminants on Groundwater Chemistry at Earthquake Debris Disposal Sites 39
Aylin CİVAN, Adnan MORKOÇ, Elçin KABADAYI

Research Article
Importance of Artificial Groundwater Recharge: A Case Study from Kemalpaşa (Sinancılar, İzmir 55
Meral ERDOĞAN TOPÇUOĞLU, Ergin DOĞAN, Adem SÖMER

Research Article
Changes in the Trophic Status of Lake Kovada, Hydrological Pressures, and the Assessment of Ecosystem Risks 64
Cafer BULUT

Research Article
Shadow Supercomputing: Opportunistic Utilization of Idle GPU Resources with Distributed High-Performance Computing in the Public Sector for Predictive Flood Modeling and AI Workloads.....74
Önder KARAGÖZ**,** Salih BABAGİRAY

Research Article
Probabilistic Design of River Jetties by Monte Carlo Simulation.....87
Arif UĞURLU, Can Elmar BALAS

Review
The Activities of the Organisation of Islamic Cooperation in the Field of Water Management and Turkiye's Cooperation Opportunities.....107
Özlem ŞENOL, Ahmet ŞEREN, Özlem İRİTAŞ

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 Demir — DSİ Genel Müdürlüğü
Üyeler
Dr. Ayhan Koçbay — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Bahattin Avcuoğlu — DSİ Genel Müdürlüğü
İsmail Sevim — DSİ Genel Müdürlüğü
Aydın Sağlık — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Bülent Çağlar Özcan — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Murat Ali Hatipoğlu — DSİ Genel Müdürlüğü
Nesrin Özbek — DSİ Genel Müdürlüğü
Dr. Nermin Doğan — DSİ Genel Müdürlüğü
Prof. Dr. Cem Avcı — Boğaziçi Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Ekmekçi — Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Tuğrul Yılmaz — Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Arda Şorman — Eskişehir Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Aynur Şensoy Şorman — Eskişehir Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Hülya Boyacıoğlu — Dokuz Eylül Üniversitesi
Doç. Dr. Emre Alp — Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Asım Egemen Yılmaz — Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Şerife Yurdagül Kumcu — Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Abdussamet Arslan — Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Özgür Anıl — Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Nejan Huvaj Sarıhan — Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ayşen Davraz — Süleyman Demirel Üniversitesi
Doç. Dr. Kıymet Deniz Yağcıoğlu — Ankara Üniversitesi
Doç. Dr. Enes Zengin — İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Ing. İsmail Albayrak — Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü (ETH Zürih)
Dr. Özgen Kökten — Temelsu Muhendislik
Yasin Engin — Türkiye Hazır Beton Birliği

Yabancı Dil Editörü
Işık Su Yazıcı — 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 : 147
YIL : OCAK 2026

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

© 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 the GENERAL DIRECTORATE OF STATE HYDRAULIC WORKS
General Director
Mehmet Akif BALTA

Editorial Board
Chairman
Dinçer Aydoğan — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Editor-in-Chief
Prof. Dr. Levent Kurnaz — Boğaziçi University
Associate Editor-in-Chief
Dr. Mehmet Yakut — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Hüseyin Demir — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Members
Dr. Ayhan Koçbay — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Dr. Bahattin Avcuoğlu — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
İsmail Sevim — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Aydın Sağlık — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Dr. Bülent Çağlar Özcan — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Dr. Murat Ali Hatipoğlu — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Nesrin Özbek — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Dr. Nermin Doğan — General Directorate of State Hydraulic Works (DSI)
Prof. Dr. Cem Avcı — Boğaziçi University
Prof. Dr. Mehmet Ekmekçi — Hacettepe University
Prof. Dr. Tuğrul Yılmaz — Middle East Technical University
Doç. Dr. Arda Şorman — Eskisehir Technical University
Prof. Dr. Aynur Şensoy Şorman — Eskisehir Technical University
Prof. Dr. Hülya Boyacıoğlu — Dokuz Eylul University
Doç. Dr. Emre Alp — Middle East Technical University
Prof. Dr. Asım Egemen Yılmaz — Ankara University
Prof. Dr. Şerife Yurdagül Kumcu — Necmettin Erbakan University
Prof. Dr. Abdussamet Arslan — Gazi University
Prof. Dr. Özgür Anıl — Gazi University
Doç. Dr. Nejan Huvaj Sarıhan — Middle East Technical University
Prof. Dr. Ayşen Davraz — Süleyman Demirel University
Doç. Dr. Kıymet Deniz Yağcıoğlu — Ankara University
Doç. Dr. Enes Zengin — Istanbul Technical University
Dr. Ing. İsmail Albayrak — Swiss Federal Institute of Technology Zurich
Dr. Özgen Kökten — Temelsu Engineering and Consulting
Yasin Engin — 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-annual (January, July)

ISSUE : 147
YEAR: JANUARY 2026

ISSN
1012- 0726 (Press)
1308- 2477 (Online)

© Open Access and Copyright: All articles published in the DSİ Technical Bulletin 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 Bülten Amaç ve Kapsam

Amaç: Su kaynaklarının korunması, geliştirilmesi ve yönetilmesi ile ilgili konulardaki araştırmaları, uygulamaları ve bilimsel gelişmeleri; DSİ'nin tüm birimlerine, ilgili kamu kurum ve kuruluşlarına, araştırmacılara ve uzmanlara duyurmak ve tanıtmaktır. Bu amaç doğrultusunda DSİ Teknik Bülteni:

- Baraj, gölet, sulama projeleri, su kanalları ve diğer su yapılarının planlama, tasarım, inşaat ve işletme aşamaları ile ilişkili teorik ve uygulamalı araştırmaları, vaka çalışmalarını ve teknik bilgi ve deneyimleri paylaşmayı,
- Su kaynaklarının yönetimi, taşkın kontrolü, çevre koruma, su kirliliği ile mücadele ve kuraklık gibi konularda, Birleşmiş Milletler tarafından belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını gözeten bilimsel ve teknik gelişmeleri aktarmayı,
- Su mühendisliği ve sulama alanındaki ulusal ve uluslararası yenilikleri ve uygulamaları tanıtmayı,
- Alanında uzman akademisyenler, araştırmacılar ve teknik personelin çalışmalarını teşvik ederek bilgi alışverişini ve iş birliğini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Kapsam: DSİ Teknik Bülteni, inşaat, malzeme, 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 kontrolü:** Taşkınların önlenmesi ve yönetimi ile ilgili teknik makaleler,
- **Su yapıları:** Su kanalları, regülatörler, kapalı ve açık sistem akımları, atık su ve arıtma sistemleri, pompa istasyonları ve diğer su yapılarının tasarımı, inşaatı ve işletmesi ile ilgili teknik 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 teknik makaleler,
- **Su kaynakları yönetimi:** Su kaynaklarının planlanması, tahsisi, kullanımı ve korunması ile ilgili makaleler,
- **Hidrolojik ve hidrojeolojik etüt ve araştırmalar:** Su kaynakları ile ilgili hidrolojik ve hidrojeolojik çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan izotop teknikleri ile ilgili makaleler,
- **Kuraklık:** Kuraklığın etkileri ve su kaynaklarının kuraklığa karşı korunması ile ilgili makaleler,
- **Su kalitesi:** Su kaynaklarının kalitesinin belirlenmesi, izlenmesi, 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 önlenmesi ve kontrolü ile ilgili makaleler,
- **Su güvenliği:** Sınır aşan sular konusunda çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik, teknik ve mühendislik çözümleri ile ilgili makaleler,
- **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.

DSİ Teknik Bülteni'nde aşağıdaki türlerde yayın yapılmaktadır:

- **Araştırma Makalesi (Research Article):** Belirli bir konu veya alanda yapılmış, bilimsel bilginin ilerlemesine katkıda bulunan, özgün, objektif ve tekrarlanabilir bir çalışmanın sunulduğu yazılardır. Bu yazılarda; çalışmanın teorik çerçevesi, literatürdeki çalışmalarla bağlantısı ve literatüre katkısı, araştırma yöntemleri, bilimsel yöntemlerle elde edilmiş yeterli nitelik ve nicelikteki verileri ve bu verilerin analizleri, çalışmanın bulguları ve sonuçları ayrıntılı bir şekilde sunulmalıdır. Araştırma makaleleri, makale konusunda yeterli bilgi ve deneyime sahip en az 2 hakem tarafından değerlendirildikten sonra dergide yayınlanmaktadır.
- **Derleme (Review):** Belirli bir konu veya alandaki literatürde hali hazırda bulunan çalışmaları kapsamlı bir şekilde analiz eden ve özetleyen yazılardır. Bu tür makaleler, genellikle özgün araştırma yapmadan, mevcut araştırma sonuçlarını ve teorik gelişmeleri bir araya getirir ve yorumlar. Derleme makaleleri, literatürün kapsamlı ve doğru bir şekilde tarandığını, analiz edildiğini ve yorumlandığını tespit etmek ve makaleyi daha güvenilir kılmak için, makale konusunda yeterli bilgi ve deneyime sahip en az 2 hakem tarafından değerlendirildikten sonra dergide yayınlanmaktadır.
- **Teknik Not (Technical Note):** Önceki çalışmalara kıyasla büyük oranda yeni bir yöntem, teknik geliştirme veya ekipman hakkında kısa, öz ve spesifik teknik bilgileri veya bulguları hızlı ve etkili bir şekilde sunan yazılardır. Teknik not makaleleri, sunulan teknik bilgilerin, yöntemlerin veya bulguların bilimsel olarak doğru, geçerli ve gerçekten yeni olduğunun tespitinin sağlanabilmesi için, makale konusunda yeterli bilgi ve deneyime sahip en az 2 hakem tarafından değerlendirildikten sonra dergide yayınlanmaktadır.

- **Düzeltme (Erratum):** Daha önce yayınlanmış bir makalede bulunan hataları düzeltmek amacıyla yayınlanan hata bildirimi yazılarıdır. Düzeltme makaleleri, hatanın önem derecesine de bağlı olarak, orijinal makaleyi inceleyen hakemlerce tekrar değerlendirildikten sonra yayınlanmaktadır. Eğer orijinal hakemlerle iletişim kurulamazsa veya farklı bir uzmanlık gerekliyse yeni hakemler belirlenebilir. Ancak, küçük ve açıkça tanımlanmış hataların söz konusu olduğu durumlarda (yazım hataları veya basit hesaplama hataları gibi) düzeltme makaleleri hızlı bir editoryal inceleme sürecinden geçirilerek dergide yayınlanabilmektedir.

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 aim of the Technical Bulletin of DSİ is to disseminate and promote research, practices, and scientific advancements related to the protection, development, and management of water resources to all units of DSİ, relevant public institutions, organizations, researchers and experts. In alignment with this objective, the Technical Bulletin of DSİ aims to:

- Disseminate theoretical and applied research, case studies, and technical knowledge and expertise related to the planning, design, construction, and operation stages of dams, reservoirs, irrigation projects, water channels, and other hydraulic structures.
- Communicate scientific and technical advancements concerning water resource management, flood control, environmental protection, combating water pollution, and drought, with a focus on the United Nations Sustainable Development Goals.
- Introduce national and international innovations and practices in the fields of water engineering and irrigation.
- Foster the exchange of knowledge and collaboration by encouraging the work of expert academicians, researchers, and technical personnel.

Scope: The Technical Bulletin of DSİ encompasses a broad range of topics related to various branches of science and engineering, such as construction, materials, environment, nature, and earth sciences. The primary topics eligible for publication in the Technical Bulletin of DSİ, provided they have not been published elsewhere, include:

- **Dams and Reservoirs:** Technical articles on the design, construction, operation, safety, and quality control activities of dams and reservoirs.
- **Water Management, Irrigation Projects, and Innovations in Irrigation:** Articles on new technologies, products, and practices in water engineering and irrigation, as well as the planning, design, construction, and operation of irrigation projects.
- **Flood Control:** Technical articles on the prevention and management of floods.
- **Water Structures:** Technical articles on the design, construction, and operation of water channels, regulators, closed and open system flows, wastewater and treatment systems, pump stations, and other hydraulic structures.
- **Coastal Structures:** Articles on the design and construction of structures built on coasts of seas, lakes, or rivers, managing the interaction between the water body and the land.
- **Sediment Movement:** Articles on natural material movements in rivers and lakes, erosion and scouring, and preventing sediment accumulation in reservoirs.
- **Natural and Artificial Construction Materials:** Articles involving experimental, theoretical, or practical studies on materials such as concrete, aggregate, cement, rock, soil, thermoplastics, composites and steel pipes, metallic materials, polymers, and geosynthetic materials.
- **Soil and Rock Mechanics:** Articles on the engineering properties and behaviors of soils and rocks, the investigation of changes in these properties over time, solutions to arising problems, and case studies from DSİ's work in soil and rock mechanics.
- **Water Resources Management:** Articles on the planning, allocation, use, and protection of water resources.
- **Hydrological and Hydrogeological Studies:** Articles on hydrological and hydrogeological studies related to water resources, including the use of isotope techniques.
- **Drought:** Articles on the impacts of drought and protecting water resources against drought.
- **Water Quality:** Articles on determining, monitoring, and improving the quality of water resources, including the development of water analysis methods.
- **Water Quality Models and Predictions:** Articles on modeling for determining and improving water quality, and the effects of climate change on water quality and quantity.
- **Water Pollution:** Articles on preventing and controlling water pollution.
- **Water Security:** Articles on environmental impacts and sustainability, technical and engineering solutions related to transboundary waters.
- **Quality-Control Engineering and Quality Management:** Articles on quality management systems in organizations, sustainable construction technologies and materials, renewable construction materials, recycling of construction materials at the end of their lifespan, the examination of material quality changes over time, and the monitoring of structural behaviors and integrity against earthquakes or other destructive impacts.

Types of Publications in the Technical Bulletin of DSİ:

- **Research Article:** Papers presenting original, objective, and replicable work that contributes to the advancement of scientific knowledge on a specific topic or field. These articles should detail the theoretical framework, connection to existing literature, research methods, sufficient qualitative and quantitative data obtained through scientific methods, and analysis of these data, findings, and conclusions. Research articles are published after evaluation by at least two referees with sufficient knowledge and experience in the article's subject matter.
- **Review Article:** Papers comprehensively analyzing and summarizing existing studies in a particular field or topic. These articles typically compile and interpret existing research results and theoretical developments without conducting original research. Review articles are published after evaluation by at least two referees to ensure comprehensive and accurate literature review, analysis, and interpretation.
- **Technical Note:** Papers presenting brief, specific technical information or findings on new methods, techniques, or equipment compared to previous studies. Technical notes are published after evaluation by at least two referees to ensure the scientific accuracy, validity, and novelty of the presented technical information or findings.

- **Erratum:** Papers published to correct errors in previously published articles. Erratum articles are reviewed by the original referees or new referees, depending on the error's significance and the need for specialized knowledge. Small, clearly defined errors (such as typographical or simple calculation errors) undergo a rapid editorial review process before publication.

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.

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147, p9-25 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p9-25

Araştırma Makalesi / Research Article

Sarıgöl Afşar Baraj Akımlarının Dinamik Su Bütçesi Yöntemiyle Modellenmesi

Modeling of Sarigol Afsar Dam Flows with Dynamic Water Budget Method

Umut SUZAN[1*], Mehmet Ali UL[1], Umut OKKAN[2]

[1] *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama ABD, İzmir*
[2] *Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği ABD, Balıkesir*

**Sorumlu yazar/ Corresponding Author: e-posta: umut.suzan@ege.edu.tr*

Geliş (Received): 09.04.2025, Düzeltme (Revised): 15.09.2025, Kabul (Accepted): 19.09.2025

ÖZ

Potansiyel evapotranspirasyon (EPOT), atmosferik koşullar altında, toprakta su kısıtı bulunmayan bir yüzeyden meydana gelebilecek maksimum buharlaşma (evaporasyon) ve bitkisel terleme (transpirasyon) miktarını ifade eder. Bu kavram, gerçek evapotranspirasyona kıyasla daha yüksek değerlere ulaşabilmekte ve su bütçesi analizlerinde temel bir referans niteliği taşımaktadır. Su bütçesi modellerinin en önemli girdilerinden biri olan EPOT, özellikle kavramsal tabanlı yağış-akış simülasyonlarında, tutarlı EPOT tahminleri ile sabit akış öngörüleri sunabilmektedir. Bu çalışma, Dinamik Su Bütçesi Modeli (DSBM) olarak adlandırılan parametrik bir modele entegre edilebilecek alternatif EPOT denklemlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Literatürde Penman-Monteith eşitliğinin yaygın kullanımı bulunmakla birlikte, bu çalışmada 12 farklı EPOT denklemi DSBM ile birlikte performans kriterleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Araştırma, Sarıgöl Afşar Barajı Havzası'nda gerçekleştirilmiş ve kabul edilebilir EPOT denklemleri istatistiksel yöntemlerle belirlenmiştir. Ayrıca, daha az meteorolojik girdi gerektiren ve uygulamada pratiklik sağlayan denklemler de incelenmiştir. Değerlendirme sonuçlarına göre, sıcaklığa dayalı Hamon denkleminin en tutarlı performansı sunduğu belirlenmiştir. Sınırlı veri bulunan bölgelerde, sıcaklık temelli denklemlerin etkinliği hem zaman hem kaynak açısından önemli avantajlar sağlayabilmektedir. Sonuç olarak, tarımsal açıdan kritik öneme sahip bu havzada, su bütçesi modelleme çalışmalarında pratik ve güvenilir bir yaklaşım olarak sıcaklığa dayalı ve yerel olarak kalibre edilmiş Hamon denkleminin kullanılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Su bütçesi modeli, Penman-Monteith, radyasyon ve sıcaklığa dayalı EPOT denklemleri.

ABSTRACT

Potential evapotranspiration (EPOT) refers to the maximum amount of evaporation and plant transpiration that can occur from a surface with no limitation of water availability under prevailing atmospheric conditions. This concept typically yields higher values compared to actual evapotranspiration and serves as a fundamental reference in water balance analyses. As one of the most critical inputs in water balance models, EPOT enables stable flow projections in conceptual rainfall-runoff simulations when estimated consistently. This study aims to evaluate alternative EPOT equations that can be integrated into a parametric model known as the Dynamic Water Balance Model (DWBM). Although the Penman-Monteith equation is widely used in the literature, this study compares 12 different EPOT equations within the DWBM framework based on hydrological performance criteria. The research was conducted in the Sarıgöl Afşar Dam Basin, and acceptable EPOT equations were identified using statistical methods. Additionally, the presence of equations requiring fewer meteorological inputs and offering practical applicability was examined. Results indicated that the temperature-based Hamon equation provided the most consistent performance. Therefore, in regions with limited data availability, the use of the locally calibrated Hamon equation is recommended as a practical and reliable approach in water balance modeling studies.

Keywords: Water budget model, Penman-Monteith, EPOT equations based on radiation and temperature.

1 Giriş

Budyko (1958), su bütçesi ile iklim arasındaki ilişkileri anlamak amacıyla, bir havzadan gerçekleşen uzun dönemli ortalama yıllık evapotranspirasyonun, yağış ve mevcut enerjiyle belirlendiğini öne sürmüştür. Bu varsayıma dayanarak, "Budyko eğrisi" olarak bilinen basit bir su dengesi modeli geliştirilmiştir. Yıllık ölçekte, yağış ve potansiyel evapotranspirasyon (EPOT) gibi iklimsel faktörler, su bütçesi üzerindeki en belirleyici etkenlerdir ve bu iki değişkenin birlikte değerlendirilmesi çoğu durumda yeterli olmaktadır.

EPOT; enlem, rakım ve bitki örtüsü gibi fiziksel coğrafi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilir ve meteorolojik gözlemlerle ilişkilendirilebilir (Xu ve Singh, 2002). Ancak tava buharlaştırmada olduğu gibi, EPOT'un doğrudan ölçümü mümkün değildir. Bu nedenle, özellikle bitki su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacının belirlenmesinde EPOT'un güvenilir biçimde tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tahminlerde lizimetre (doğrudan yöntemler) ya da ampirik eşitlikler (dolaylı yöntemler) kullanılmaktadır. Uygun yöntemin seçimi, 1980'li yıllara kadar sınırlı sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır (Thornthwaite, 1984; Blaney ve Criddle, 1950; Hamon, 1961). Sonrasında, Allen, Pereira, Raes ve Smith (1998) tarafından yayımlanan FAO-56 raporu, Penman (1984) ve Monteith (1965) yaklaşımlarının birleşimi olan Penman-Monteith (Pen-Mon) denklemini kapsamlı bir referans yöntemi olarak önermiştir. Bu denklem, çeşitli iklim bölgelerinde yürütülen çalışmalarla doğrulanmış ve lizimetre ölçümleri ile yüksek uyum gösterdiği vurgulanmıştır (Allen, Walter, Elliott, Howell, Itenfisu ve Jensen, 2005; Jain, Nayak ve Sudheer, 2008).

FAO-56'nın yayınlanmasının ardından, araştırmacılar Pen-Mon yöntemini diğer ampirik denklemlerle karşılaştırmaya ve bu denklemlerin katsayılarını yeniden kalibre etmeye yönelmişlerdir (Xu ve Singh, 2002; Xystrakis ve Matzarakis, 2011; Pandey, Dabral ve Pandey, 2016). Pandey vd. (2016), Hindistan'ın kuzeydoğusunda gerçekleştirdikleri çalışmada, Makkink (Makk), Turc (Turc) ve Blaney–Criddle (Bl-Cr) denklemlerinin Pen-Mon'a kıyasla daha uyumlu tahminler sunduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Xystrakis ve Matzarakis (2011), Yunanistan'daki çalışmalarında McGuinness-Bordne (McG-Bor) ve Hamon (Ham) denklemlerinin daha düşük mutlak sapmalar ürettiğini rapor etmişlerdir.

Bu araştırmaların temelinde, Pen-Mon yönteminin diğer ampirik denklemlere kıyasla daha fazla meteorolojik veri gerektirmesi yatmaktadır. Özellikle güneşlenme süresi ve radyasyon ölçümleri, sıcaklık verileri kadar yaygın elde edilememektedir. Bölgesel çalışmalar, hangi ampirik denklemlerin daha güvenilir tahminler sağlayabileceğini değerlendirmek açısından da önemlidir. Bu tarz araştırmalar çoğunlukla tarımsal uygulamalar kapsamında ele alınsa da, su bütçesi modellemelerinde EPOT'un rolü kritik düzeydedir (Oudin, Michel ve Anctil, 2005a; Oudin, Hervieu, Michel, Perrin, Andressian, Anctil ve Loumagne, 2005b).

Yağış-akış modelleri, EPOT'u yağışla birlikte temel girdi olarak kullanır. Bu modellerde akış oluşumu, çeşitli parametrelerle kavramsallaştırılır ve süreklilik denklemi aracılığıyla depolama bileşenleri tanımlanarak akış simülasyonları gerçekleştirilir. Paturel, Servat ve Vassiliadis (1995), su dengesi modellerinde yağışın yanı sıra EPOT'un da model duyarlılığı üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Oudin vd. (2005b) tarafından yürütülen kapsamlı çalışmada, 27 farklı ampirik EPOT denkleminden elde edilen tahminler yağış-akış modellemelerinde ayrı ayrı test edilmiş ve McG-Bor denkleminin daha tutarlı çıktılar sunduğu belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde, hangi ampirik EPOT denkleminin yağış-akış modellerinde daha başarılı sonuçlar verdiğine dair genel bir uzlaşı bulunmamaktadır. Türkiye'de bitki su tüketimi hesaplamalarında yaygın olarak Pen-Mon ve Bl-Cr yöntemleri kullanılmasına rağmen, EPOT'un yağış-akış modellemesinde hangi denklemlerin daha uygun olduğu yönünde kapsamlı bir değerlendirme mevcut değildir (Beyazgül, Kayam ve Engelsman, 2000; Okkan ve Kırdemir, 2018). Gediz Havzası'nda yürütülen bir çalışmada McG-Bor denkleminin daha tutarlı çıktılar sunduğu bildirilmiştir (Okkan ve Kiymaz, 2020). Ancak bu çalışmaların çoğu, belirli denklemler ve model bileşenleri ile sınırlı kalmakta; EPOT girdisinin su bütçesi üzerindeki genel etkilerine dair değerlendirmeler ise literatürde yeterince çeşitlilik göstermemektedir.

İklim değişikliğiyle birlikte Türkiye'nin birçok bölgesinde meteorolojik değişkenlerde anlamlı değişimler gözlemlenmektedir. Nüfus artışı, sanayileşme ve sera gazı emisyonlarındaki artış, sıcaklık ve EPOT değerlerinde belirgin yükselişlere neden olmuştur (Özkul, 2009; Okkan ve Fıstıkoğlu, 2014; Okkan ve Kırdemir, 2018).

İklim ve havza karakteristiklerine bağlı olarak geliştirilen su bütçesi modelleri genellikle doğrusal olmayan yapılar içerdiğinden, yüksek sayıda parametre ve gözleme ihtiyaç duyulabilir. Bu durum, model kalibrasyon sürecinde başarıyı artırsa da, doğrulama aşamasında genelleme yeteneğini zayıflatabilir. Ayrıca, parametre bağımlılığı yüksek olan bu modeller, komşu havzalara kolaylıkla uyarlanamayabilmektedir. Bu nedenle, daha az parametreye ve girdiye ihtiyaç duyan sade yapılı

modeller uygulamada daha yaygın tercih edilmektedir (Fıstıkoğlu ve Harmancıoğlu, 2001; Okkan ve Kırdemir, 2016).

Kavramsal yağış-akış modelleri, havzayı homojen bir birim olarak ele alır ve yeraltı suyu ile zemin nemi bileşenleri üzerinden hidrolojik süreçleri matematiksel olarak temsil eder (Noori ve Kalın, 2016; Ersoy, Okkan ve Fıstıkoğlu, 2022). Model simülasyonlarının başarısı ise büyük ölçüde parametre kalibrasyonunun doğruluğuna bağlıdır (Okkan ve Kırdemir, 2020).

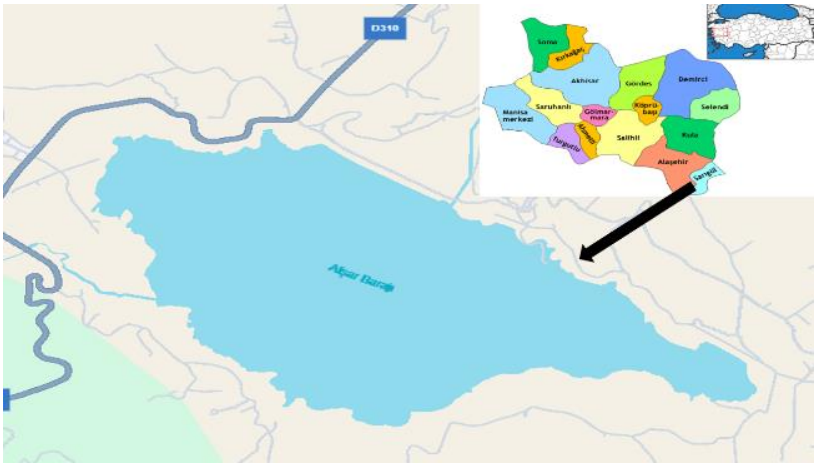
Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı; farklı iklimsel ve topoğrafik koşullara sahip yarı kurak bir bölgede, 12 farklı EPOT yönteminin Dinamik Su Bütçesi Modeli (DSBM) ile entegrasyonu yoluyla, bu girdilerin yalnızca evapotranspirasyon tahmini üzerindeki değil, aynı zamanda tüm havza su bütçesi bileşenleri üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde değerlendirmektir. Bu yönüyle çalışma, özellikle veri kısıtlı ortamlarda DSBM tabanlı hidrolojik modelleme çalışmaları için yöntemsel bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir.

Çalışma alanı olarak, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde yer alan ve tarımsal faaliyetler açısından stratejik öneme sahip Sarıgöl Afşar Baraj Havzası seçilmiştir. Elde edilen bulguların yalnızca bu havza için değil, benzer karakteristiklere sahip komşu bölgelerde de uygulanabilir nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Çalışma Alanı

Sarıgöl Afşar Barajı, Manisa'nın Alaşehir Çayı üzerinde yer almakta olup, taşkın ve sulama kontrolü amacıyla 1977 yılında inşa edilmiştir (Şekil 1). Toprak dolgu tipi olan barajın gövde hacmi 3.166.000 m³ olup, akarsu yatağından yüksekliği 46,00 metredir. Normal su kotunda göl hacmi 69,00 hm³, göl alanı ise 5,25 km²'dir. Baraj, 13.500 hektarlık bir sulama alanına hizmet vermekte olup, drenaj alanı 494,6 km²'dir (Anonim, 2022). Çalışma alanı, yıllık ortalama yağışın 400-500 mm arasında değiştiği, yaz aylarında buharlaşmanın oldukça yüksek seyrettiği yarı kurak karakterde bir bölgedir (Yener ve Ongun, 2017).



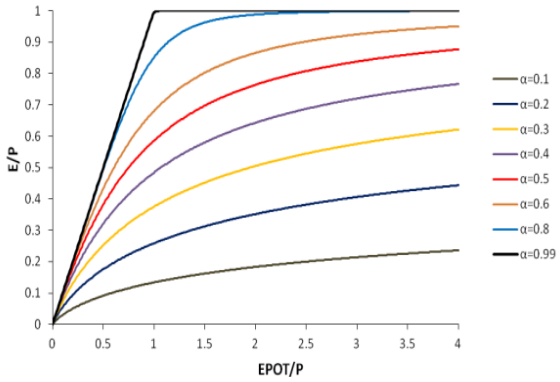
Şekil 1. Afşar Barajı'nın konumu

2.2 Budyko Yaklaşımına Dayalı Dinamik Su Bütçesi Modeli

Budyko (1958), yıllık su bütçesinin yağışa ve evapotranspirasyona bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Milly (1994) ve Zhang, Dawes ve Walker (2001), bitki deseni ve yağış mevsimselliği gibi faktörleri de dahil ederek Budyko yaklaşımını güncellemişlerdir. Fu (1981), benzer bir modelleme yaklaşımını yıllık zaman ölçeğinde geliştirmiştir (Denklem 1).

$$\frac{E}{P} = Bf\left(\frac{EPOT}{P}, a\right) = 1 + \frac{EPOT}{P} - [1 + \left(\frac{EPOT}{P}\right)^{\frac{1}{1-a}}]^{1-a} \quad (1)$$

Burada E: gerçek evapotranspirasyon, P: yağış, EPOT: potansiyel evapotranspirasyon, α: evapotranspirasyon etkinlik parametresi (Okkan, 2015). EPOT/P kuraklık göstergesidir. α 'ın farklı değerleriyle E/P ve EPOT arasındaki ilişkiler Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Çeşitli α değerleri için E/P ve EPOT arasındaki ilişkiler (Okkan, 2015).

Budyko fonksiyonunun aylık verilerle doğruluk sağlamadığı görülmüş, bu nedenle Zhang, Potter, Hickel, Zhang ve Shao (2008) tarafından "Dinamik Su Bütçesi Modeli (DSBM)" geliştirilmiştir.

Herhangi bir t ayında havzada gerçekleşen toplam yağış miktarı P(t), dolaysız akış Qd(t) ile diğer hidrolojik bileşenleri temsil eden X(t)'in toplamına eşittir. Bu ilişki Denklem 2'de gösterilmektedir (Ersoy vd., 2022).

$$P(t) = Q_d(t) + X(t) \quad (2)$$

Burada X(t) bileşeni; zemin neminin aylık değişim miktarı [S(t) − S(t−1)], gerçek evapotranspirasyon E(t) ve yeraltı suyuna giriş yapan fazla su R(t)'nin toplamından oluşmaktadır. Zemin nemi depolaması S(t), maksimum kapasite olan S_{max} değerine ulaştığında, X(t) için beklenen en yüksek değer $X_0(t)$ olarak tanımlanmakta ve bu değer Denklem 3 ile hesaplanmaktadır (Okkan, 2015).

$$X_0(t) = S_{max} - S(t-1) + EPOT(t) \quad (3)$$

$X_0(t)/P(t)$ oranı çok büyük değerlere yaklaştığında, X(t)/P(t) oranı yaklaşık olarak bire yaklaşmaktadır. Buna karşılık, $X_0(t)/P(t)$ oranı sıfıra yaklaştığında X(t) değeri $X_0(t)$'ye yakınsar. Bu oran, Budyko eğrisinde α_1 parametresiyle birlikte kullanıldığında X(t) değeri hesaplanabilir (Ersoy vd., 2022). Söz konusu ilişki Denklem 4'te verilmiştir.

$$X(t) = P(t) * Bf\left(\frac{X_0(t)}{P(t)}\right); \alpha_1 \quad (4)$$

X(t) bileşeni belirlendikten sonra, dolaysız akış Qd(t) Denklem 5 yardımıyla hesaplanmaktadır (Okkan, Ersoy, Kumanlioglu ve Fistikoglu, 2021).

$$Q_d(t) = P(t) - X(t) \quad (5)$$

Önceki aydan kalan zemin nemi S(t−1) ile X(t) bileşeninin toplamı, t ayındaki zemin nemi depolaması, yeraltı suyu katkısı ve evapotranspirasyona ayrılan toplam su miktarı olan W(t) bileşenine eşittir (Ersoy vd., 2022). Bu ilişki Denklem 6'da sunulmaktadır.

$$W(t) = S(t-1) + X(t) = E(t) + S(t) + R(t) \quad (6)$$

Zemin nemi S(t) ile evapotranspirasyon E(t)'nin toplamı Y(t) bileşenini oluşturmaktadır. $Y_0(t)$ ise Y(t)'nin teorik olarak ulaşabileceği maksimum sınır değeri ifade eder. EPOT(t) = E(t) ve S(t) = S_{max} varsayımları altında bu değer Denklem 7 ile hesaplanmaktadır (Okkan, 2015).

$$Y_0(t) = S_{max} + EPOT(t) \quad (7)$$

Budyko yaklaşımına göre, $Y_0(t)/W(t)$ oranı çok büyük değerlere ulaştığında (kurak koşullar), Y(t)/W(t) oranı bire yaklaşmaktadır. Tersine, bu oran sıfıra yaklaştığında (sulak koşullar), Y(t) değeri $Y_0(t)$'ye yaklaşmaktadır. Bu ilişki, evapotranspirasyon etkinlik parametresi α_2 kullanılarak Budyko fonksiyonu aracılığıyla modellenmekte ve Denklem 8 ile ifade edilmektedir. Yeraltı suyu depolamasına boşalan su miktarı ise Denklem 9 ile hesaplanmaktadır (Okkan vd., 2021).

$$Y(t)=W(t)*Bf(Y_0(t)/W(t);\ \alpha_2) \quad (8)$$

$$R(t)=W(t)-Y(t) \quad (9)$$

EPOT(t), E(t) için teorik maksimum sınırı temsil ettiğinden, EPOT'un yetersiz kaldığı durumlarda evapotranspirasyon ihtiyacı W(t) bileşeninden karşılanmaktadır. E(t) değeri, Budyko fonksiyonu ve evapotranspirasyon etkinlik parametresi α_2 kullanılarak hesaplanmakta olup, bu işlem Denklem 10 ile ifade edilmektedir (Ersoy vd., 2022).

$$E(t) = W(t) * Bf\left(\frac{EPOT(t)}{W(t)}, \alpha_2\right) \quad (10)$$

Denklem 11'de, zemin nemi S(t), Y(t) ve E(t) bileşenleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır (Okkan vd., 2021).

$$S(t)=\max(0,Y(t)-E(t)) \quad (11)$$

Tabanda gerçekleşen akım, lineer hazne yaklaşımıyla değerlendirilmekte olup, bu akım yeraltı suyu depolamasında kalan su miktarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Söz konusu ilişki Denklem 12 ile ifade edilmektedir (Ersoy vd., 2022).

$$Q_b(t)=d.G(t-1) \quad (12)$$

Yeraltı suyu biriktirme sistemi G(t)'nin t ayındaki kapasitesi, Denklem 13 yardımıyla hesaplanmaktadır (Okkan, 2015).

$$G(t)=G(t-1)+R(t)-Q_b(t) \quad (13)$$

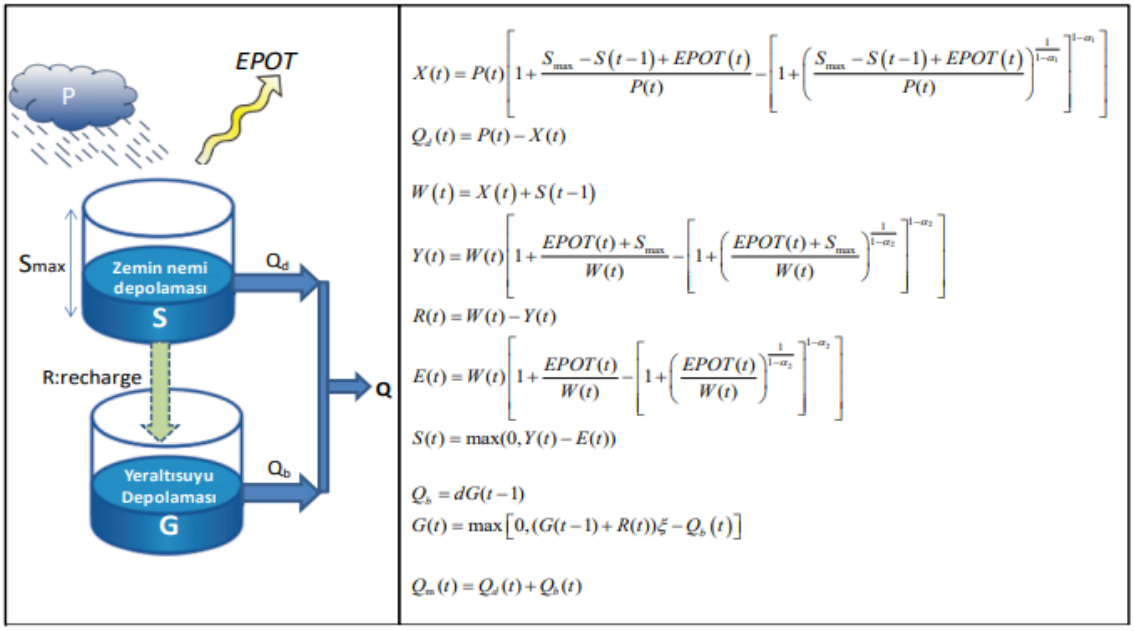
Modelde d ile gösterilen yeraltı suyu biriktirme parametresi, $0 \leq d \leq 1$ aralığında tanımlanmaktadır. Bu parametre, ilk yeraltı suyu biriktirme oranını temsil etmektedir. Okkan (2015) tarafından Denklem 13'e ikinci bir parametre eklenmiş ve bu doğrultuda G(t) bileşeni Denklem 14 ile yeniden tanımlanmıştır (Okkan vd., 2021).

$$G(t)=[G(t-1)+R(t)].\ \xi - Q_b(t) \quad (14)$$

Denklem 14'te yer alan ξ, modelde kullanılan ikinci yeraltı suyu biriktirme parametresidir. Su bütçesi bileşenlerinin hesaplanmasının ardından, toplam akış miktarı Denklem 15 aracılığıyla elde edilmektedir (Okkan, 2015; Ersoy vd., 2022; Okkan vd., 2021).

$$Q_m(t)=Q_d(t)+Q_b(t) \quad (15)$$

Ayrıntıları açıklanan DSBM modeline ait kavramsal akış şeması Şekil 3'te sunulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan DSBM, EPOT, P ve Q verilerine dayalı parametrik bir modele sahiptir. Modelin yapısı gereği, yüzey akışı, toprak nemi, yeraltı suyu katkısı, sızma gibi bazı fiziksel bileşenler ayrı girdiler olarak değil, bu üç ana parametre üzerinden dolaylı biçimde temsil edilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle uzun dönemli ve istatistik temelli hidrolojik çözümlemelerde, sınırlı veri koşullarında da işlevsel ve uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır. Ancak, bu yönüyle DSBM, daha karmaşık hidrolojik süreçleri detaylı ve süreç temelli bir yaklaşımla modellemeye yönelik çalışmalarda sınırlı temsil kapasitesine sahiptir. Bu sınırlılıklar, modelin kuramsal altyapısı ve önceki uygulamalarda gözlemlenen performans düzeyi temel alınarak literatürde tartışılmıştır (Okkan, 2015; Okkan vd., 2021; Ersoy vd., 2022).



$$X(t) = P(t)\left[1 + \frac{S_{max} - S(t-1) + EPOT(t)}{P(t)} - \left[1 + \left(\frac{S_{max} - S(t-1) + EPOT(t)}{P(t)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha_1}}\right]^{1-\alpha_1}\right]$$

$$Q_d(t) = P(t) - X(t)$$

$$W(t) = X(t) + S(t-1)$$

$$Y(t) = W(t)\left[1 + \frac{EPOT(t) + S_{max}}{W(t)} - \left[1 + \left(\frac{EPOT(t) + S_{max}}{W(t)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha_2}}\right]^{1-\alpha_2}\right]$$

$$R(t) = W(t) - Y(t)$$

$$E(t) = W(t)\left[1 + \frac{EPOT(t)}{W(t)} - \left[1 + \left(\frac{EPOT(t)}{W(t)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha_2}}\right]^{1-\alpha_2}\right]$$

$$S(t) = \max(0, Y(t) - E(t))$$

$$Q_b = dG(t-1)$$

$$G(t) = \max\left[0, (G(t-1) + R(t))\xi - Q_b(t)\right]$$

$$Q_m(t) = Q_d(t) + Q_b(t)$$

Şekil 3. DSBM'nin kavramsal akış şeması (Okkan ve Kırdemir, 2018).

Kavramsal hidrolojik modeller genellikle deterministik ve modüler yapıdadır. Bu modeller, su bütçesi denklemlerine dayanarak hidrolojik çevrim bileşenlerini farklı parametreler aracılığıyla temsil eder. Su kaynakları mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bu modellerin başarısı, havza çıkışındaki akışın doğru şekilde tahmin edilmesine bağlıdır. Bu doğruluk ise, modelde kullanılan parametrelerin uygun şekilde kalibre edilmesiyle sağlanmaktadır (Okkan ve Gedik, 2018).

2.3 EPOT Eşitliklerinin DSBM'de Uygulanması

EPOT tahminine yönelik çeşitli yöntemler literatürde yaygın biçimde ele alınmıştır (Xu ve Singh, 2002; Xystrakis ve Matzarakis, 2011; Bogawski ve Bednorz, 2014; Kıymaz, 2018). Bu yöntemler genel olarak; radyasyon temelli, kütle transferine dayalı, sıcaklık temelli ya da bu parametrelerin kombinasyonlarına dayanan modeller olarak sınıflandırılmaktadır (Oudin vd., 2005a, 2005b). Yöntem sayısının fazlalığı, hangi denklemin hangi koşullarda daha başarılı sonuçlar vereceğini belirlemeyi güçleştirmektedir. Kombinasyon temelli yöntemlerden biri olan Penman-Monteith (Pen-Mon) denklemi ve türevleri, çeşitli çalışmalarda referans yöntem olarak kabul görmüştür. Bu yaklaşımın en temel avantajı, lizimetre ölçümleri ile yüksek düzeyde uyum göstermesidir (Gavilan, Berengena ve Allen, 2007; Bogawski ve Bednorz, 2014).

Bölgesel ölçekte kullanılan bir diğer yaklaşım ise tava buharlaşmasına dayalı yöntemlerdir. Bu kapsamda, bazı çalışmalarda mevcut ampirik denklemlerin iyileştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Xu ve Singh, 1998, 2001). Ancak, elde edilen sonuçların her zaman yeterli doğrulukta olup olmadığının sorgulanması gerektiği de belirtilmiştir.

Bu çalışmada, Pen-Mon denkleminin yanı sıra 11 farklı EPOT denklemine dayalı tahminler üretilmiş ve bu tahminlerin Uluderbent akım gözlem istasyonu verilerine dayalı olarak yağış-akış model çıktıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Literatürde çok sayıda EPOT denklemine ve bunların modifikasyonlarına rastlanmakla birlikte, bu çalışmada daha çok atıf almış ve önceki karşılaştırma çalışmalarında kullanılmış denklemler dikkate alınmıştır. Bu denklemler; Thornthwaite (Thw), Blaney-Criddle (Bl-Cr), Hamon (Ham), Turc (Turc), Makkink (Mak), Hargreaves (Harg), Priestley-Taylor (Prs-Tyl), Jensen-Haise (J-H), Caprio (Cpr), Irmak (Irm), McGuinness-Bordne (McG-Bor) ve Penman-Monteith (Pen-Mon) olarak sıralanmaktadır.

Çalışmada kullanılan EPOT denklemlerinin, her biri farklı meteorolojik verilere ihtiyaç duymaktadır. Tablo 1'de, bu denklemler için gerekli olan meteorolojik girdiler özetlenmiştir. Bu kapsamda: T, aylık ortalama sıcaklığı (°C); $T_{dew,}$ aylık ortalama çiğ noktası sıcaklığını (°C); T_{max} ve T_{min} sırasıyla aylık maksimum ve minimum sıcaklıkları (°C); Lat, istasyonun enlem derecesini (°); W_2, deniz seviyesinden 2 metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızını (m/s); Press, yüzey basıncını (kPa); R_s, aylık gelen kısa dalga (solar) radyasyonu (MJ/m^2); ve R_n ise zemin yüzeyindeki aylık net radyasyonu (MJ/m^2) ifade etmektedir. Ayrıca formül yapıları Tablo 2'de sunulmuştur. Bu formüllerin bazı ara bileşenleri ise, tablo bütünlüğünü korumak amacıyla Tablo 3'te ve metin içinde ayrıca açıklanmıştır.

Tablo 1. Yararlanılan EPOT denklemlerinin girdileri (Kiymaz, 2018).

Yöntem Adı (Kısaltması)	Girdiler
Penman-Monteith (Pen-Mon)	T, Press W_2, T_{dew}, R_n
Thornthwaite (Thw)	T, Enlem Derecesi (Lat)
Blaney-Criddle (Bl-Cr)	T, Lat
Hamon (Ham)	T, Lat
Turc (Turc)	T, T_{dew}, W_2
Hargreaves (Harg)	T, R_s
Makkink (Mak)	T, Press, R_s
Priestley-Taylor (Prs-Tyl)	T, Press, R_n
Caprio (Cpr)	T, R_s
Jensen-Haise (J-H)	T, R_s
Irmak (Irm)	T, R_s, T_{max}, T_{min}
McGuinness-Bordne (McG-Bor)	T, R_s

Not: Girdi değişkenlerinin açıklamaları tablodan önce sunulmuştur.

Tablo 2. Kullanılan EPOT formülleri (Okkan ve Kiymaz, 2020)

Yöntem	Formüller	Referanslar
Pen-Mon	$EPOT = N_m * \frac{\left[0.408\Delta \frac{(R_n - G_i)}{N_m} + 120\gamma W_2(e_s - e_a)/(T+273)\right]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34W_2)}$	Penman (1948), Monteith (1965), Xu ve Singh (2002), Allen vd. (1998)
Thw	$EPOT = 16K_i(10T_i/J)^c$ $J = \sum(T_i/5)^{1.514})$ (her bir yıl için ayrı toplam hesaplanır) $c = 0.000000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.4924$	Thornthwaite (1948), Xu ve Singh (2001), Pandey vd. (2016)
Bl-Cr	$EPOT = kp(0.46T + 8.13)$ (Xu ve Singh (2002) esas alınarak k katsayıları Nisan-Eylül döneminde 0.85, Ekim-Mart döneminde 0.45 alınmıştır.)	Blaney ve Criddle (1950), Xu ve Singh (2002)
Ham	$EPOT = 0.6915N_m(D_L/12)^2 \exp(0.062T)$	Hamon (1961), Rossenberry vd. (2004)
Turc	$EPOT = N_m 0.013C_t(T/(15+T))(23.8846\,R_s/N_m + 50)$ Eğer RH>50% ise C_t=1, eğer RH≤50% ise C_t=1+(50-RH)/70 alınmaktadır.	Turc (1961), Heydari, Aghamajidi, Beygipoor ve Heydari (2014)
Harg	$EPOT = 0.0135(1000R_s/\lambda p)(T+17.8)$	Hargreaves ve Samani (1985), Xu ve Singh (2000),
Mak	$EPOT = N_m(0.249(\Delta/(\Delta+\gamma))(Rs/Nm) - 0.12)$	Makkink (1957), Xystrakis ve Matzarakis (2011)
Prs-Tyl	$EPOT = 0.514\,Rn\,(\Delta/(\Delta+\gamma))$	Priestley ve Taylor (1972), Xu ve Singh (2002)
Cpr	$EPOT = (6.1/106)(1000Rs)(1.8T+1)$	Caprio (1974), Xystrakis ve Matzarakis (2011)
J-H	$EPOT = (1000Rs/\lambda\rho)(0.025T + 0.08)$	Jensen ve Haise (1963), Xystrakis ve Matzarakis (2011)
Irm	$EPOT = N_m(-0.478 + 0.156R_s/N_m - 0.0112T_{max} + 0.0733T_{min})$	Irmak, Irmak, Allen ve Jones (2003), Tabari, Grismer ve Trajkovic (2013)
Mcg-Bor	$EPOT = (0.0082(1.8T+32) - 0.19)(23.8846Rs/1500)25.4$	McGuinness ve Bordne (1972), Xu ve Singh (2000),

N_m = m. aydaki toplam gün sayısı

Çalışmada Pen-Mon denklemi, yapısı gereği radyasyon ve aerodinamik bileşenleri esas alan fiziksel temelli bir yöntem olarak kullanılmıştır. Ancak denklemin uygulanmasında gerekli bazı parametrelerin doğrudan ölçüm verileri mevcut olmadığından, bu bileşenlerden buhar basıncı (e_s), doyma buhar basıncı (e_a), buharlaşma eğrisi eğimi (Δ) , rüzgar hızı ve psikrometrik (γ) gibi sabit girdiler amprik fonksiyonlar aracılığıyla tahmin edilmiştir (Tablo 3). Pen-Mon denkleminin bir başka bileşeni olan net radyasyonda doğrudna ölçülmemiş, bunun yerine coğrafi konum (enlem: 38.25°), rakımı (225 m) ve aylık ortalama, maksimum, minimum sıcaklık verileri kullanılarak radyasyon hesaplama yöntemleriyle elde edilmiştir. Bu kapsamda, aylık ortalama gelen kısa dalga radyasyonu (R_s), potansiyel solar radyasyon (R_{so}) ve net uzun dalga radyasyon (R_{nl}) gibi ara bileşenler hesaplanmış; ardından R_n, literatürde yaygın olarak kullanılan denklemler doğrultusunda belirlenmiştir (Allen vd., 1998; Oudin vd., 2005b). Ayrıca çalışmada yer alan tüm EPOT denklemleri, giriş verilerinin zaman çözünürlüğü esas alınarak aylık zaman ölçeğinde çalıştırılmıştır. Thw, Bl-Cr, Turc, Mak, Cpr, Mcg-Bor gibi yöntemler zaten doğrudan aylık ortalama sıcaklık ve ışınım verileriyle çalışan yapıya sahiptir. Diğer yöntemler (örneğin Pen-Mon, Prs-Tyl, Harg vb.) literatürde günlük çözünürlükte uygulanabilen yapıya sahip olsa da, bu çalışmada tüm meteorolojik veriler aylık olarak derlendiğinden, bu yöntemler de doğrudan aylık veriler üzerinden çalıştırılmış ve sonuçlar aylık olarak sunulmuştur. Söz konusu hesaplama süreci; DSBM kapsamında daha önce Okkan (2015), Okkan vd. (2021) ve Ersoy vd. (2022) tarafından önerilen yöntemsel yaklaşıma dayanmaktadır.

Tablo 3. Sıcaklık tabanlı fonksiyonlar, kullanılan sabitler ve rüzgar hızı dönüşüm ilişkileri (Oudin vd., 2005b; Okkan ve Kiymaz, 2020)

Değişkenler	Fonksiyonlar/Sabitler
gerçek buhar basıncı fonksiyonu (mmHg)	$e_a= 4.5825\exp[17.27T_{dew}/(T_{dew}+237.3)]$
doygun buhar basıncı fonksiyonu (mmHg)	$e_{s=}4.5825\exp[17.27T/(T_{dew}+237.3)]$
buhar basıncı eğrisinin eğimi (kPa/°C)	$\Delta= [546.4e_s]/[(T+237.3)^2]$
i.ayın zemin ısı değişim yoğunluğu (MJ/m^2)	$G_i=0.07(T_{i+1}-T_{i-1})$
rölatif nem (%)	$RH=100e_a/e_s$
yüzeyden 8 m yükseklikteki rüzgar hızı	$W_8=0.967W_{10}$
yüzeyden 2 m yükseklikteki rüzgar hızı	$W_2=4.87W_z/(\ln(67.8.Z-5.42))$
gizli buharlaşma ısısı (MJ/kg)	*λ =2.45 MJ/kg*
psikrometrik sabit (kPa/°C)	*γ=0.00163 (Press/ λ)*
suyun yoğunluğu	*ρ=1000 kg/m^3*

2.4 Hidrolojik Simülasyonların Performans Ölçütleri

Bu çalışmada kurulan hidrolojik modelin (DSBM) performansı, model çıktılarının değerlendirilmesi yoluyla analiz edilmiştir. Modelin kalibrasyon sürecinde, hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) değerinin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir.

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{g,i}-y_{m,i})^2} \qquad (16)$$

Söz konusu eşitlikte $y_{g,i}$, i. zamandaki gözlenen akış değerini; $y_{m,i}$, model tarafından aynı zamandaki tahmini akış değerini; n ise toplam gözlem sayısını ifade etmektedir. Modelin açıklayıcılık düzeyini değerlendirmek amacıyla, bağımlı değişkendeki değişimin ne kadarının model tarafından açıklandığını gösteren determinasyon katsayısı (R^2) hesaplanmıştır (Moriasi, Arnold, Van Liew, Bigner, Harmel ve Veith, 2007).

Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (NS), hidroloji literatüründe yaygın olarak kullanılan bir performans ölçütüdür (Nash ve Sutcliffe, 1970). Bu katsayının hesaplanma yöntemi Denklem 17'de sunulmuştur. NS katsayısı ve diğer performans ölçütlerine ilişkin sınıflandırmalar ise Tablo 4'te verilmektedir (Moriasi vd., 2007).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{g,i}-y_{m,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_{g,t}-y_{m,ort})^2} \qquad (17)$$

Denklem 17'de yer alan $y_{m,ort}$ ifadesi, n adet gözlemden oluşan akış verisinin ortalamasını temsil etmektedir. Son olarak, model tarafından üretilen verilerin gözlemlenen değerlere göre sistematik olarak daha yüksek ya da daha düşük tahmin edilip edilmediğini belirlemek amacıyla yanlılık yüzdesi (PBIAS) hesaplanmış ve bu metrik Denklem 18'de sunulmuştur. İlgili performans kriterlerinin sınıflandırmasına Tablo 4'te yer verilmiştir (Moriasi vd., 2007).

$$PBIAS = [\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{g,i} - y_{m,i}) * (100)}{\sum_{i=1}^{n}(y_{g,i})}] \quad (18)$$

Tablo 4. NS katsayısı ve PBIAS için performans ölçütleri (Moriasi vd., 2007)

Performans Kriterleri	NS katsayısı	PBIAS (%)
Çok iyi	0.75 < NS ≤ 1.00	PBIAS < ±10
İyi	0.65 < NS ≤ 0.75	±10 ≤ PBIAS < ±15
Yeterli	0.50 < NS ≤ 0.65	±15 ≤ PBIAS < ±25
Yetersiz	NS ≤ 0.50	PBIAS ≥ ±25

3 Bulgular

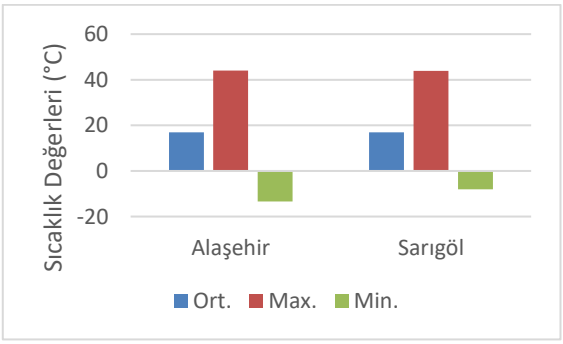
3.1 Sarıgöl Afşar Havzası'na Ait Hidro-meteorolojik Gözlem Verileri

Çalışma alanı sınırları içerisinde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) bağlı iki adet otomatik meteoroloji gözlem istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlara ilişkin temel bilgiler Tablo 5'te sunulmaktadır. Her iki istasyondan, T_{ort}, T_{max}, T_{min} ve P'ye ilişkin uzun dönemli meteorolojik veri setleri elde edilmiştir.

Tablo 5. Havzayı temsil eden meteoroloji istasyonları

İstasyon İsmi	İstasyon No	Kotu (m)
Sarıgöl	6143	225
Alaşehir	5974	189

1984–2010 yılları arasında havzada kaydedilen yıllık toplam yağış değerleri incelendiğinde, Sarıgöl ve Alaşehir meteoroloji istasyonlarına ait yıllık ortalama yağış miktarlarının sırasıyla 494.26 mm ve 410.47 mm olduğu belirlenmiştir. Barajın drenaj alanının 500 km²'den küçük olması nedeniyle, havza geneline düşen yağış miktarı aritmetik ortalama yöntemiyle hesaplanmıştır. Aynı döneme ait yıllık ortalama sıcaklık değerleri ise 17.36 °C ile 15.98 °C arasında değişmektedir. Uzun dönem T_{ort}, T_{min} ve T_{max} değerleri Şekil 4'te sunulmaktadır.

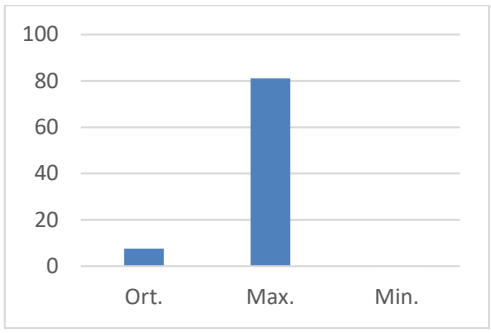


Şekil 4. Alaşehir ve Sarıgöl istasyonlarında gözlenen uzun dönem ortalama, maksimum ve minimum sıcaklık ortalamaları

Araştırmada, sağlıklı ve sürekli veri sağlayan, aynı zamanda baraj havzasını temsil etme özelliği taşıyan Uluderbent Akım Gözlem İstasyonu'na (AGİ) ait bilgiler Tablo 6'da sunulmuştur. Söz konusu istasyon, Devlet Su İşleri (DSİ) 2. Bölge Müdürlüğü'ne bağlı olup, 1984–2010 su yıllarına ait akım verileri TÜBİTAK tarafından desteklenen 114Y716 numaralı araştırma projesinden temin edilmiştir (Okkan, Tatlı ve Dalkılıç, 2016). Uluderbent AGİ'ye ait uzun dönem ortalama, minimum ve maksimum akım değerleri (mm) ise Şekil 5'te gösterilmektedir.

Tablo 6. Sarıgöl Afşar Barajı akımlarını temsil eden istasyon bilgileri

İstasyon No.	Akarsu İsmi	Yağış Alanı (km^2)	Yükselti (m)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
D05A036	Derbent	119.0	420	38.18	28.53



Şekil 5. Uzun dönem ortalama, maksimum ve minimum akım verileri (mm)

Mevsimlik ve yıllık ortalama akım değerleri Tablo 7'de sunulmaktadır. Elde edilen bulgulara göre, kış ve ilkbahar aylarında yağışların etkisiyle akım değerlerinin su potansiyeline katkısı oldukça yüksek düzeydedir. Buna karşılık, yaz ve sonbahar aylarında akım miktarlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir.

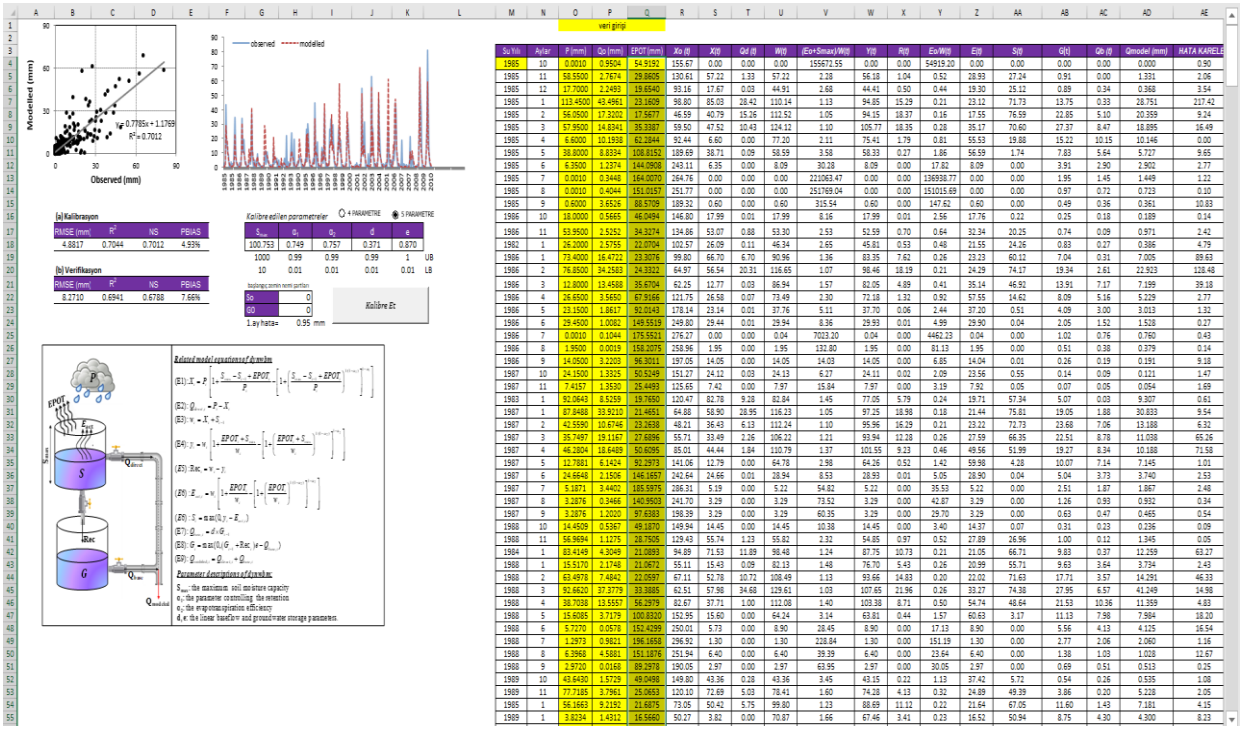
Tablo 7. Mevsimlik ve yıllık akımlara ait ortalamalar

İstasyon İsmi	Kış (mm)	İlkbahar (mm)	Yaz (mm)	Sonbahar (mm)	Yıllık (mm)
Uluderbent	13.44	12.24	1.38	1.90	7.28

3.2 Farklı EPOT Verilerinden Yararlanılarak Elde Edilen DSBM

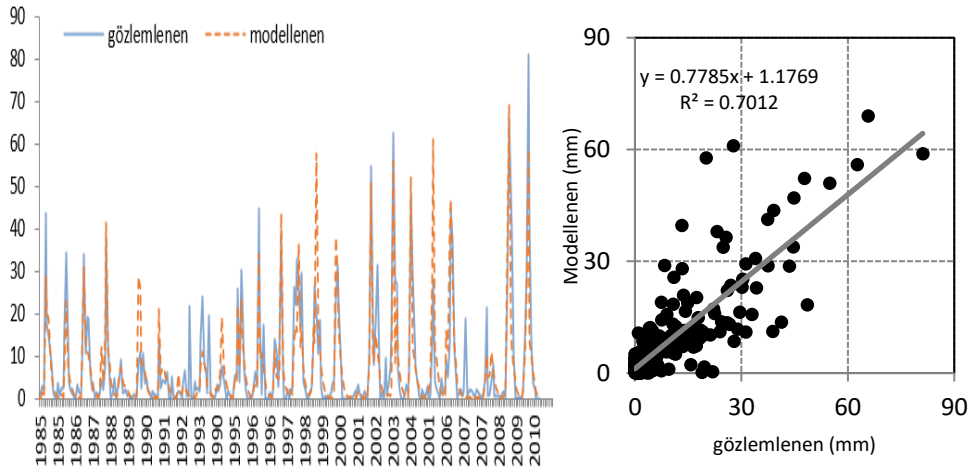
EPOT denklemlerinden elde edilen veriler, alansal yağış ve akım değerleri ile birlikte MS Excel tabanlı bir makro aracılığıyla DSBM dönüştürülmüştür (Şekil 6). Ersoy vd. (2022) çalışmasına benzer şekilde oluşturulan modeller, yeraltı suyu başlangıç depolama miktarı G(t=0) ve zemin nemi başlangıç değeri S(t=0) esas alınarak çalıştırılmış; her bir ay için su bütçesi bileşenleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu işlem tüm EPOT denklemleri için tekrarlanmış ve elde edilen EPOT tahminlerinin akım simülasyonları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Modelin başlangıç koşulları, simülasyonun ilk aylarında elde edilen sonuçların gözlemsel verilerle uyumlu olmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Modelleme sürecinde, Sarıgöl Afşar Barajı havzasına ait 1984–2010 su yılı verileri kullanılmış; ilk 13 yıllık dönem (1984–1997) modelin kalibrasyon aşamasında, kalan 13 yıllık dönem (1997–2010) ise doğrulama (verifikasyon) aşamasında değerlendirilmiştir.



Şekil 6. DSBM türetmek için yararlanılan makronun ara yüzü

Farklı EPOT eşitliklerinin yağış-akış modeli üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla tüm eşitlikler model üzerinde ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen model çıktıları çeşitli performans kriterlerine göre analiz edilmiştir. Ayrıca, gözlemlenen ve modellenen akım değerlerinin çizgi grafik üzerindeki uyumu incelenmiş; bu kapsamda eğilim doğrusu oluşturularak determinasyon katsayısı (R^2) hesaplanmıştır. Şekil 7'de, en yüksek uyumu sağlayan Hamon (Ham) denkleminin model sonuçlarına ait grafiksel karşılaştırmalar sunulmaktadır.



Şekil 7. Ham eşitliğine göre gözlemlenen ve modellenen akımların yıllar içindeki değişimi

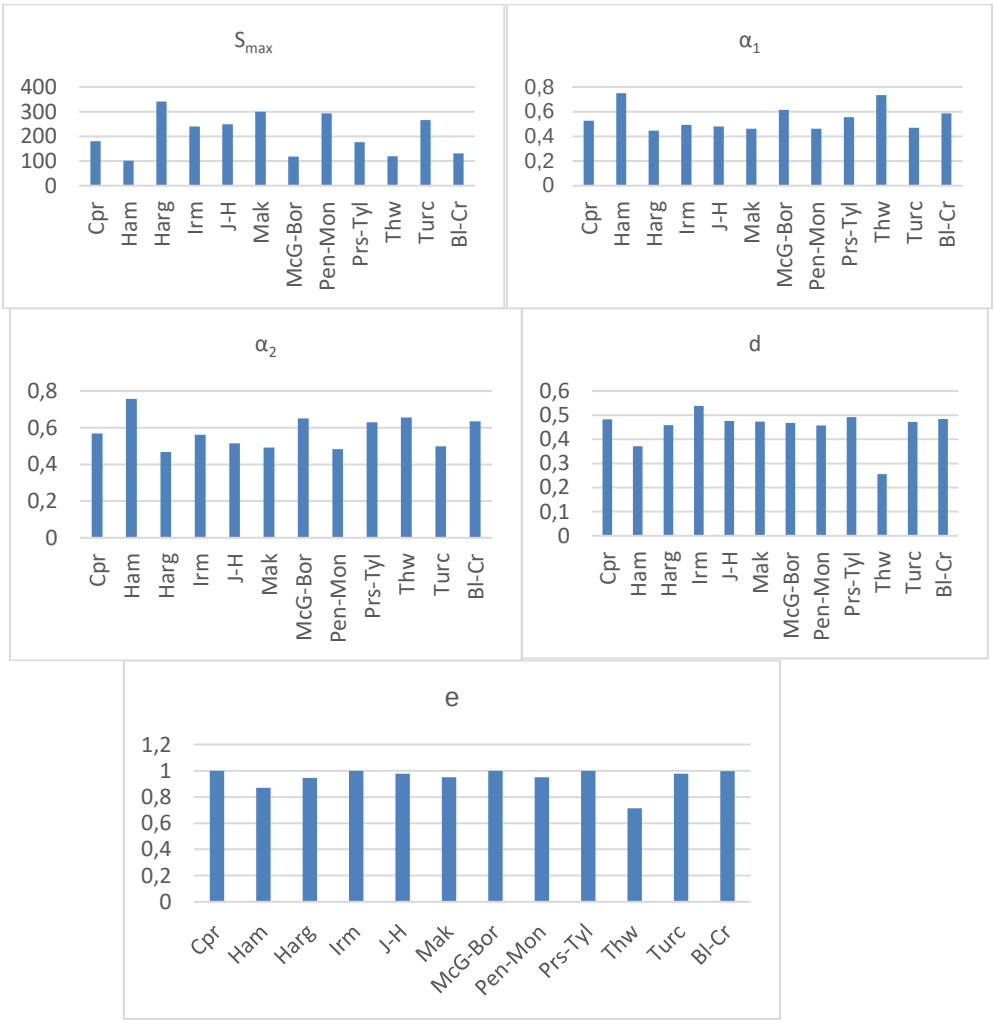
Kalibrasyon döneminde Hamon (Ham) denklemi ile kurulan modelin performans ölçütleri sırasıyla; R^2: 0.70, RMSE: 4.88 mm, PBIAS: %4.93 ve NS: 0.70 olarak hesaplanmıştır. Verifikasyon döneminde ise aynı denkleme ait performans değerleri R^2: 0.69, RMSE: 8.27 mm, PBIAS: %7.66 ve NS: 0.68 şeklinde elde edilmiştir (Tablo 8). Moriasi vd. (2007) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre, NS katsayısı dikkate alındığında Ham denklemiyle oluşturulan model hem kalibrasyon hem de verifikasyon dönemlerinde "iyi" performans düzeyinde yer almıştır. PBIAS kriterine göre ise Ham yöntemi her iki dönemde de "çok iyi" sınıfında değerlendirilmiştir. RMSE performans ölçütü açısından Ham denklemi, özellikle kalibrasyon döneminde en düşük hata değeri (4.88 mm) ile en başarılı sonuçları vermiştir. Benzer şekilde, R^2 değerine göre de Ham denklemi kalibrasyon sürecinde en yüksek korelasyonu sağlayan eşitlik olarak öne çıkmıştır.

EPOT yöntemlerinin performansını belirlemek amacıyla kullanılan NS, RMSE, R^2 ve PBIAS gibi kriterler, yalnızca bu çalışmayla sınırlı olmayıp farklı bölgelerde ve iklim koşullarında da yaygın biçimde kullanılmaktadır. Örneğin, Gao, Feng, Ouyang, Wang, Fisher, Adeli ve Jenkins (2017), Çin'in kurak bölgelerinde yaptığı çalışmada söz konusu kriterleri kullanarak Mak yönteminin FAO-56 Penman-Monteith'e göre oldukça başarılı sonuçlar verdiğini raporlamıştır. Benzer şekilde, Lang, Zheng, Shi, Liao, Ma, Wang, Chen ve Zhang (2017) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, Harg yöntemi yarı nemli bölgelerde güçlü performans göstermiştir. EPOT yöntemlerinin performansındaki bu farklılıkların; uygulandığı bölgenin iklimsel koşulları, meteorolojik veri yapısı ve modelleme yaklaşımına bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

Uluderbent Akım Gözlem İstasyonu için farklı EPOT girişleri kullanılarak kalibre edilen DSBM parametrelerine ait değerler Şekil 8'de sunulmaktadır. Kalibrasyon sonuçlarına göre, parametrelerin varyasyon katsayıları (C_v) üzerinden değerlendirildiğinde, toprak nemi depolama kapasitesinin üst sınır değeri havza genelinde %37'ye varan bir değişkenlik sergilemektedir. Yeraltı suyu depolama sistemine ait d ve ξ parametrelerinin varyasyon katsayıları ise sırasıyla %15.3 ve %8.4 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, yağışın doğrudan akışa dönüşümünü tanımlayan α_1 parametresinin C_v değeri %18.3; evapotranspirasyon etkinliğini temsil eden α_2 parametresinin C_v değeri ise %14.9 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, farklı EPOT denklemlerinden elde edilen tahminlerin su bütçesi bileşenleri ve dolayısıyla model performansı üzerinde kayda değer düzeyde etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 8. EPOT eşitliklerinin kalibrasyon ve verifikasyon dönemlerinin performansları

	Kalibrasyon				Verifikasyon			
Yöntem Adı	RMSE (mm)	R^2	NS	PBIAS(%)	RMSE (mm)	R^2	NS	PBIAS(%)
Cpr	5.89	0.57	0.56	-0.07	8.45	0.73	0.66	0.08
Ham	4.88	0.70	0.70	0.05	8.27	0.69	0.68	0.08
Harg	6.11	0.54	0.53	-0.10	9.17	0.71	0.61	0.08
Irm	5.96	0.56	0.55	-0.07	8.51	0.73	0.66	0.06
J-H	6.00	0.56	0.55	-0.08	8.82	0.72	0.63	0.08
Mak	6.07	0.55	0.54	-0.09	9.01	0.72	0.62	0.07
McG-Bor	5.73	0.59	0.59	-0.02	7.82	0.74	0.71	0.07
Pen-Mon	6.08	0.55	0.54	-0.09	9.07	0.71	0.61	0.08
Prs-Tyl	5.79	0.58	0.58	-0.03	7.94	0.76	0.70	0.09
Thw	4.75	0.72	0.72	0.03	8.53	0.67	0.66	0.09
Turc	6.05	0.55	0.54	-0.09	8.98	0.72	0.62	0.08
Bl-Cr	5.86	0.57	0.57	-0.03	7.93	0.74	0.70	0.04



Şekil 8. DSBM parametrelerinin farklı EPOT'lara göre değişim grafikleri

4 Sonuçlar

Kavramsal su bütçesi modellerinin başarımı, yalnızca yağış girdisine değil, aynı zamanda EPOT bileşenine de büyük ölçüde bağlıdır. Bu nedenle, özellikle kurak ve yarı kurak havzalarda, akış simülasyonu sürecinde hangi EPOT denkleminin kullanılacağı önemli bir araştırma konusu hâline

gelmiştir. Ancak bu konu, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır (Oudin vd., 2005a; 2005b; Kannan, White, Worall ve Whealan, 2007; Okkan ve Kiymaz, 2020).

Bu çalışmada, Sarıgöl Afşar Barajı Havzası için DSBM'ye girdi olarak sunulabilecek farklı EPOT denklemleri test edilmiştir. Çalışmanın amacı, bu modellerin karşılaştırmalı performansını değerlendirmek ve daha az meteorolojik veri gerektiren, pratik uygulamalarda kullanılabilecek alternatif denklemleri belirlemektir. DSBM'nin EPOT denklemlerine verdiği tepki, modelin doğrulama döneminde kullanılan çeşitli performans indeksleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Wang, Melesse ve Yang (2006) tarafından savunulanın aksine, farklı EPOT denklemlerinin su bütçesi modeli üzerindeki etkileri göz ardı edilemeyecek düzeydedir.

Modelleme süreci sonunda, sıcaklık tabanlı Ham denklemi, özellikle kalibrasyon ve doğrulama dönemlerinde elde ettiği yüksek performans kriterleri ile öne çıkmıştır. Söz konusu denklem, havzadaki hidrolojik model çıktılarında "iyi" sınıflamasına ulaşmayı başarmıştır. Ayrıca, Ham denkleminin, yine sıcaklık tabanlı bir yöntem olan Thw ile özellikle kalibrasyon döneminde benzer tepkiler verdiği görülmüştür. Okkan ve Kiymaz (2020), Ham yönteminin sınırlı meteorolojik veri gereksinimi nedeniyle ekonomik bir çözüm sunduğunu ve bölgedeki güneşlenme verisine erişimin sınırlı olması sebebiyle uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini belirtmiştir.

Literatürde çeşitli EPOT karşılaştırmaları bulunmakla birlikte, bu çalışmaların büyük kısmı sınırlı kapsamlıdır ve su bütçesinin tüm bileşenlerine yönelik bütüncül analizler nadirdir (Oudin vd., 2005b; Heydari vd., 2014). Ayrıca bu çalışmalar çoğunlukla genel model uygulamalarıyla sınırlı kalmakta, tarımsal faaliyetler açısından stratejik öneme sahip havzalarda, yerel gözlem verisine dayalı uygulamalı model değerlendirmelerine daha az yer verilmektedir.

Bu bağlamda, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde yer alan ve yarı kurak bir bölge olması nedeniyle su kaynaklarını etkin yönetiminin büyük önem taşıdığı Sarıgöl Afşar Baraj Havzası'nda yürütülen bu çalışma literatüre katkı sunduğu gibi, uygulama alanının özgünlüğü açısından da dikkat çekicidir.

Çalışmada kullanılan yaklaşım, iklim değişikliği, arazi kullanım değişiklikleri ve insan etkileri gibi dinamik süreçleri doğrudan içermemektedir. Bu nedenle model çıktıları yalnızca tarihsel gözlem verilerine dayalı olarak geçerlidir ve dışsal etkileri yansıtmaz. Ancak elde edilen bulgular, bu sınırlılıkları göz önünde bulundurularak, örneğin gelecekteki senaryoların modellenmesinde veya iklim değişikliği etkilerini değerlendiren daha bütüncül modellerin kalibrasyonunda yardımcı bir temel veri seti olarak değerlendirilebilir.

Buna ek olarak, çalışma kapsamında test edilen EPOT yöntemlerinin performanslarının karşılaştırılmasıyla, özellikle veri kısıtlı yarı kurak bölgelerde su bütçesi analizlerine yönelik pratik bir referans çerçevesi sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, tarımsal su yönetim stratejilerinin belirlenmesi ve yerel ölçekli su kaynakları planlamasına katkı sağlayabilecek nitelikte olduğu düşünülmektedir.

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

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO.

Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., & Jensen, M. (2005*).* The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI.

Anonim. (2022). Sarıgöl Afşar Barajı. https://tr.wikipedia.org/wiki/Af%C5%9Far_Baraj%C4%B1 (Erişim tarihi: 01.04.2022)

Beyazgül, M., Kayam, Y., & Engelsman, F. (2000). Estimation methods for crop water requirements in the Gediz Basin of western Turkey. *Journal of Hydrology, 229*(1–2), 19–26.

Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Soil Conservation Service.

Bogawski, P., & Bednorz, E. (2014). Comparison and validation of selected evapotranspiration models for conditions in Poland (Central Europe). *Water Resources Management, 28*(14), 5021–5038.

Budyko, M. I. (1958). The heat balance of the Earth's surface. U.S. Department of Commerce.

Caprio, J. M. (1974). The solar thermal unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration. In *Phenology and seasonality modeling*.

Ersoy, Z. B., Okkan, U., & Fıstıkoğlu, O. (2022). Dinamik su bütçesi modeline destek vektör regresyonu entegrasyonu. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27*(1), 237–250.

Fıstıkoğlu, O., & Harmancıoğlu, N. (2001). Yukarı Gediz Havzasında aylık su bütçesi modeli uygulaması. *III. Ulusal Hidroloji Kongresi*, İzmir.

Fu, B. P. (1981). On the calculation of evaporation from land surface. *Science Atmosfer Sinica*, 23, 23–31.

Gao, F., Feng, G., Ouyang, Y., Wang, H., Fisher, D., Adeli, A., & Jenkins, J. (2017). Evaluation of reference evapotranspiration methods in arid, semi-arid and humid regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 1–18.

Gavilan, P., Berengena, J., & Allen, R. G. (2007). Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: Impact on Penman–Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agricultural Water Management, 89*(3), 275–286.

Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE), 87*(3), 107–120.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture, 1*(2), 96–99.

Heydari, M., Aghamajidi, R., Beygipoor, G., & Heydari, M. (2014). Comparison and evaluation of 38 equations for estimating reference evapotranspiration in an arid region. *Fresenius Environmental Bulletin, 23*(8A), 1985–1996.

Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129*(5), 336–347.

Jain, S. K., Nayak, P. C., & Sudheer, K. P. (2008). Models for estimating evapotranspiration using artificial neural networks and their physical interpretation. *Hydrological Processes, 22*(13), 2225–2234.

Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89*(1), 15–41.

Kannan, N., White, S., Worrall, F., & Whealan, M. (2007). Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. *Journal of Hydrology, 332*(3–4), 456–466.

Kıymaz, H. (2018). Kavramsal hidrolojik modellere uygun potansiyel evapotranspirasyon eşitliklerinin araştırılması (Yüksek lisans tezi).

Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., & Zhang, M. (2017). A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water, 9*, 734.

Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineering, 11*(3), 277–288.

McGuinness, J. L., & Bordne, E. F. (1972). A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. USDA.

Milly, P. C. D. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research, 30*, 2143–2156.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and the environment. In *The state and movement of water in living organisms* (pp. 205–234). Cambridge University Press.

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.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10*(3), 282–290.

Noori, N., & Kalin, L. (2016). Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology, 533*.

Okkan, U., & Fistikoglu, O. (2014). Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and the hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology, 117*(1).

Okkan, U. (2015). Dinamik su bütçesi modeli. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17*(1), 70–82.

Okkan, U. & Kırdemir, U. (2016). Budyko yaklaşımına dayanan bir su bütçesi modeli ve parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile kalibrasyonu. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2*(1), 1–10.

Okkan, U., Tatlı, H., & Dalkılıç, H. Y. (2016). İklim değişikliği senaryoları altında gelecekte sulama ve içme suyu yeterliliğinin irdelenmesi: Gediz Havzası örneği (TÜBİTAK Proje No. 114Y716, Final Raporu).

Okkan, U., & Gedik, N. (2018). Evaluation of population-based evolutionary optimization algorithms in conceptual hydrological model calibration. In *Proceedings of the 4th International Conference on Water Resources and Wetlands* (Romania).

Okkan, U. & Kirdemir, U. (2018). Investigation of the behaviour of an agricultural-operated dam reservoir under RCP scenarios of AR5-IPCC. *Water Resources Management, 32*(8), 2847–2866.

Okkan, U. & Kirdemir, U. (2020). Towards a hybrid algorithm for the robust calibration of rainfall–runoff models. *Journal of Hydroinformatics, 22*(4), 876–899.

Okkan, U. & Kiymaz, H. (2020). Questioning of empirically derived and locally calibrated potential evapotranspiration equations for a lumped water balance model. *Water Supply, 20*(3), 1141–1156.

Okkan, U., Ersoy, Z. B., Kumanlioglu, A. A., & Fistikoglu, O. (2021). Embedding machine learning techniques into a conceptual model to improve monthly runoff simulation: A nested hybrid rainfall–runoff modeling. *Journal of Hydrology, 598*, 126433.

Oudin, L., Michel, C., & Anctil, F. (2005a). Which potential evapotranspiration input for lumped rainfall–runoff models? Part 1. *Journal of Hydrology, 303*(1–4), 275–289.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005b). Which potential evapotranspiration input for lumped rainfall–runoff models? Part 2. *Journal of Hydrology, 303*(1–4), 290–306.

Özkul, S. (2009). Assessment of climate change effects in Aegean river basins: The case of Gediz and Büyük Menderes basins. *Climatic Change, 97*(1–2), 253–283.

Pandey, P. K., Dabral, P. P., & Pandey, V. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research, 4*(1), 52–63.

Paturel, J. E., Servat, E., & Vassiliadis, A. (1995). Sensitivity of conceptual rainfall–runoff algorithms to errors in input data: Case of the GR2M model. *Journal of Hydrology, 168*(1–4), 111–125.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A, 193*, 120–145.

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review, 100*(2), 81–92.

Tabari, H., Grismer, M. E., & Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science, 31*(2), 107–117.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Soil Science, 66*(1), 77–93.

Turc, L. (1961). Water requirements assessment of irrigation: Potential evapotranspiration. *Annales Agronomiques, 12*, 13–49.

Yener, H., & Ongun, A. R. (2017). Sarıgöl Ovası yer altı su kaynaklarının sulama amaçlı kalitesinin değerlendirilmesi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 4*(3), 281–287.

Wang, X., Melesse, A. M., & Yang, W. (2006). Influences of potential evapotranspiration estimation methods on SWAT's hydrologic simulation in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the ASABE, 69*(6), 1755–1771.

Xu, C., & Singh, V. P. (1998). Dependence of evaporation on meteorological variables at different time scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrological Processes, 12*(3), 429–442.

Xu, C., & Singh, V. P. (2000). Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes, 14*(2), 339–349.

Xu, C., & Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes, 15*(2), 305–319.

Xu, C., & Singh, V. P. (2002). Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management, 16*(3), 197–219.

Xystrakis, F., & Matzarakis, A. (2011). Evaluation of 13 empirical reference potential evapotranspiration equations on the island of Crete. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 137*(4), 211–222.

Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research, 37*, 701–708.

Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y. Q., & Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework. *Journal of Hydrology, 360*(1–4), 117–131.

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147, p26-38 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p26-38

Araştırma Makalesi / Research Article

İnklinometre Yöntemi ile Kralkızı-Dicle P-3 Pompaj Sulaması (Diyarbakır) İletim Kanalında Meydana Gelen Kütle Hareketlerinin Karakterizasyonunun Belirlenmesi

Determination of the Characterization of Mass Movements Occurring in the Kralkızı–Dicle P-3 Pumped Irrigation Transmission Canal (Diyarbakır) Using the Inclinometer Method

Hayrullah YÜREKLİ[1*], Veysi KANAT[2], Erhan HEKİMHANOĞLU[2], Kübra GÖLBAŞI[2], Cemal YILDIZ[2], Ayhan KOÇBAY[2]

[1]Devlet Su İşleri (DSİ) 10. Bölge Müdürlüğü, Diyarbakır
[2]Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler Dairesi Başkanlığı, Ankara

**Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: hayrullahyurekli@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 12.08.2025, Düzeltme (Revised): 07.01.2026, Kabul (Accepted): 12.01.2026

ÖZ

Bu çalışmada, jeoteknik araştırmalarda yaygın olarak kullanılan bir deplasman izleme tekniği olan inklinometre yöntemi tanıtılmış ve yöntem saha uygulaması üzerinden değerlendirilmiştir. İnklinometre ölçümleri, zemin ve kaya kütlelerinde meydana gelen yatay deplasmanların yüksek hassasiyetle belirlenmesine olanak sağlayarak kayma yüzeylerinin derinliklerinin, hareket yönlerinin ve deplasman hızlarının ortaya konulmasını mümkün kılmaktadır. "Kralkızı–Dicle P-3 Pompaj Sulaması İletim Kanalı" sahasında yürütülen jeoteknik çalışmalar kapsamında açılan inklinometre kuyularından, yağışlı ve kurak dönemleri kapsayacak şekilde düzenli aralıklarla ölçümler alınmış ve elde edilen veriler analiz edilerek heyelanlı bölgenin zemin davranışı detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Bulgular, kayma hareketlerinin özellikle Şelmo Formasyonunun ayrışmış kil–silt seviyelerinde yoğunlaştığını göstermiş ve proje kapsamında uygulanacak mühendislik önlemlerinin belirlenmesine önemli katkı sağlamıştır. Genel olarak çalışma, büyük ölçekli sulama projelerinde inklinometre ölçümlerinin heyelan izleme ve şev duraylılığı analizlerinde etkili bir izleme yöntemi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnklinometre, Jeoteknik Ölçüm, Heyelan, Şev Duraylılığı, Kralkızı-Dicle Pompaj Sulaması

ABSTRACT

In this study, the inclinometer method, which is a displacement monitoring technique widely used in geotechnical investigations, is introduced and evaluated through a field application. Inclinometer measurements enable the high-precision determination of horizontal displacements occurring within soil and rock masses, thereby allowing the identification of the depths, directions, and rates of shear movements. Periodic measurements were obtained from inclinometer boreholes drilled within the "Kralkızı–Dicle P-3 Pump Irrigation Conveyance Channel" project site to represent both wet and dry seasonal conditions, and the collected data were analyzed to comprehensively assess the ground deformation behavior of the landslide-prone area. The findings indicate that shear movements are predominantly concentrated within the weathered clay–silt layers of the Şelmo Formation and have played a significant role in defining the engineering measures to be implemented for the project. Overall, the study demonstrates that inclinometer measurements can serve as an effective monitoring method in landslide monitoring and slope stability analyses for large-scale irrigation projects.

Keywords*:* Inclinometer, Geotechnical Monitoring, Landslide, Slope Stability, Kralkızı-Dicle Pump Irrigation

1 İnklinometre Cihazı ve Genel Özellikleri

İnklinometre, sondaj kuyularına yerleştirilen özel profilli borular içerisindeki yatay ve düşey sapmaları ölçerek zeminde meydana gelen deformasyonların izlenmesini sağlayan jeoteknik bir ölçüm sistemidir. Bu yöntem sayesinde özellikle heyelan bölgelerinde kayma yüzeylerinin derinliği, yer değiştirme miktarı ve hareket yönü belirlenebilmektedir (Mesutoğlu, 2013). Gözle tespit edilemeyecek düzeydeki küçük yer değiştirmelerin ölçülmesine olanak tanıması nedeniyle inklinometre ölçümleri, jeoteknik mühendisliği uygulamalarında güvenilir deformasyon izleme teknikleri arasında önemli bir yere sahiptir (Öztürk & Toprak, 2016). Doğru şekilde uygulandığında, zemin hareketlerinin izlenmesi ve olası kayma yüzeylerinin konumunun belirlenmesi açısından kritik bilgiler sunarak heyelan riski altındaki alanlarda mühendislik tasarımına temel oluşturmaktadır.

1.1 İnklinometre Cihazı ve Bileşenleri

İnklinometre sistemi, zemin ve kaya kütlelerindeki yatay deformasyonları belirlemek amacıyla kullanılan ve birbirini tamamlayan üç temel bileşenden oluşan bir ölçüm düzeneğidir (Şekil 1). Sistemin merkezinde yer alan algılayıcı sonda, özel profilli inklinometre borusunun (ABS) olukları (yivleri) boyunca kontrollü bir şekilde hareket ederek iki eksendeki eğim sapmalarını yüksek hassasiyetle ölçer. Bu eğim değerleri, zemindeki potansiyel kayma yüzeyleri boyunca oluşan yer değiştirmelerin belirlenmesine olanak sağlar. Sonda tarafından üretilen veriler, okuma ünitesi tarafından kaydedilir ve işlenerek kullanıcıya sayısal veri seti olarak sunulur. Ölçüm sürecinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi için sonda ile okuma ünitesini bağlayan ölçekli kablo kullanılır; bu kablo üzerinde yer alan derinlik işaretleri, her ölçümün hangi seviyede alındığının kesin olarak belirlenmesine imkân tanır. Bu bileşenlerin birlikte çalışması sayesinde sondaj kuyusu boyunca deformasyon profili güvenilir bir şekilde oluşturulmakta ve zaman içindeki zemin davranışı hassas biçimde izlenebilmektedir.



Şekil 1. İnklinometre cihazı bileşenleri (ASTM D6230, 2013)

1.2 İnklinometre Ölçümlerinin Uygulanması

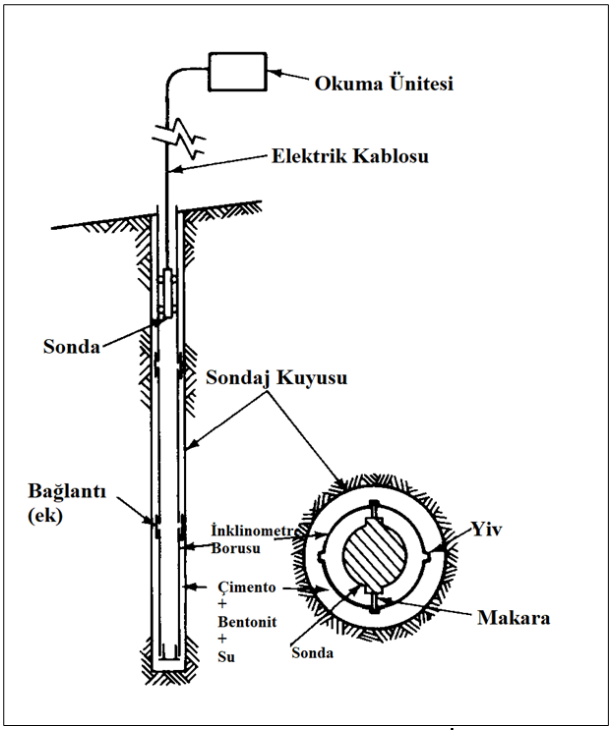
İnklinometre ölçümlerinin uygulanabilmesi için öncelikle yatay deformasyonun meydana gelmesinin beklendiği bölgede bir sondaj kuyusu açılır. Uygulamada kuyular genellikle 101 mm çapında açılmakta ve içerisine 70 mm dış çapa sahip inklinometre borusu yerleştirilmektedir. Şekil 2'de gösterilen inklinometre borusu, açılan kuyunun içerisine yerleştirilir ve Şekil 3'te görüldüğü üzere borunun sondaj duvarına aderansının sağlanması amacıyla kuyu enjeksiyon harcı ile doldurularak boru stabil hale getirilir. Bağlantı, sudan etkilenmeyen ve su/enjeksiyon girişini engelleyen kimyasal bağlayıcı, perçinleme ve bantlama ile gerçekleştirilir. Standart düşey inklinometre kuyusu kullanımı halinde su, çimento ve bentonit karışımından oluşan kuyu enjeksiyonu ve ağız kısmı koruması sonrasında, priz evresini takiben ölçüme hazır hale gelir. Ölçüm aşamasında sonda, boru üzerindeki oluklar boyunca belirli okuma aralıklarıyla (genellikle 0,5 m) aşağıdan yukarıya doğru ilerletilir ve her konumda iki eksendeki (x ve y) eğim bileşenleri sensörler aracılığıyla kaydedilir (Long,2001). Sonda tarafından elde

edilen eğim verileri, ölçekli kablo üzerinden yüzeye iletilerek okuma ünitesi tarafından sayısal forma dönüştürülür ve yatay yer değiştirme analizlerinde kullanılmak üzere kayıt altına alınır.



Şekil 2. İnklinometre Boruları

İnklinometre uygulamalarında ilk ölçüm referans kabul edilir; daha sonraki ölçümler bu referans setiyle karşılaştırılarak zamana bağlı deplasman profili oluşturulur (Mikkelsen, 2003). Bu analizler sonucunda sahadaki potansiyel kayma yüzeylerinin derinliği, deformasyon zonları ve hâkim deformasyon mekanizmaları güvenilir biçimde ortaya konulmaktadır.



Şekil 3. İnklinometre Borusunun Sondaj Kuyusuna Yerleştirilmesi ve Kuyu İçindeki Kurulumun Şematik Gösterimi

1.3 Kullanım Alanları

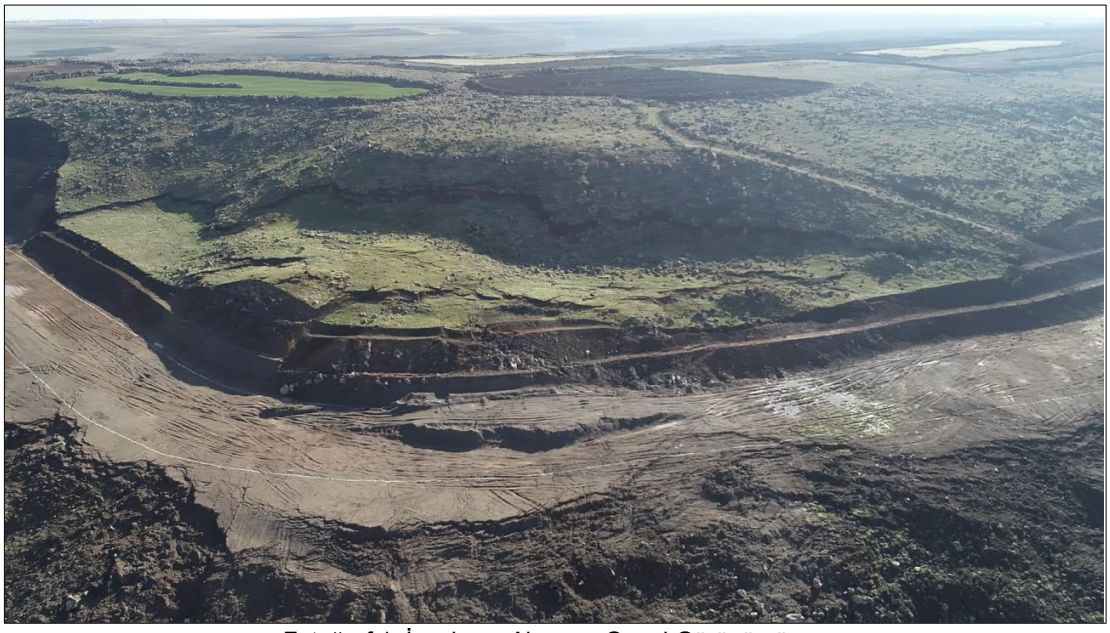
İnklinometre yöntemi, zemin ve kaya kütlelerindeki yatay deformasyonların izlenmesine olanak tanıması nedeniyle jeoteknik mühendisliği uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Başlıca kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir:

- Heyelan izleme: Potansiyel kayma yüzeylerinin derinliğinin belirlenmesi ile kütle hareketlerinin yön ve hızının zaman içinde izlenmesi.
- Şev stabilitesi değerlendirmeleri: Karayolu, demiryolu ve diğer yamaç mühendisliği uygulamalarında şev hareketlerinin kontrolü ve duraylılığın izlenmesi.
- Baraj ve dolgu yapıları: Dolgu barajlarda ve büyük hacimli dolgular üzerinde meydana gelebilecek yatay deplasmanların tespiti ve izlenmesi.
- İstinat yapıları ve kazıklı temel sistemleri: Yapıların yanal yer değiştirmelerinin belirlenmesi ve destek sistemlerinin davranışının değerlendirilmesi.
- Tünel ve metro inşaatları: Derin kazılar sırasında zemin deformasyonlarının, yatay deplasmanların ve yüzey oturmalarının izlenmesi.

1.4 Avantajları

İnklinometre yöntemi, zemin ve kaya kütlelerinde meydana gelen çok küçük yatay deformasyonların dahi yüksek hassasiyetle ölçülebilmesini sağlayan bir tekniktir. Uzun süreli izleme yapmaya uygun olması sayesinde hareketin zamana bağlı gelişimi, hız değişimleri ve olası eğilimleri güvenilir şekilde belirlenebilir. Böylece hem ani hem de yavaş gelişen kütle hareketleri hakkında detaylı bilgi elde edilir. Bununla birlikte, sağlıklı sonuçlar elde edilebilmesi için ölçümlerin doğru yapılması, inklinometre borusunun kuyuda düzgün ve eksen kaçıklığı oluşturmayacak şekilde yerleştirilmesi ve sondaj kuyusunun uygun şekilde hazırlanması kritik öneme sahiptir. Bu aşamalardaki hatalar ölçüm doğruluğunu olumsuz etkileyebilmekte ve yorumlama sürecinde yanlış sonuçlara yol açabilmektedir.

2 Kralkızı-Dicle P-3 Pompaj Sulaması İletim Kanalı Heyelanı



Fotoğraf 1. İnceleme Alanının Genel Görünümü

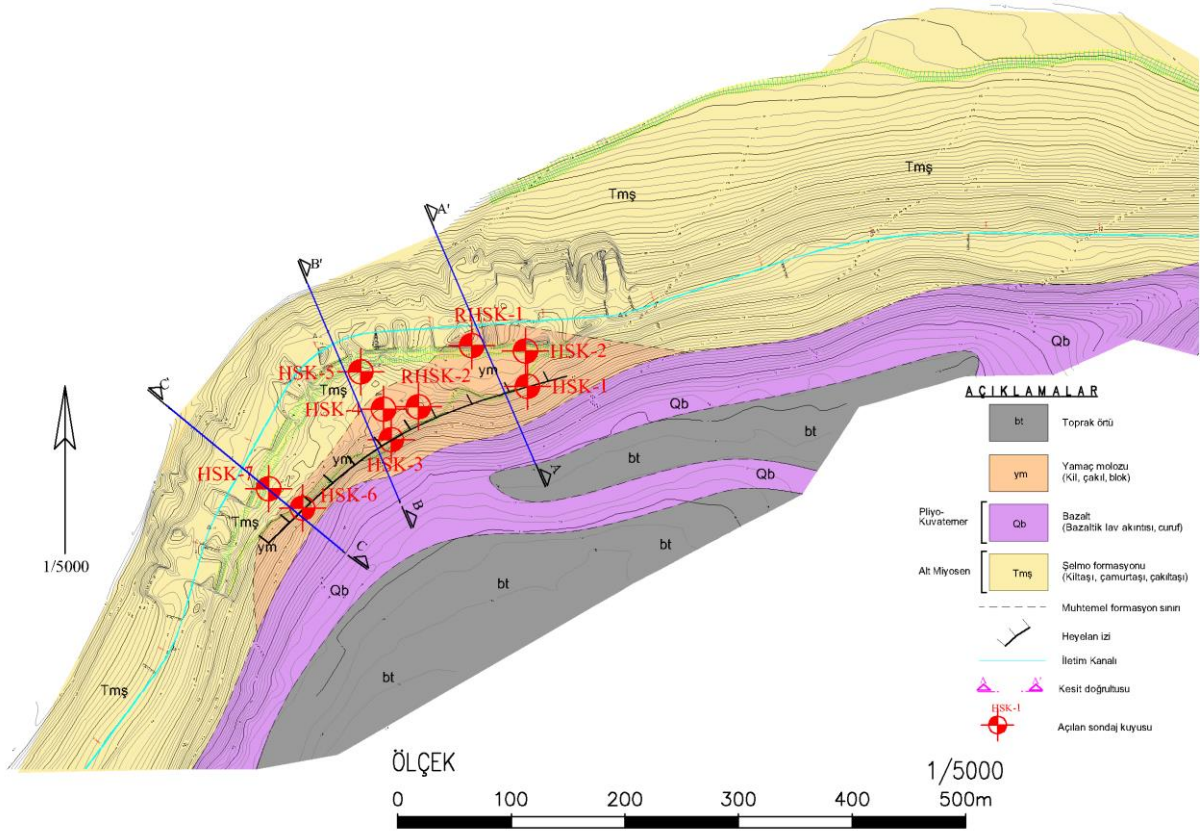
Bu örnek çalışma, Diyarbakır ili Bağlar ilçesi sınırları içerisinde yürütülen Kralkızı–Dicle P-3 Pompaj Sulaması İletim Kanalı, Pompa İstasyonu ve Ana Kanal Yapımı işine aittir. İnceleme alanı, iletim kanalının Km: 4+285.00–4+790.00 kesimleri arasında yer alan ve Şekil 4'te genel görünümü verilen heyelanlı bölgeyi kapsamaktadır. Çalışmanın temel amacı; bu güzergâhta gelişen kütle hareketlerinin karakterizasyonu, olası kayma yüzeylerinin derinliklerinin belirlenmesi ve söz konusu hareketlerin iletim kanalının stabilite durumuna etkilerinin ortaya konulmasıdır.

Sahada gerçekleştirilen jeoteknik çalışmalar kapsamında açılan inklinometre kuyularından, yağışlı ve kurak dönemleri temsil edecek şekilde belirli aralıklarla ölçümler alınmış; elde edilen veriler değerlendirilerek heyelanlı alanın zemin davranışları ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Ayrıca inceleme sahasına ait 1/5.000 ölçekli haritalar kullanılarak çalışma güzergâhının jeoloji haritası (Şekil 5) ile ilgili jeolojik kesitler hazırlanmış ve bu veriler arazi gözlemleri ile bütüncül olarak değerlendirilmiştir (DSİ, 2025).

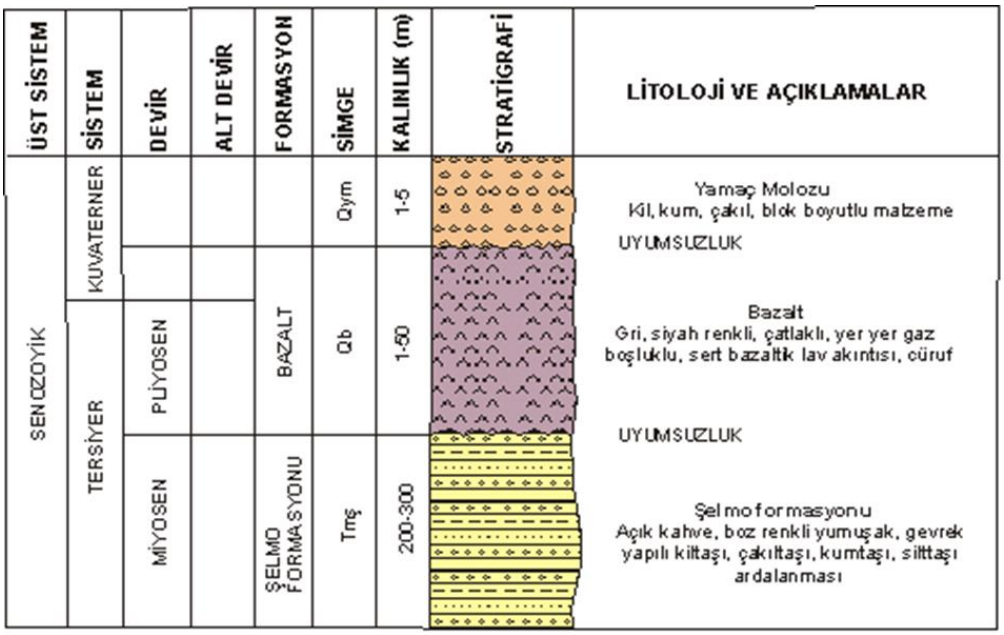
2.1 Genel Jeoloji

İnceleme alanında Pliyo-Kuvaterner yaşlı bazaltlar ile Üst Miyosen yaşlı kiltaşı, çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşı ardalanmasından oluşan Şelmo Formasyonu yayılım göstermektedir. Çalışma sahasının genel jeolojik konumu ve litolojik dağılımı Şekil 5'te sunulan Genel Jeoloji Haritası üzerinde ayrıntılı olarak görülmektedir.

Alanı oluşturan bazaltlar gri-siyah renkli, çatlaklı, yer yer gaz boşlukları içeren ve oldukça sağlam yapılı bir karakter sergilemektedir. Buna karşın Şelmo Formasyonunu oluşturan birimler; yumuşak–gevrek yapı, ardalanmalı doku, yer yer zayıf çimentolanma ve dağılganlık gibi mühendislik jeolojisi açısından zayıf davranışlar göstermektedir. Birimlerin düşeydeki konumu ve stratigrafik ilişkileri ise Şekil 6'da verilen stratigrafik kesitte sunulmuştur.



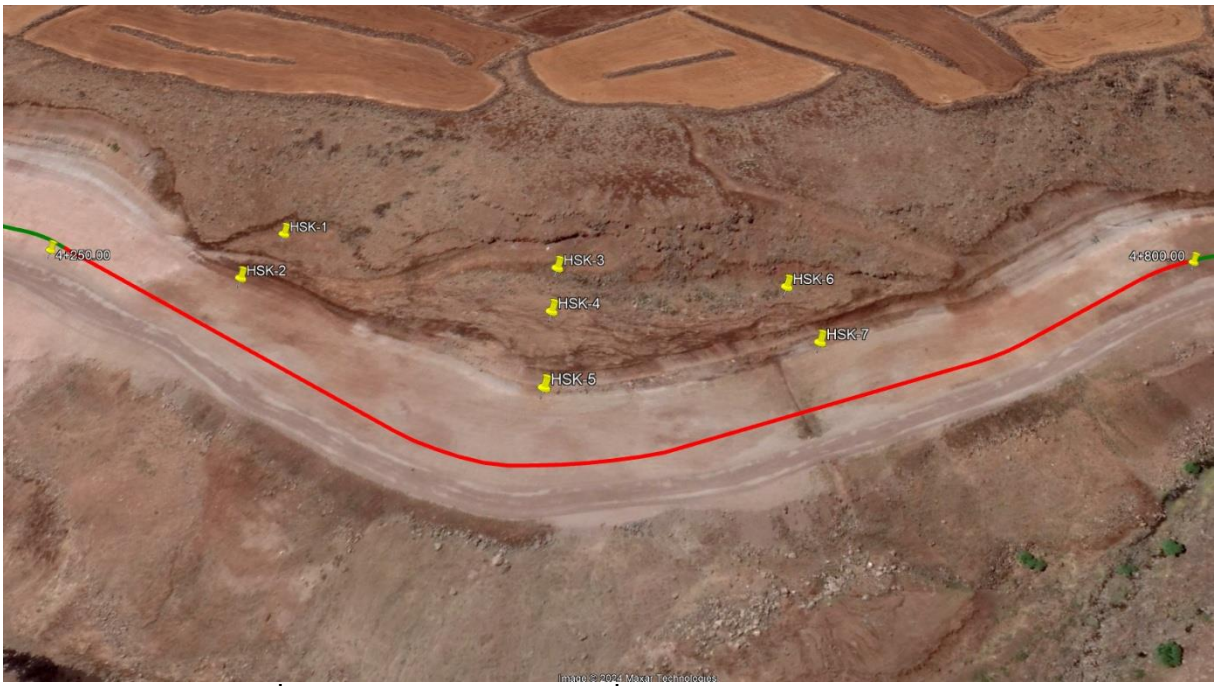
Şekil 4. İnceleme Alanı Genel Jeoloji Haritası



Şekil 5. İnceleme Alanı ve Çevresinin Stratigrafik Kesiti (Ölçeksizdir)

2.2 Sondaj ve İnklinometre Çalışmaları

Heyelanlı kesimde toplam 9 adet, 433 m derinliğinde sondaj kuyusu açılmış olup bu kuyuların 7'si inklinometre ölçümleri için tesis edilmiştir. İnceleme alanındaki sondaj ve inklinometre kuyularının güzergâh boyunca dağılımı Fotoğraf 1'de toplu olarak gösterilmektedir. Km: 4+285.00–4+790.00 arasını kapsayan bu kesimde yer alan HSK-1, HSK-2, RHSK-1, RHSK-2, HSK-3, HSK-4, HSK-5, HSK-6 ve HSK-7 numaralı kuyuların konumları söz konusu fotoğrafta bütüncül biçimde sunulmuştur. Açılan 7 inklinometre kuyusunda referans ölçüm dâhil düzenli aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiş; bunlardan 5 kuyuda kayda değer yatay deplasmanlar izlenmiştir. Bu ölçümler sonucunda, söz konusu 5 kuyuda farklı derinliklerde kayma yüzeyleri belirlenmiş ve heyelan kütlesinin zemin deformasyon karakteristikleri detaylı olarak değerlendirilmiştir.



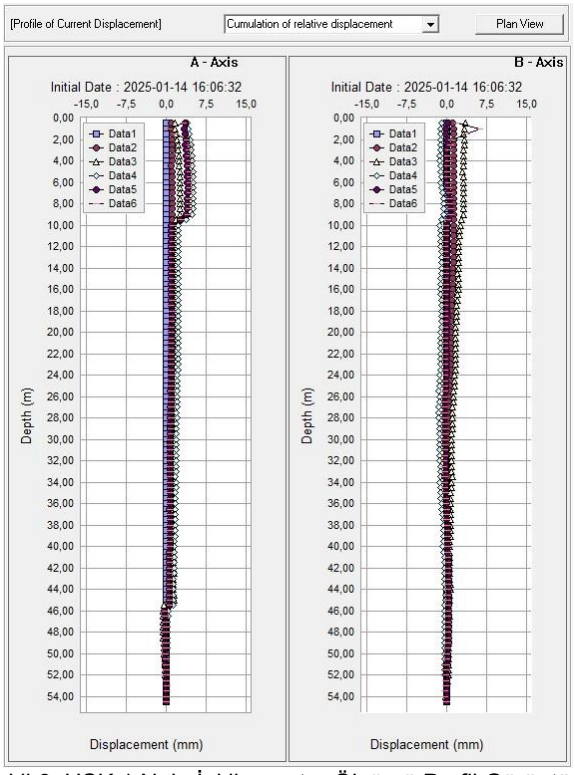
Fotoğraf 2. İnceleme Alanındaki Sondaj ve İnklinometre Kuyularının Genel Görünümü

2.3. İnklinometre Ölçüm Sonuçları

İnklinometre kuyularından elde edilen yatay deplasman profilleri, çalışma alanındaki kayma mekanizmasının derinliği, konumu ve deformasyon karakterini doğrudan ortaya koymaktadır. Söz konusu alanda, yerleştirilen inklinometre kuyularından yaklaşık 25 günde bir okumalar alınmış ve toplamda 6 okuma değeri bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Bu bölümde her bir kuyudan elde edilen ölçüm sonuçları özetlenmiştir.

2.3.1 HSK-1 Kuyusu

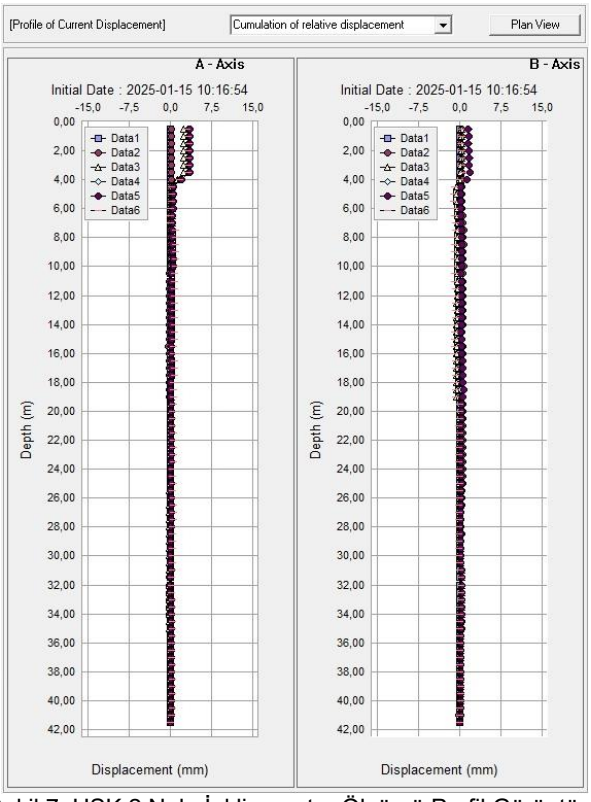
HSK-1 nolu kuyuda inklinometre sondası 54 m derinliğe kadar indirilmiş olup, ölçümler yaklaşık 9,5 m derinlikte hareketin başladığını göstermektedir. Bu derinlikten itibaren toplam yatay deplasman 4,8 mm'ye ulaşmış ve kayma hızı yaklaşık 0,016 mm/gün olarak belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. HSK 1 Nolu İnklinometre Ölçümü Profil Görüntüsü

2.3.2 HSK-2 Kuyusu

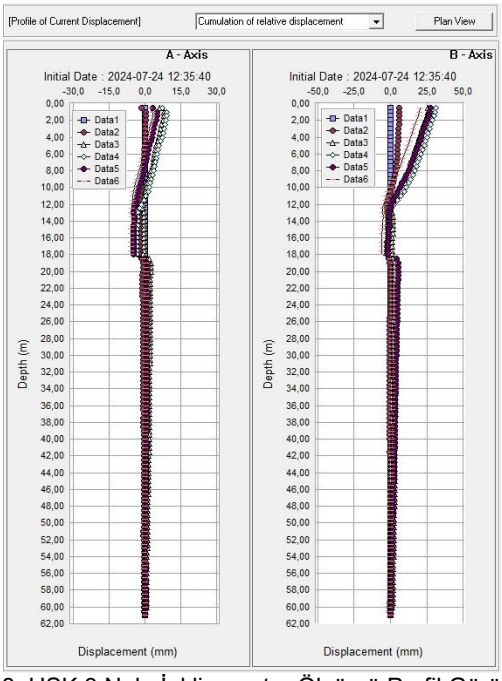
HSK-2 nolu kuyuda 41 m derinliğe kadar yapılan ölçümler, kaymanın yaklaşık 3,5–4,0 m derinlikte başladığını ve toplam yatay deplasmanın 3,1 mm olduğunu göstermektedir. Kayma hızı yaklaşık 0,01 mm/gün'dür. Bu davranış Şekil 8'de sunulan deplasman eğrilerinde açıkça görülmektedir.



Şekil 7. HSK 2 Nolu İnklinometre Ölçümü Profil Görüntüsü

2.3.3 HSK-3 Kuyusu

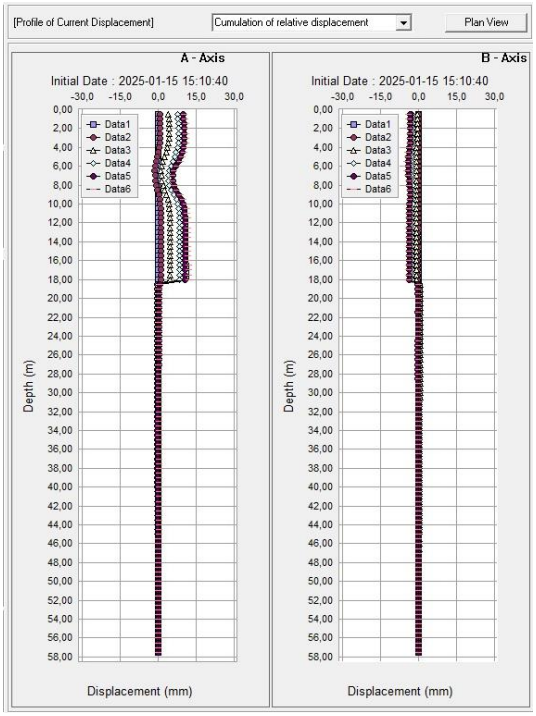
HSK-3 nolu kuyuda sondaj 60,5 m derinliğe kadar indirilmiş olup, ölçümler yaklaşık 18 m derinlikte belirgin bir kayma zonu olduğunu göstermektedir. Bu seviyede yatay deplasman 7,2 mm, hareket hızı ise 0,052 mm/gün'dür. Şekil 9, bu kayma yüzeyinin konumunu ve deformasyon karakterini net biçimde göstermektedir.



Şekil 8. HSK 3 Nolu İnklinometre Ölçümü Profil Görüntüsü

2.3.4 HSK-4 Kuyusu

HSK-4 nolu kuyuda yaklaşık 18 m derinlikte 13,8 mm'ye ulaşan belirgin bir yatay deformasyon zonu tanımlanmıştır. Kayma hızı 0,082 mm/gün olarak belirlenmiştir. Şekil 10'da verilen profil, çalışma alanındaki kayma mekanizmasının tipik bir örneğini temsil etmektedir.



Şekil 9. HSK 4 Nolu İnklinometre Ölçümü Profil Görüntüsü

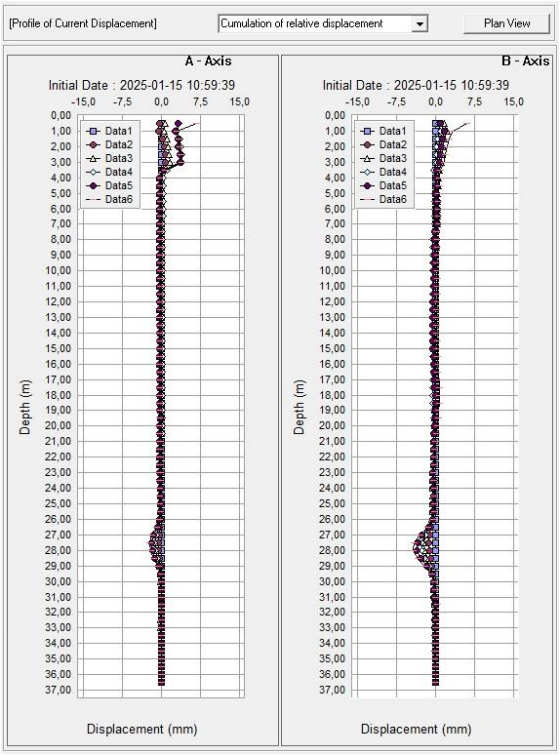
2.3.5 HSK-7 Kuyusu

HSK-7 nolu kuyuda 29 m seviyelerinde düzensiz (rezonans niteliğinde) ölçüm davranışı görülmüş olup bunun muhtemel nedeni sondaj suyu fazlalığı, yıkıntı oluşumu veya yetersiz enjeksiyon dolgusudur. Güvenilir veriler incelendiğinde kaymanın yaklaşık 3 m seviyesinde başladığı, toplam yatay deplasmanın 5,1 mm, kayma hızının ise 0,029 mm/gün olduğu belirlenmiştir. Şekil 11'de bu davranışın detayları gösterilmektedir.

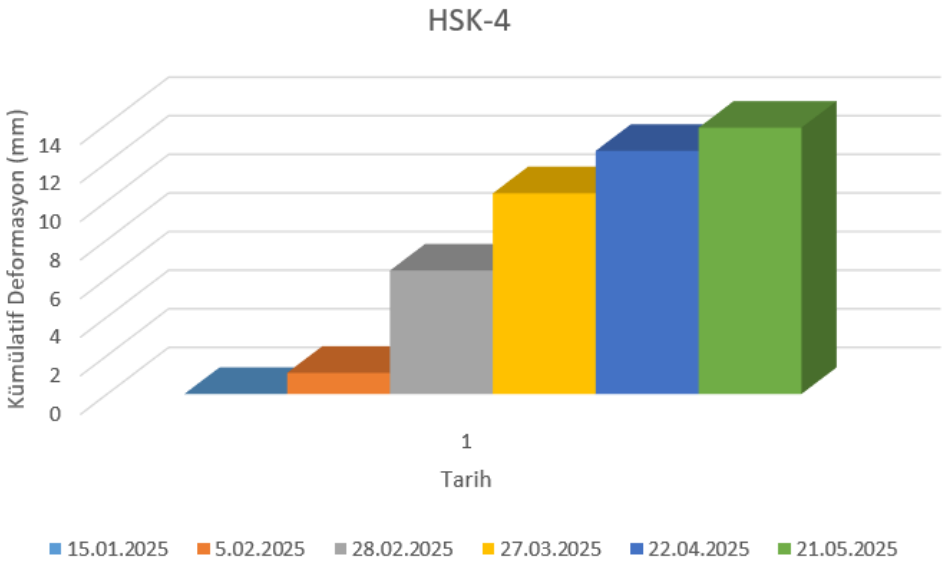
2.4 Bulguların Değerlendirilmesi

İnceleme alanında yüzeyde Pliyo-Kuvaterner yaşlı bazaltlar, bu birimin altında ise Üst Miyosen yaşlı Şelmo Formasyonu gözlenmektedir. Şelmo Formasyonu; kiltaşı, kumtaşı, silttaşı ve çakıltaşından oluşan ardalanmalı bir litolojidir. Formasyonun zayıf çimentolu, ayrışmaya yatkın ve dağılgan yapısı bölgedeki duraysızlıkların başlıca nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Üst seviyelerde yer alan kırıklı-çatlaklı bazaltlardan yüzey ve sızma sularının Şelmo Formasyonunun ayrışmış kil–silt seviyelerine ulaşması, yamaç molozu ile birlikte bu birimleri suya doygun hale getirerek taşıma gücünü düşürmekte ve kütle hareketlerini tetiklemektedir.

Şekil 12'de HSK-4 Nolu inklinometre kuyusuna ait ölçümler (yaklaşık 25 günde bir alınmış) zamana bağlı olarak değerlendirildiğinde, Şubat ve Mart aylarında gerçekleşen yağışların diğer aylara göre deformasyon miktarlarında artışa sebep olduğu görülmektedir. Proje kapsamında ölçüm alınan kuyular genel olarak değerlendirildiğinde referans ölçümünden sonraki ilk ölçümde kayda değer deplasmanlar gözlenmezken sonrasında alınan ölçümlerde deplasman miktarı artarak devam etmektedir. Bu açıdan incelendiğinde hareketin aktif bir heyelan olduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. HSK 7 Nolu İnklinometre Ölçümü Profil Görüntüsü



Şekil 11. HSK-4 Nolu İnklinometre Kuyusu Ölçüm Tarihleri ve Deformasyon Miktarları

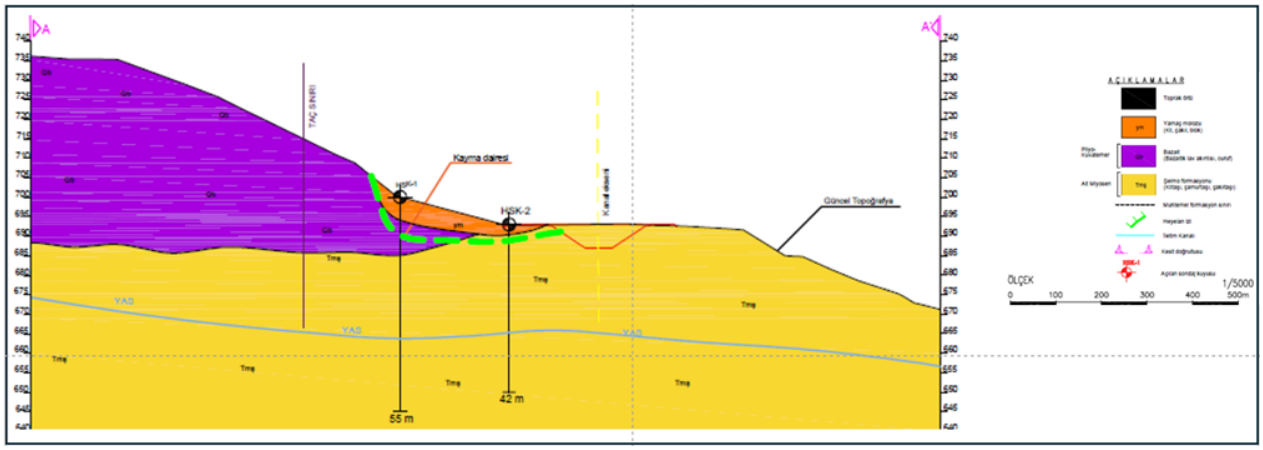
Arazide 1,5–6 m arasında değişen kalınlıkta yamaç molozu yayılım göstermektedir. Bazaltlardan gelen sular bu gevşek malzemeyi suya doygun hale getirerek kayma yüzeyinin oluşumunu kolaylaştırmakta ve hareketliliği artırmaktadır. İnklinometre ölçümlerinden elde edilen yatay deplasman profilleri, kayma yüzeyinin konumunun bu jeolojik koşullarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tüm veriler değerlendirildiğinde, 5 adet kuyuda kayda değer yatay deplasmanlar belirlenmiş olup, kayma yüzeyi derinlikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Buna göre kayma, HSK-1 numaralı kuyuda yaklaşık 9,5 m, HSK-2'de 4,0 m, HSK-3 ve HSK-4'te 18,0 m ve HSK-7'de 3,0 m derinlikte tanımlanmıştır. Bu bulgular, heyelanın farklı kesitlerinde değişken derinliklerde geliştiğini ve kayma yüzeyinin süreksiz geometrili bir karaktere sahip olabileceğini göstermektedir.

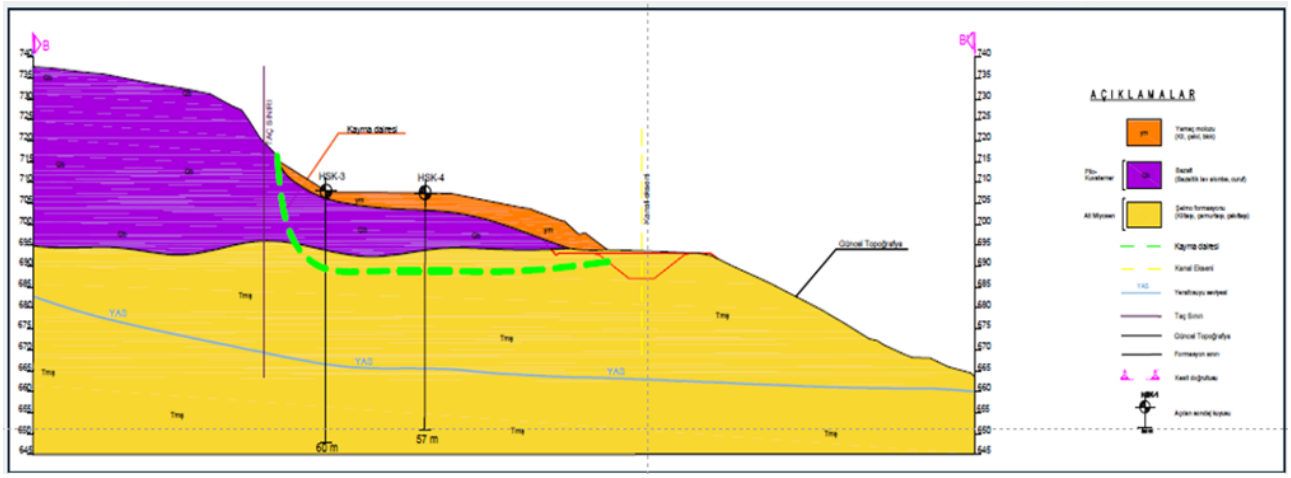
Tablo 1. İnklinometre Ölçümlerine Göre Belirlenen Kayma Yüzeyi Derinlikleri

Sondaj No	Sondaj Kot (m)	Kayma Derinliği (m)	Kayma Kot (m)
HSK-1	700.23	9.5	690.73
HSK-2	692.61	4.0	688.61
HSK-3	707.39	18.0	689.39
HSK-4	707.32	18.0	689.32
HSK-7	693.14	3.0	690.14

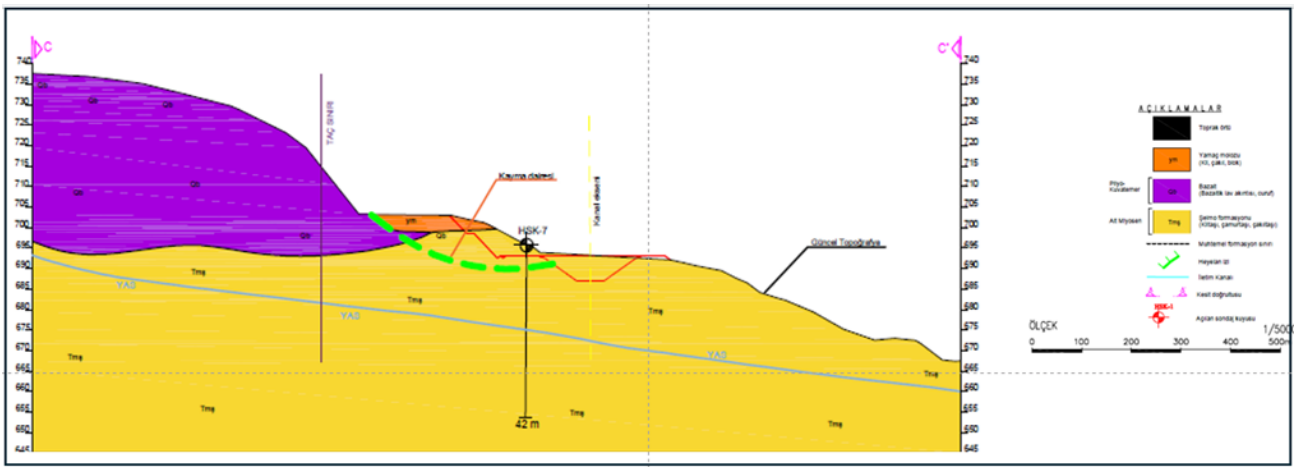
Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te sırasıyla A–A', B–B′ ve C–C' hatlarına ait jeoteknik kesitler sunulmakta olup, bu kesitlerde özellikle inklinometre ölçümleri ile belirlenen kayma yüzeylerinin derinlikleri ve bu verilere dayanılarak oluşturulan olası kayma daireleri gösterilmektedir. Kesitlerde ayrıca taç sınırı, mevcut topografya ve iletim kanalı güzergâhı işaretlenmiştir. Söz konusu kesitler, inceleme alanının litolojik dağılımını veren Şekil 5'teki Genel Jeoloji Haritası üzerinde tanımlanan hatlar boyunca hazırlanmış; kayma yüzeylerinin konumu ve geometrisinin belirlenmesinde temel veri kaynağı olan inklinometre sonuçları, sondaj logları ve arazi gözlemleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kayma yüzeylerinin farklı noktalarda değişen derinliklerde geliştiğini, ancak çoğunlukla zayıf çimentolu kil–silt seviyeleri ile ayrışmış yamaç molozu zonlarının sınırlarında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, sahadaki duraysızlık mekanizmasının anlaşılmasında inklinometre ölçümlerinin kritik rolünü ve kayma geometrisinin tanımlanmasında vazgeçilmez bir araç olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.



Şekil 12. Km:4+285.00-4+790.00 arası meydana gelen heyelana ait kayma yüzeylerinin derinliklerine göre oluşturulmuş A–A' jeoteknik kesiti.



Şekil 13. Km:4+285.00-4+790.00 arası meydana gelen heyelana ait kayma yüzeylerinin derinliklerine göre oluşturulmuş B-B' jeoteknik kesiti.



Şekil 14. Km:4+285.00-4+790.00 arası meydana gelen heyelana ait kayma yüzeylerinin derinliklerine göre oluşturulmuş C-C' jeoteknik kesiti.

3 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Kralkızı–Dicle P-3 Pompaj Sulaması İletim Kanalı güzergâhında kurulan yedi adet inklinometre kuyusundan elde edilen ölçüm sonuçları değerlendirilmiş ve bölgedeki kütle hareketlerinin mekansal ve derinliksel özellikleri ayrıntılı olarak ortaya konmuştur. Ölçüm sonuçları, kayma hareketlerinin beş kuyuda belirgin şekilde gözlendiğini ve kayma yüzeylerinin 3–18 m aralığında değişen derinliklerde geliştiğini göstermektedir. Hareketlerin özellikle Şelmo Formasyonunun ayrışmış killi–siltti seviyelerinde yoğunlaştığı belirlenmiş; bu birimlerin düşük dayanımları ve ayrışmaya yatkın yapıları nedeniyle heyelanın ana kontrolünü sağladığı değerlendirilmiştir. Üstte yer alan kırıklı-çatlaklı bazaltlardan sızan yüzey sularının, alt seviyelerdeki zayıf zeminleri suya doygun hale getirerek hem yamaç molozunda taşıma gücü kaybına yol açtığı hem de Şelmo Formasyonunda kayma yüzeylerinin süreklilik kazanmasına neden olduğu saptanmıştır. Bu durum, yamaç molozunun hareket etmesine ve Şelmo Formasyonunda ek duraysızlıkların gelişmesine yol açmaktadır. İnklinometre ölçümlerine göre yapılan değerlendirmede belirlenen heyelanın kayma dairesinin konumu da bu durumu desteklemektedir. Yamaç molozunun suya doygun hale gelmesi, bu birimin kohezyonunu azaltmakta ve kayma dairelerinin oluşumunu kolaylaştırmaktadır.

İnklinometre verileri, heyelanın tek bir kayma düzlemi boyunca gelişen basit bir mekanizmadan ziyade, birbirinden farklı derinliklerde yer alan birden fazla zayıf zonun ardışık veya birlikte aktive olduğu karmaşık bir deformasyon sürecine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, sahadaki kütle hareketlerinin mevsimsel yağışlara duyarlılığını artırmakta ve zemin davranışının zaman içinde değişkenlik gösterdiğini işaret etmektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, iletim kanalının mevcut güzergâhının heyelan etkisine açık olduğu değerlendirilmiş; bu nedenle uygulama projesi aşamasında dikkate alınması gereken mühendislik gereksinimleri ortaya konmuştur. Bu çalışma henüz bir uygulama projesini içermemekle birlikte, inklinometre bulguları ışığında ilerleyen proje aşamalarında yapılması gereken başlıca mühendislik önerileri aşağıda özetlenmiştir:

- Bazaltlardan gelen yüzey ve sızıntı sularının drenajı sağlanmalı; kafa hendeği, drenfleks veya benzeri drenaj sistemleri ile suyun kazı alanından uzaklaştırılması gerekmektedir.
- Şev stabilitesi açısından, analiz sonuçları doğrultusunda şevlerin üst kotlardan alt kota doğru 1düşey/1,5yatay eğimde düzenlenmesi uygun değerlendirilmektedir.
- Kazıya üst palyelerden başlanarak şevlerin kademeli olarak yatırılması, ardından kanal kazısına geçilmesi stabilite açısından önemlidir.
- Yamaç molozu ve Şelmo Formasyonu'nun zayıf zemin özellikleri dikkate alınarak, güzergâh boyunca drenaj ve yüzey suyu kontrolünün güçlendirilmesi gerekmektedir.
- Şevlerde herhangi bir kazıya başlanmadan önce, mevcut trapez kesit yerine U kesit veya BAKS-U kesit tipinin kullanılması seçenekleri teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilerek en uygun kesit tipinin projelendirilmesi önerilmektedir.

Genel olarak çalışma, inklinometre yönteminin saha koşullarına doğrudan etki eden deformasyonların ölçülmesinde ve kayma yüzeyinin güvenilir şekilde tanımlanmasında sağladığı belirleyici rolü ortaya koymuş; büyük ölçekli altyapı projelerinde bu yöntemin şev duraylılığı değerlendirmelerinde vazgeçilmez bir araç olduğunu göstermiştir.

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

ASTM 2013, "ASTM D6230 – Standard Test Method for Monitoring Horizontal Movement Using Inclinometers", ASTM International

DSİ 2025, "Kralkızı-Dicle P-3 Pompaj Sulaması İletim Kanalı, Pompa İstasyonu ve Ana Kanal Yapımı Km:4+285-4+790 Arası Uygulama Aşaması Jeoteknik Raporu", DSİ 10. Bölge Müdürlüğü, Diyarbakır.

Long, M. 2001, "Instrumentation practice in geotechnical engineering", *Proc. ICE-Geotechnical Engineering*, 149(4), s. 295–307.

Mesutoğlu, M. 2013, "Kaya ve toprak ortamda kurulan inklinometre ölçüm kuyularından elde edilen deformasyon ölçümlerinin matematiksel analizi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Mikkelsen, P.E. 2003, "Advances in Inclinometer Data Analysis", *Field Measurements in Geomechanics*, Oslo.

Öztürk, E., Toprak, B. 2016, "Düzce ili Karaçörtlen köy yolu hattı heyelan riskinin inklinometre çalışmalarıyla araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, s. 902–910.

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147 p39-54 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p39-54

Araştırma Makalesi / Research Article

Effects of Asbestos and Inorganic Contaminants on Groundwater Chemistry at Earthquake Debris Disposal Sites

Deprem Enkaz Döküm Alanlarında Asbest ve İnorganik Kirleticilerin Yeraltısuyu Kimyasi Üzerindeki Etkileri

Aylin CİVAN[1]* , Adnan MORKOÇ[1] , Elçin KABADAYI[1]

[1] General Directorate of State Hydraulic Works, Department of Groundwaters, 06530 ANKARA, TÜRKİYE

**Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: aylincivan@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 12.09.2025, Düzeltme (Revised): 19.01.2026, Kabul (Accepted): 26.01.2026

ABSTRACT

This study investigated the potential impacts of debris piles and damaged infrastructure systems formed in the aftermath of the earthquakes of magnitudes 7.7 and 7.6 that occurred on 6 February 2023 in the Pazarcık and Elbistan districts of Kahramanmaraş in relation to groundwater systems. At 12 sampling points (11 groundwater, 1 surface water) situated in close proximity to five designated debris disposal sites in the provinces of Kahramanmaraş, Adıyaman, and Gaziantep, in situ measurements of electrical conductivity, pH, temperature, and dissolved oxygen were conducted, and water samples were collected for asbestos, major ion, and heavy metal analyses. According to the analytical results, asbestos was not detected at any of the sampling points; however, exceedances of water quality standards (Regulation on Waters Intended for Human Consumption) were identified at some locations for sulfate and heavy metal parameters. At the Islahiye site, increases in the concentrations of heavy metals such as iron, lead, manganese, nickel, and aluminum were detected in areas close to the debris disposal zones. This contamination is considered to have originated from the debris disposal sites. Similarly, in samples collected from the Kırkgöz Stream—where the Adıyaman Kırkgöz Spring transitions to surface flow—increased sulfate and heavy metal concentrations were observed in the downstream sections of the debris areas due to leaching effects. Pollutant concentrations varied between wet and dry periods, indicating that seasonal conditions play a determining role in the transport and transfer of contaminants within the groundwater environment. Considering the hydrogeological conditions and groundwater dynamics, it is essential to continue regular and systematic monitoring in order to identify and assess the potential impacts associated with earthquakes and debris disposal sites.

Keywords: Earthquake Debris Sites, Groundwater Contamination, Hydrogeochemistry, Asbestos, Heavy Metals

ÖZ

Çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş ili Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde meydana gelen 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki depremlerin ardından oluşan enkaz yığınlarının ve hasar görmüş altyapı sistemlerinin yeraltı suyu sistemleri üzerindeki potansiyel etkileri incelenmiştir. Kahramanmaraş, Adıyaman ve Gaziantep illerinde belirlenen 5 enkaz döküm sahasına yakın konumda bulunan 12 örnekleme noktasında (11 yeraltı suyu, 1 yüzey suyu) elektriksel iletkenlik, pH, sıcaklık ve çözünmüş oksijen parametreleri yerinde ölçülmüş, asbest, majör iyon ve ağır metal analizleri için numuneler alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre hiçbir örnekleme noktasında asbest tespit edilmemiştir; ancak sülfat ve ağır metal grubu parametrelerinde bazı noktalarda su kalitesi standartlarının (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik) aşıldığı belirlenmiştir. Islahiye sahasında enkaz döküm alanlarına yakın bölgelerde demir, kurşun, mangan, nikel ve alüminyum gibi ağır metal konsantrasyonlarında artışlar tespit edilmiştir. Bu kirliliğin enkaz döküm sahalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde, Adıyaman Kırkgöz Kaynağı'nın yüzelsel akışa geçtiği Kırkgöz Çayı'ndan alınan numunelerde, enkaz alanlarının mansap bölgelerinde süzülme etkisi nedeniyle sülfat ve ağır metal konsantrasyonlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Yağışlı ve kurak dönemler arasında kirletici konsantrasyonları değişkenlik göstermekte olup bu durum mevsimsel koşulların kirleticilerin

yeraltı suyu ortamına taşınma ve transfer süreçleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Hidrojeolojik koşullar ve yeraltı suyu dinamikleri de dikkate alındığında, depremler ve enkaz döküm sahalarına bağlı olası etkilerin ortaya konulması amacıyla düzenli ve sistematik izleme çalışmalarının sürdürülmesi önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Deprem Enkaz Alanları**,** Yeraltı suyu Kirliliği, Hidrojeokimya, Asbest, Ağır Metaller

1 Introduction

Kahramanmaraş Pazarcık and Elbistan centered earthquakes caused extensive destruction not only in the province of Kahramanmaraş but also in the surrounding provinces, and tens of thousands of buildings either collapsed during the events or sustained severe damage and were subsequently demolished in a controlled manner. The debris resulting from these collapses was collected at sites located near the provincial and district centers. The improper removal, transport, disposal, and final deposition of building debris has the potential to lead to significant ecological impacts (Molla et al., 2025). Debris disposal sites can lead to the dispersion of harmful airborne particulates, the contamination of water resources, and the accumulation of toxic substances in soil. Consequently, these forms of environmental pollution can disrupt ecosystem balance, resulting in widespread degradation and adverse effects on human health. While air pollution may increase the incidence of respiratory diseases, contaminated water resources and toxic substances can pose risks to both human and ecosystem health (Mavroulis et al., 2023). Therefore, the management of building debris must be carried out in a careful and well-planned manner.

Earthquakes can significantly affect water quality by facilitating the introduction of pollutants into groundwater through debris and damaged infrastructure. These contaminants have the potential to infiltrate groundwater resources if they are not properly disposed of. In addition, damage to sewer systems can facilitate the transport of nitrate, microbial pathogens, and persistent trace organic compounds into the underlying aquifers (Rusiñol, 2023). Understanding these pathways of contamination is critical for the effective management of water resources in the post-seismic period.

Nitrate contamination in groundwater is typically associated with agricultural runoff and wastewater leakage. Earthquakes may accelerate the transport of nutrient-containing contaminants with the potential to infiltrate into aquifers. For example, the earthquake that occurred in Japan’s Kumamoto region in 2016 significantly affected both groundwater levels and groundwater quality (Nakagawa et al., 2021). The elevations in nitrate concentrations observed in certain regions were attributed to the downward migration of nitrate compounds into deeper aquifers, driven by seismic-induced changes in soil profiles and in the physical characteristics of shallow groundwater systems particularly alterations in fracture structure and permeability. Following the Kahramanmaraş earthquakes, significant physical changes were observed in groundwater wells, including increased turbidity and the presence of microbiological pathogens (Şimşek et al., 2024). This finding highlights not only the presence of nitrate contamination but also the potential risk of microbial pollution originating from damaged sewer systems. A study conducted following the 2010 earthquake in the Boumerdes region of Algeria investigated the impacts of seismically-induced destruction debris on groundwater quality (Benmenni & Benrachedi, 2010). The findings of the study showed that leachates originating from debris sites led to the accumulation of contaminants in groundwater, thereby adversely affecting water quality. The research emphasized that the leaching of heavy metals into water resources has the potential to induce long-term environmental and public health issues, thereby highlighting the necessity of effective waste management and systematic monitoring of aquatic ecosystems.

Asbestos originates from the array of chemical and mineral-based materials historically employed in building construction, thereby constituting a significant environmental risk factor in the aftermath of large-scale seismic destruction. Asbestos has long been widely utilized in buildings after undergoing various industrial processing steps. Its applications have included insulation materials, cement additives, exterior cladding, fillers and joint compounds, roofing sheets and panels, electrical cables, and, most prominently, components of building piping systems (Macher et al., 2025; Peña-Castro et al., 2023). Following studies conducted since the second half of the 20th century detailing the harm of inhaled asbestos fibers to human health, numerous national and international organizations, including the World Health Organization (WHO), classified all forms of asbestos as "definite carcinogens" (WHO, 2021). Although WHO has not yet set a drinking water standard value for asbestos, it has categorized it as a parameter that requires monitoring. The United States Environmental Protection Agency (EPA) has established a maximum contaminant level (MCL) for asbestos fibers longer than 10 micrometers in drinking water, expressed as 7 million fibers per liter (MFL) (EPA, 1985). At the national level, following extensive studies conducted in the relevant field, the use of asbestos regardless of its type or application

was completely prohibited by the Regulation Amending the 'Regulation on Restrictions Concerning the Manufacture, Placing on the Market, and Use of Certain Hazardous Substances, Preparations, and Articles,' which entered into force on 31 December 2010. In groundwater sources situated in proximity to debris disposal areas within the earthquake-affected region, the determination of asbestos fiber types and concentrations alongside analyses of major ions and heavy metals constitutes an essential component of comprehensive environmental assessment. Generating such integrated datasets is critical for informing evidence-based mitigation strategies and for guiding the development of protective measures in the forthcoming phases of post-disaster management.

Existing literature demonstrates that earthquakes have the potential to substantially impact groundwater quality over extended periods. One of the primary impacts is the alteration of groundwater flow paths, which occurs concurrently with the movement of fault lines within the Earth's crust during a seismic event (Fronzi et al., 2021). Such impacts predominantly influence critical groundwater parameters, encompassing chemical composition, physical properties, and hydrogeological structure.

2 Material and Methods

In this study, groundwater sampling was conducted at 12 locations across five distinct sites (Figure 1) to characterize post-earthquake hydrochemical conditions and to identify potential contaminant pressure factors. Prior to the initiation of fieldwork, consultations were conducted with the 20th Regional Directorate of the State Hydraulic Works (DSI) in Kahramanmaraş to obtain information on the locations used for the storage of debris generated by the 2023 earthquakes, the surrounding groundwater resources, and the groundwater flow directions in these areas. In coordination with the Regional Directorate Laboratory, the required materials for sampling, preservation, and transport of the selected parameter groups—including appropriate sample containers, preservation reagents, and ice packs—were supplied by the laboratory.

Based on the information obtained and subsequent evaluations, sampling locations were determined (Table 1) by considering the groundwater flow directions of sources situated in proximity to the debris disposal areas, thereby enabling the establishment of upstream–downstream relationships for comparative analysis. Sampling was conducted from all wells that could potentially be located near these sites (e.g., Figure 2a), and the majority of these wells were privately drilled. Although information on the filter depths of these wells could not be obtained, since they were drilled for operational purposes to abstract water from the existing aquifer(s), they are considered representative of the aquifer systems in the study areas.

2.1 Geological and Hyrogeological Characteristics

2.1.1 Erkenez disposal site

Erkenez Stream represents the largest tributary of the Aksu Stream in the Middle Ceyhan Basin and is formed by the confluence of waters discharged from multiple springs along the foothills of Ahırdağı. The Erkenez Debris Disposal Site and all three sampling points are located on Quaternary alluvium surrounded by Jurassic – Cretaceous Cekerek River Formations, Ankara Mélange and Middle Miocene sandstone–mudstone–limestone Eocene Midyat Formation (Figure 3) (DSI, 2015).

2.1.2 Türkoğlu disposal site

Türkoğlu District consists of the Hoya–Kavalköy Formation, which is composed of dolomitic and cherty limestone, as well as Quaternary alluvium. The Türkoğlu debris disposal site and the Türkoğlu-1 sampling point are located on Quaternary alluvium, while the Türkoğlu-2 sampling point (upstream of the disposal site) is situated on cretaceous limestone (Figure 3) (DSI, 2015).

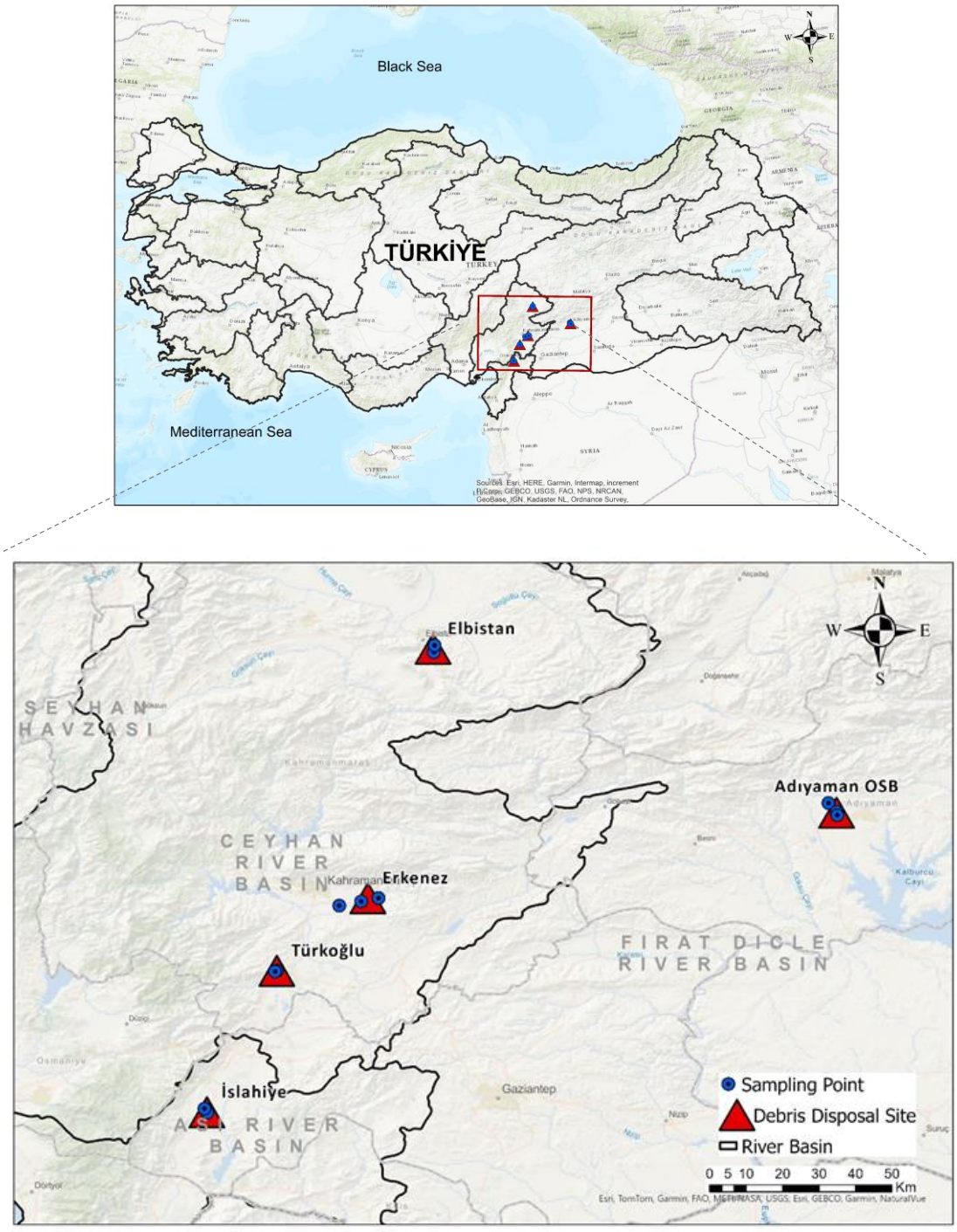


Figure 1 Location Map of Debris Disposal Sites and Sampling Points

Table 1 Information on Debris Disposal Sites and Sampling Points

Site Name	Sampling Point	Sample ID	Area Represented	Sample Type	Well Depth	Additional Information
Kahramanmaraş Erkenez Stream	Erkenez-1	ERK1	Downstream of the disposal site	Groundwater	90 m	Well owned by Turat Mining
	Erkenez-2	ERK2	Downstream of the disposal site	Groundwater	Not specified	Well within the DSİ 20th Regional Directorate premises
	Erkenez-3	ERK3	Upstream of the disposal site	Groundwater	50 m	Well operated by KASKİ
Türkoğlu	Türkoğlu-1	TRK1	Downstream of the disposal site	Groundwater	100 m	Drinking water well operated by KASKİ
	Türkoğlu-2	TRK2	Upstream of the disposal site	Groundwater	100 m	Drinking water well operated by KASKİ
Adıyaman	Adıyaman-1	ADY1	Upstream of the disposal site	Spring	-	Sample collected from Kırkgöz Springs
	Adıyaman-2	ADY2	Upstream of the disposal site	Groundwater	Not specified	Well owned by Güçlü Tekstil, in Adıyaman OSB
	Adıyaman-3	ADY3	Downstream of the disposal site	Surface Water	-	Surface water sample from the continuation of Kırkgöz Springs, downstream
Elbistan	Elbistan-1	ELB1	Upstream of the disposal site	Groundwater	100 m	Taşburun Yeşilyurt Livestock Farm well
	Elbistan-2	ELB2	Downstream of the disposal site	Spring	-	Water sample collected from Pınarbaşı Spring
İslahiye	İslahiye-1	ISL1	Downstream of the disposal site	Groundwater	172 m	Privately owned well
	İslahiye-2	ISL2	Upstream of the disposal site	Groundwater	200 m	Privately owned well



Figure 2 a. KASKİ Drinking Water Well in Türkoğlu (Sample ID: Türkoğlu-1) b. Adıyaman Kırkgöz Spring (Sample ID: Adıyaman-1)

2.1.3 Adıyaman disposal site

According to the Euphrates Basin Master Plan Hydrogeology Final Report, Kırkgöz Spring is located in the Lower Euphrates Sub-Basin, approximately 4 km north of the Adıyaman city and emerges from Eocene–Pliocene aged limestones as discharge from multiple outlets. A portion of this discharge is captured and utilized as drinking and domestic water for the Adıyaman city center, while the remaining flow contributes to the perennial discharge of the Kırkgöz Stream and is used for irrigation purposes (DSI, 2016). With a discharge of approximately 200 L/s, the Kırkgöz springs are considered to be karstic in origin, as supported by field observations and their emergence from multiple spring outlets. The Adıyaman-1 sampling point corresponds to one of the largest outlets of the Kırkgöz Spring and represents the recharge zone associated with the disposal site. The Adıyaman-2 point is situated on Middle Miocene–Upper Miocene aged conglomerate–mudstone–sandstone units and similarly represents the recharge area; the

disposal site located immediately downslope of the Adıyaman-2 point is also underlain by the same geological unit (Figure 3).

2.1.4 Elbistan disposal site

The southern part of Elbistan District is characterized by Upper Jurassic–Lower Cretaceous volcano-sedimentary rocks and Triassic–Cretaceous limestones, whereas the northern part consists of Pliocene sandstone–mudstone–limestone sequences and alluvium. The Elbistan disposal site is located on volcano-sedimentary rocks, whereas the Elbistan-1 sampling point is situated on limestones and the Elbistan-2 sampling point on sandstone–mudstone–limestone units (Figure 4) (DSI, 2015).

2.1.5 Islahiye disposal site

The Quaternary-aged Islahiye Delihalil Basalt comprises unconsolidated pyroclastic rocks, volcanic ash deposits, and basaltic lava flows. The pyroclastic units include volcanic bombs, lapilli, pumice, and scoria, as well as yellow, brown, pink, and reddish volcanic ash layers. Petrographically classified as olivine basalt to basalt, these flows exhibit a mineral assemblage dominated by plagioclase, olivine, and pyroxene (DSI, 2025).The debris disposal site and both sampling points are situated on this basalt unit (Figure 4).

2.2 On-site Measurements and Laboratory Analyses

At 12 sampling locations identified in the provinces of Kahramanmaraş, Adıyaman, and Gaziantep, in-situ measurements of electrical conductivity, pH, and temperature were conducted during the wet and dry seasons of 2024 using a portable multiparameter meter. Water samples were collected under appropriate conditions for the analysis of major ions, nutrients, heavy metals, and asbestos.

Analyses of major ions and heavy metals were conducted in the Regional Directorate Laboratories of DSI, whereas asbestos analyses were performed in an accredited private laboratory (AGT VONKA Laboratories). The parameters Ca, Na, Mg, K, Cl, SO_4, NO_3, NH_3, NO_2, and PO_4 were analyzed by ion chromatography (Method: TS EN ISO 10304-1), while CO_3 and HCO_3 were determined by the titrimetric method (Method: TS 3790 EN ISO 9963-1). Heavy metals were analyzed using ICP-MS (Methods: TS EN ISO 17294-1, TS EN ISO 17294-2, and EPA 200.8). Asbestos in water samples was determined using the SEM-EDX method (Method: VDI 3866).

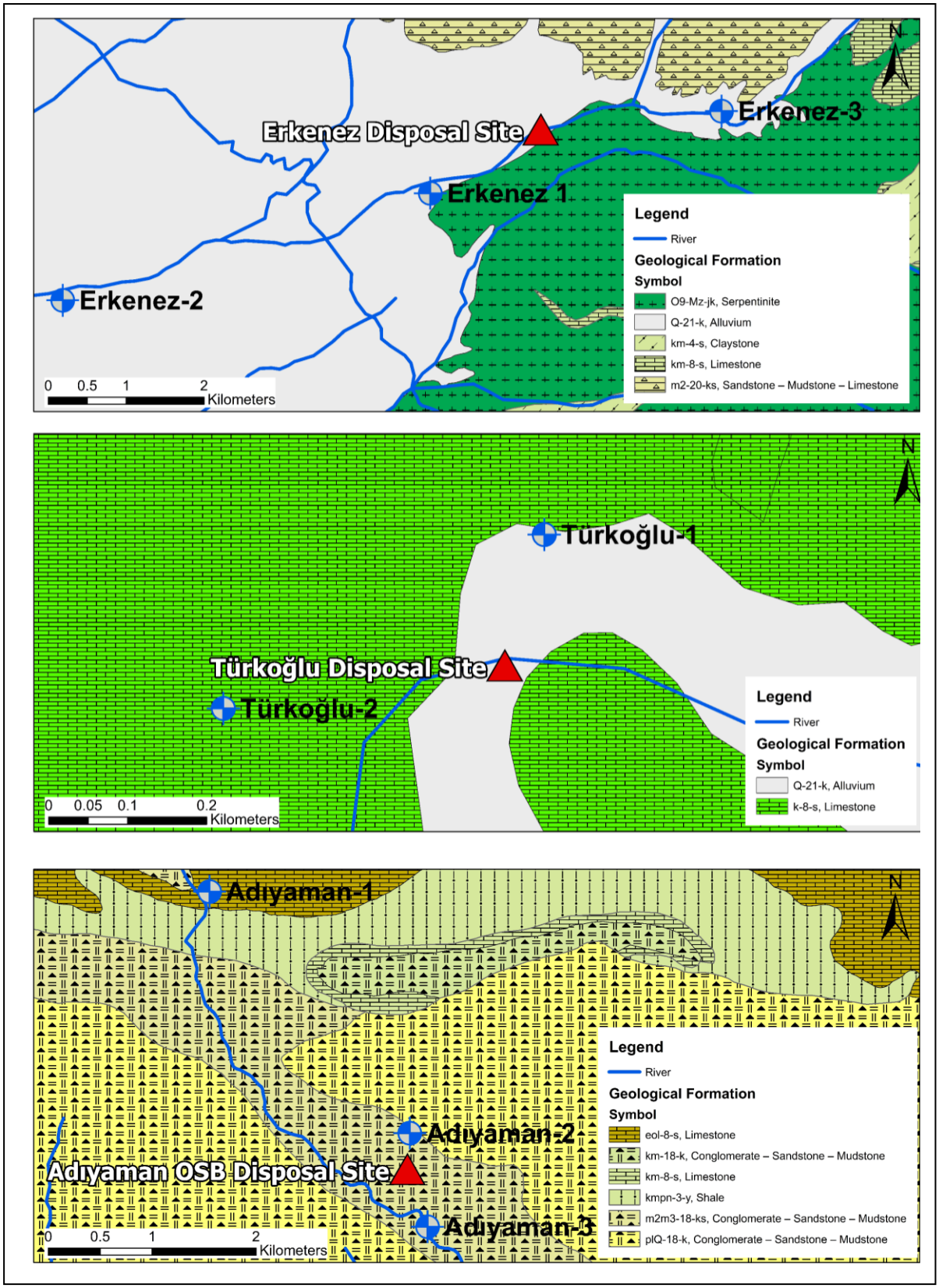


Figure 3. Geological Maps of the Debris Disposal Sites and Sampling Points (*Source: MTA (2015). Digital Geological Map of Turkey*, *1:25.000*)

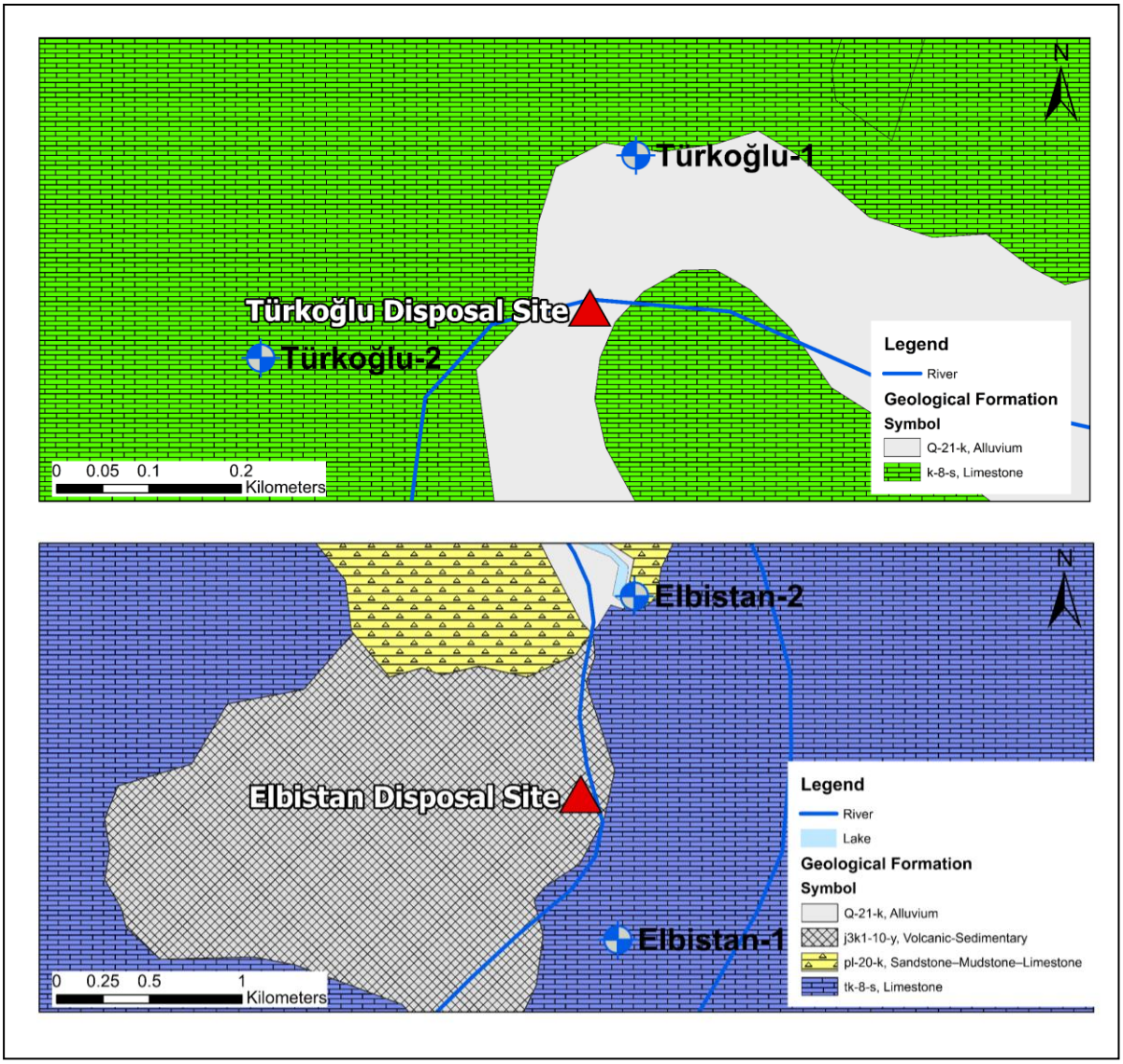


Figure 4 Geological Maps of the Debris Disposal Sites contd. (*Source: MTA (2015). Digital Geological Map of Turkey*, *1:25.000*)

Microscopy is the only reliable technique for verifying the fibrous morphology of asbestos. Although it is widely used for airborne fibers, it cannot detect the thin fibers present in water (<0.2 µm) and cannot distinguish asbestos from other fibers. Polarized light microscopy can identify all regulated asbestos types but is limited to fibers thicker than ~0.3 µm. Only electron beam microscopy provides the resolution required to detect the finest asbestos fibers (≈0.02 µm), and SEM–EDX systems can also determine their elemental composition (Nollet & De Gelder, 2013).

3 Results and Discussion

Groundwater flow dynamics were taken into account in designing the monitoring network, and sampling points were strategically placed upstream and downstream of the debris disposal sites to assess potential environmental impacts. The collected water samples were analyzed for major ions, nutrients, heavy metals, and asbestos and the results are given in Table 2.

No asbestos was detected in any sample; nevertheless, a representative image from the asbestos detection analysis (Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive X-Ray Analysis) is included for illustrative purposes (Figure 5). Asbestos analysis in water is technically challenging due to the mineralogical properties of asbestos minerals. The elements commonly present in asbestos (Si, Mg, Fe, Ca, Na) are widespread in natural materials, making elemental-composition–based identification unreliable. In addition, the crystalline structures of asbestos minerals are indistinguishable from those of their non-fibrous counterparts; for example, X-ray diffraction cannot differentiate crocidolite from riebeckite or amosite

from grunerite (Malinconico et al., 2022). Microscopy is the only method capable of confirming asbestos' fibrous morphology and this study therefore utilized microscopy techniques. However, another difficulty

Table 2 On-Site Measurement and Analysis Results

Parameter	Water Quality Standard	Sampling Date	TRK1	TRK2	ELB1	ELB2	ADY1	ADY2	ADY3	ERK1	ERK2	ERK3	ISL1	ISL2
T (°C)	-	15.05.24	17.70	19.60	18.30	15.90	16.90	23.00	23.40	14.60	16.80	18.80	21.20	19.30
		02.10.24	16.53	17.30	19.20	18.87	18.57	25.40	22.50	14.43	13.64	-	21.20	20.25
EC (µS/cm)	<2500[1]	15.05.24	481	585	560	417	435	376	1515	634	438	684	336	475
		02.10.24	521	445	571	487	419	394	1050	847	402	-	338	398
pH	6.5<pH<9.5[1]	15.05.24	7.4	7.15	7.95	7.98	7.62	7.82	7.77	6.34	8.12	7.83	6.86	6.78
		02.10.24	7.8	7.39	7.61	8.58	8.05	7.82	8.23	8.65	8.28	-	6.74	6.79
Na (mg/L)	200[1]	15.05.24	4.36	6.61	29.7	27.62	3.21	2.61	104.1	13.51	6.89	10.15	9.88	7.7
		02.10.24	3.28	6.87	11.57	3.16	3.00	3.28	81.27	10.36	7.09	9.73	9.66	7.59
K (mg/L)	-	15.05.24	0.8	0.85	0.94	1.32	0.69	0.88	16.59	1.44	0.83	1.26	1.5	1.4
		02.10.24	0.55	0.66	2.91	0.60	0.54	0.46	11.47	0.98	0.86	0.87	1.49	1.17
Ca (mg/L)	-	15.05.24	74.81	65.48	67.63	85.73	88.94	59.27	246.56	83.05	66.92	81.4	45.41	52.36
		02.10.24	62.99	55.20	134.89	69.81	67.48	46.67	103.64	66.64	58.84	72.71	39.86	44.83
Mg (mg/L)	-	15.05.24	24.97	42.82	24.09	11.86	10.13	22.67	27.02	35.05	25.78	49.06	14.81	39.24
		02.10.24	25.43	43.74	17.30	10.48	10.45	21.63	23.30	27.51	25.67	29.72	16.11	26.80
CO_3 (mg/L)	-	15.05.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		02.10.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO_3 (mg/L)	-	15.05.24	290.0	339.7	240.2	205.1	274.9	203.3	172.0	263.6	275.8	385.7	184.5	185.1
		02.10.24	287.3	336.9	347.4	190.1	227.8	160.9	218.6	251.9	248.5	345.6	161.3	244.7
Cl (mg/L)	250[1]	15.05.24	<10.00	13.12	31.17	<10.00	<10.00	19.69	70.69	22.55	10.98	15.72	<10.00	14.56
		02.10.24	7.20	14.29	45.90	11.14	6.20	23.20	119.46	19.89	19.76	10.63	16.76	11.43
SO_4 (mg/L)	250[1]	15.05.24	17.02	23.05	23.72	44.38	11.3	10.37	619.81	87.83	15.26	22.52	8.52	11.15
		02.10.24	14.27	22.04	42.87	44.59	9.18	7.20	187.46	52.09	14.53	16.67	11.41	7.81
NH_4 (mg/L)	0.5[1]	15.05.24	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025
		02.10.24	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18	<0.18
NO_2 (mg/L)	0.5[1]	15.05.24	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025	<0.025
		02.10.24	0.31	0.17	<0.05	<0.05	0.10	0.27	<0.05	3.94	0.18	0.29	<0.05	<0.05
NO_3 (mg/L)	50[1]	15.05.24	14.67	17.53	34.46	10.27	16.04	17.37	26.34	17.98	25.53	39.51	18.38	25.12
		02.10.24	2.52	3.88	11.84	1.90	3.65	3.30	1.53	17.44	6.13	2.82	5.73	4.10
o-PO_4 (mg/L)	-	15.05.24	<0.300	0.318	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	<0.300	0.339	<0.300
		02.10.24	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17	<0.17
Pb (µg/L)	10[1]	15.05.24	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	-	4.28	<0.56
		02.10.24	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	<0.56	15.84	<0.56
Cr (µg/L)	50[1]	15.05.24	3.09	6.26	2.9	0.56	1.98	17.37	2.63	3.06	5.07	5.52	5.92	10.42
		02.10.24	3.82	8.58	1.5	0.65	1.88	18.19	4.55	3.35	5.04	3.02	12.83	3.58
Mn (µg/L)	50[1]	15.05.24	0.87	<0.76	1.65	<0.76	<0.76	<0.76	139.52	<0.76	<0.76	<0.76	<0.76	<0.76
		02.10.24	<0.76	<0.76	22.63	<0.76	<0.76	1.45	157.71	0.97	<0.76	1.31	127.27	<0.76
Fe (µg/L)	200[1]	15.05.24	77.89	5.45	19.25	4.11	4.55	7.61	59.86	9.15	8.06	<1.55	6.01	11.11
		02.10.24	19.67	10.82	264.71	8.25	8.48	22.56	550.63	72.46	7.78	26.55	2552.93	13.55
Cu (µg/L)	2000[1]	15.05.24	2	0.6	0.64	<0.59	<0.59	2.8	0.85	<0.59	<0.59	<0.59	<0.59	1.51
		02.10.24	0.7	<0.59	1.96	<0.59	1.47	1.26	1.6	0.67	<0.59	<0.59	3.6	0.91
Cd (µg/L)	5[1]	15.05.24	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
		02.10.24	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Ni (µg/L)	20[1]	15.05.24	1.01	2.93	2.1	<0.54	0.73	1.05	17.05	0.7	<0.54	1.02	4.64	2.54
		02.10.24	1.36	3.46	3.48	<0.54	1.12	1.33	21.62	0.89	0.68	1.01	43.47	3.06
Al (µg/L)	200[1]	15.05.24	8.55	<2.06	18.76	2.82	3.11	2.77	44.08	4.86	5.87	<2.06	3.38	<2.06
		02.10.24	7.88	4.94	221.17	3.92	3.98	6.3	508.13	6.3	3.4	8.22	1562.8	2.83
Hg (µg/L)	1[1]	15.05.24	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	0.07	<0.07	<0.07	0.87	0.09	<0.07
		02.10.24	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07
As (µg/L)	10[1]	15.05.24	0.64	0.53	0.8	1.59	<0.24	<0.24	1.83	0.32	0.31	0.47	0.34	0.28
		02.10.24	0.75	0.63	0.43	1.6	<0.24	<0.24	1.85	0.35	0.32	0.32	0.53	0.26
Sb (µg/L)	-	15.05.24	0.41	0.33	2.18	3.25	5.87	3.14	2.92	0.33	5.5	0.22	7.39	4.65
		02.10.24	11.2	11.03	9.07	9.78	10.66	10.95	9.62	10.18	9.94	9.85	4.55	10.46
Se (µg/L)	10[1]	15.05.24	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	1.02	3.19	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67
		02.10.24	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	<0.67	0.94	2.96	0.79	<0.67	3.06	<0.67
B (mg/L)	1[1]	15.05.24	0.009	0.022	0.072	0.011	0.008	0.008	0.074	0.032	0.018	0.028	0.01	0.008
		02.10.24	0.01	0.023	0.025	0.012	0.01	0.009	0.11	0.025	0.021	0.026	0.009	0.008
Asbestos (MFL)	7[2]	15.05.24	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		02.10.24	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

[1]Turkish Regulation on Waters Intended for Human Consumption

[2]EPA-Drinking Water Criteria Document for Asbestos (for asbestos fibers longer than 10 micrometers)

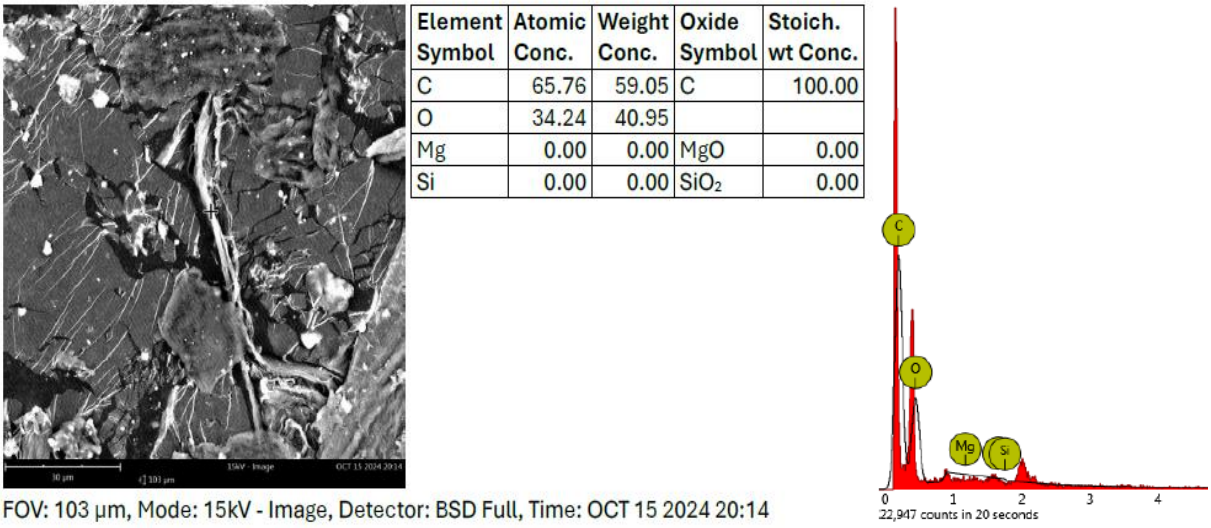


Figure 5 Asbestos detection imaging of the Erkenez-3 sample conducted by Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive X-Ray Analysis (SEM/EDXA)

arises from the insolubility of asbestos in water, which causes fibers to remain suspended and unevenly distributed. As a result, asbestos may be present in the water body but not captured during sampling, leading to non-detection in laboratory analyses.

In addition to analytical detection limitations, the evaluation of asbestos fiber transport in groundwater is constrained by complex subsurface retention and transport mechanisms. In many soil and subsurface environments, asbestos fibers are predominantly retained within the vadose zone due to mechanical filtration, pore straining, and electrostatic interactions with soil minerals, particularly in fine-textured or low-permeability media, thereby limiting direct infiltration into aquifer systems (Bradford et al., 2002; Ryan & Elimelech, 1996). Although experimental studies demonstrate that fibers can migrate through porous aquifer media under favorable hydrogeochemical conditions, such transport typically occurs at concentrations near current detection limits, hindering reliable characterization of migration pathways (Schreier, 1989). Moreover, analytical methods adapted from air and soil matrices exhibit limited sensitivity and reproducibility in groundwater due to low fiber abundance and matrix interferences, restricting the ability to directly link observed fiber occurrence with specific transport processes. Local increases in mobility may occur under specific geochemical conditions, such as elevated dissolved organic matter (Avataneo et al., 2023; Mohanty et al., 2021).

Based on the analytical data (Table 2), it is evident that at all 12 sampling locations within the study area, the combined concentrations of alkaline earth cations (Ca + Mg), expressed in meq/L, exceed those of the alkali cations (Na + K). Moreover, in 11 of the 12 samples, the total concentrations of weak-acid anions (HCO_3 + CO_3), expressed in meq/L, are greater than those of the strong-acid anions (SO_4 + Cl). These results indicate that the groundwater is predominantly governed by weak-acid anion chemistry. Analytical results illustrated on the Piper diagram (Figure 6) shows that the predominant hydrochemical facies of the groundwater samples is Ca–HCO_3. At the Türkoğlu-2 site, the facies shifts to Mg–HCO_3, while at the Adıyaman-3 site it transitions to Ca–SO_4. Overall, with the exception of one sampling point, the analytical findings indicate that the groundwater is characterized by a Ca–Mg–HCO_3 facies, which aligns with the lithological properties of the geological units through which the groundwater flows.

Analysis of the hydrochemical characteristics interpreted from the Piper diagrams indicates that the sampling points selected to represent upstream and downstream conditions in Türkoğlu, Elbistan, Erkenez, and Islahiye exhibit consistent hydrochemical signatures, with no observable discrepancies in upstream–downstream relationships at these sites. Conversely, although the sampling points located upstream of the Adıyaman debris disposal area display a Ca–HCO_3 facies, the downstream monitoring point, Adıyaman-3, is characterized by a Ca–SO_4 facies. This distinct hydrochemical pattern at Adıyaman-3 occurs at a location situated immediately downstream of, and in close proximity to, the debris disposal zone.

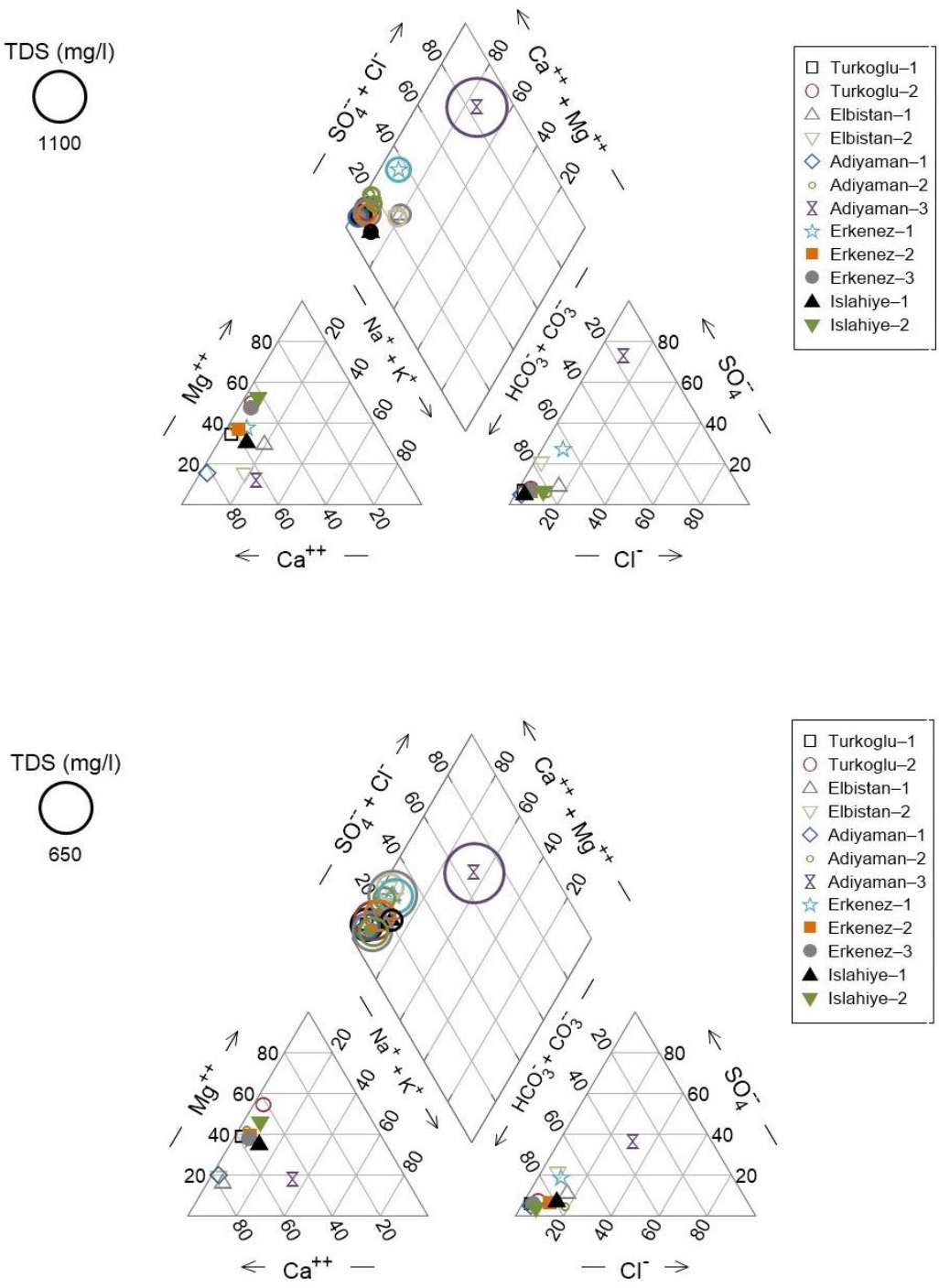


Figure 6 Piper Diagrams **a.** Wet Season of 2024 **b.** Dry Season of 2024

Evaluation of the analytical results indicates that the Adıyaman-1 and Adıyaman-2 stations, located upstream of the debris storage area, exhibit closely similar hydrochemical characteristics and are classified as Ca–HCO_3 type waters. In contrast, the surface water sample collected from the Adıyaman-3 station, located downstream of the debris storage area, displays the characteristics of a Ca–SO_4 type mixed water.

Based on the analytical results obtained during the wet season of 2024, it was determined that the concentrations of SO_4, Fe and Mn at the Adıyaman-3 station exceeded the limit values stipulated in the Regulation on Water Intended for Human Consumption. This elevated sulfate level is interpreted as anthropogenic in origin, resulting from waste materials stored within the debris collection area. Accordingly, the distinct facies observed for Adıyaman-3 on the Piper diagram is not attributed to a different recharge source but is instead understood to reflect sulfate contamination originating from the debris storage site.

Concrete and gypsum-based drywall, common in the earthquake rubble stored near the Adıyaman-3 site, act as rich point sources of calcium sulfate (Jang & Townsend, 2001; Kijjanapanich et al., 2013). The detection of elevated sulfate concentrations exclusively in the stream sample, while groundwater monitoring points remain below threshold levels, can be attributed to the distinct hydraulic connectivity and transport timescales of the two systems. The mobilization of sulfate from the debris likely occurs via rapid overland flow and shallow interflow, which discharge directly into the stream through advective transport during precipitation events. Conversely, for contaminants to reach the saturated groundwater zone, they must undergo vertical infiltration through the vadose zone. This unsaturated profile acts as a significant physical buffer, creating a multi-year lag time between the surface contamination event and its detection at the water table due to the slow vertical velocity of pore water and biogeochemical retention mechanisms (Dahan, 2020).

Furthermore, analysis of the samples collected during the dry season of 2024 at the same station revealed that Mn, Fe, Ni, and Al concentrations also exceeded the regulatory limits, and that heavy metal concentrations generally exhibited an increasing trend compared to the wet season. Several factors contribute to the higher concentrations of heavy metals in surface waters during dry periods compared to wet periods. Reduced water levels and diminished flow during dry conditions intensify water–metal interactions, resulting in elevated concentrations. Moreover, decreased erosion and reduced groundwater recharge during dry periods may further contribute to the accumulation of heavy metals. In contrast, increased water flow promote dilution and reduce overall metal concentrations during wet periods (Olías et al., 2004).

The average nitrate analysis results were measured at 21.93 mg/L during the wet period and 5.40 mg/L during the dry season. It was observed that the 50 mg/L threshold specified in the Regulation on the Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration was not exceeded at any individual sampling point during either period. In undisturbed hydrogeochemical conditions, the natural background concentration of nitrate-nitrogen (NO_3-N) within the intrinsic chemical matrix of groundwater typically does not exceed 1 mg/L (equivalent to approximately 4.4 mg/L NO_3). Concentrations surpassing this level generally indicate the impact of anthropogenic activities, such as agricultural runoff, wastewater discharge, industrial contamination. Metabolites of pesticides and fertilizers, such as nitrate, used over many years in agricultural areas, may remain undissolved, adsorbed in drainage channels and/or within the unsaturated soil profiles in regions within an extensive vadose zone (Hintze et al., 2020). Due to the seismically induced alterations in the hydrogeological framework, soil profiles that undergo instantaneous or permanent alterations in their saturation status may allow soil-adsorbed contaminants like nitrate to infiltrate into groundwater sources under the re-established physical conditions (Nakagawa et al., 2021). In the dry-season monitoring conducted in 2022 within the scope of the Asi Basin Hydrogeological Survey Project carried out by DSI, which also includes the Islahiye site and represents pre-earthquake conditions, the average nitrate concentration was measured as 23.56 mg/L. In the post-earthquake periods, average values of 32.17 mg/L, 16.36 mg/L, and 25.66 mg/L were recorded, respectively. The periodic increases observed following the earthquakes are considered to result from the migration of surface-derived contaminants into the saturated zones, facilitated by earthquake-induced structural and hydraulic alterations within the groundwater system. The analysis results of total organic carbon (TOC), another parameter monitored for the Asi Basin Hydrogeological Survey Project, likewise allow for assessments consistent with the post-earthquake alterations observed in the chemical status of the groundwater. Since the 2022 dry period, basin-average TOC analysis results have been measured as 2.86 mg/L, 3.51 mg/L, 6.52 mg/L, and 2.92 mg/L, respectively (DSI, 2025).Following the earthquakes, potential pressure factors, such as both regulated and unregulated debris disposal sites, damaged infrastructure systems, and tent settlements, have periodically elevated TOC concentrations. Thus, it is expected that, beyond the physicochemical variations caused by seasonal transitions, the values of nitrate and TOC will revert to pre-earthquake averages following natural attenuation processes resulting from biochemical reactions occurring over time. A study conducted after the Gyeongju Earthquake (2016) reported that the concentration of organic matter, and consequently the activity of microorganisms, increased due to the geochemical and biochemical conditions altered by the earthquake (Kim et al., 2020).

The transport and fate of nitrate in groundwater systems are primarily governed by advective-dispersive mechanisms, yet these processes are significantly amplified by seismically induced hydrogeological changes. Nitrate is highly soluble and acts as a conservative tracer in oxygenated aquifers; however, earthquake-induced fracturing can create preferential flow paths, accelerating the vertical migration of vadose-zone contaminants into saturated zones.(Hosono et al., 2020). The initial post-earthquake spike in nitrate observed in this study is consistent with the rapid flushing of pore water containing accumulated fertilizers and shallow wastewater through these newly formed high-permeability fissures. Subsequently, the observed attenuation of nitrate levels toward pre-earthquake averages suggests the re-establishment of biochemical equilibrium. This reduction is likely driven by heterotrophic denitrification, a process heavily

dependent on the availability of electron donors. The concurrent monitoring of Total Organic Carbon (TOC) provides critical insight here; the periodic elevations in TOC recorded in the basin likely served as the necessary substrate to facilitate the microbial reduction of nitrate to nitrogen gas or nitrous oxide (Rivett et al., 2008). Thus, the temporal dataset indicates a dual-phase response: an initial advection-dominated contamination event followed by a biogeochemical stabilization phase mediated by organic carbon availability.

In addition to nutrient parameters, the analysis results of heavy metal parameters also indicated exceedances considering national drinking water standards. In site-specific studies at the Islahiye study area, no analysis results posing a risk were obtained at the Islahiye-2 monitoring point, which is upstream and not expected to be affected by contamination originating from the debris disposal. However, heavy metal exceedances were detected at the Islahiye-3 monitoring point, which is located downstream and in close proximity to the debris disposal site. The Islahiye geological formation, which encompasses the Islahiye debris disposal site and monitoring points, is composed of Quaternary-aged basalt, tuff, and volcanic units. Given that the study area includes magmatic rocks of volcanic origin, the monitoring carried out in the Islahiye site is inherently insufficient to conclusively determine the source of the heavy metal contamination. In the 2022 dry-season monitoring representing pre-earthquake conditions, conducted under the Asi Basin Hydrogeological Survey Project, no heavy metal exceedances were observed in the monitoring point situated on the Islahiye Formation. Therefore, the concentrations of iron, lead, manganese, nickel, and aluminum that surpassed threshold values in the 2024 dry period monitoring, observed downstream of the Islahiye site, are attributed to contaminants infiltrating the groundwater from the debris disposal site. Heavy metal concentrations in samples collected during the wet season are thought to remain lower due to the dilution effect. An increase in the concentration of heavy metals in the surrounding aquatic environment may be observed following large-scale earthquakes. A recent study examined the elevations in heavy metal levels in ecosystems after earthquakes and assessed the potential toxicological effects of these processes (Ota et al., 2021). The study specifically highlights the potential for heavy metal concentrations to fluctuate in correlation with earthquake magnitude, potentially leading to persistent effects on local aquatic ecosystems. The findings reveal that such events must be considered not only for environmental contamination but also for ecosystem health.

When a general assessment is conducted by considering the geological settings, the absence of detectable asbestos at all sampling points indicates that, although asbestos-bearing materials may be present within earthquake debris as an anthropogenic source, fibrous particles are largely retained within the vadose zone and unconsolidated sediments due to mechanical filtration and limited vertical mobility, thereby restricting their transfer into groundwater. This attenuation is consistent with the geological setting dominated by Quaternary alluvium, carbonate units, volcano-sedimentary formations, and basaltic rocks. In the Adıyaman site, groundwater recharge occurs predominantly from a karstic system, and no contaminants were detected at sampling points of the recharge area, suggesting effective natural protection. However, elevated sulfate and heavy metal concentrations were detected in the downstream surface-water sample indicating that contaminants derived from the debris disposal area are preferentially transported by surface runoff and shallow subsurface flow. At the Islahiye site, shallow infiltration through fractured basalt and pyroclastic units and surface runoff likely enhance the mobilization of metal-bearing constituents from construction debris, resulting in localized increases in heavy metal concentrations near the disposal area. In alluvial settings such as Erkenez and Türkoğlu, heterogeneous permeability and dilution effects may partially attenuate contaminant levels. Overall, the observed spatial variability reflects the combined influence of anthropogenic source loading and geological controls on contaminant transport pathways and attenuation mechanisms.

4 Conclusions

As supported by the findings of this study, earthquakes can influence groundwater quality over the long term, both physically and chemically. While mechanisms such as the restructuring of groundwater flow systems, mineral dissolution, and shifts in microbial activity play important roles, various contaminants originating from improperly stored post-earthquake debris and damaged infrastructure systems may also impact water resources. Monitoring and controlling these effects are therefore critical to ensuring the sustainable management of groundwater resources.

Future research efforts will focus on improving the characterization of post-seismic groundwater behavior through an expanded and longer-term monitoring strategy. A key priority will be the continued measurement of nutrient and heavy metal concentrations across additional monitoring cycles to quantify potential upward or downward trends with greater temporal resolution. This continuous trend analysis is

crucial for validating the projected natural attenuation rates and assessing the duration required for hydrogeochemical recovery toward pre-seismic baseline conditions. To strengthen the overall assessment of contaminant pathways, the monitoring program will also be extended to include emerging compounds of concern. In particular, future campaigns will incorporate the analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and their transformation products, which are highly persistent and may exhibit increased mobility under altered hydraulic and geochemical conditions produced by seismic events.

Acknowledgements The authors would like to express their sincere thanks to Yılmaz Sıddık Doğruluk and Şeyda Güneş of the DSI Kahramanmaraş 20th Regional Branch for their collaboration and support during sampling and field investigations. The authors also wish to express their gratitude to Kader Akyıldız Satılmış and Nami Erdoğan for their valuable insights on the geological and hydrogeological assessments presented in this study.

Açık Erişim ve Telif Hakkı: All articles published in the DSİ Technical Bulletin 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 research article published in the DSİ Technical Bulletin is retained by the author(s).

References

Avataneo, C., Capella, S., Luiso, M., Marangoni, G., Lasagna, M., De Luca, D. A., Bergamini, M., Belluso, E., & Turci, F. (2023). Waterborne asbestos: Good practices for surface waters analyses. *Frontiers in Chemistry*, *11*, 1104569. https://doi.org/10.3389/FCHEM.2023.1104569/BIBTEX

Benmenni, M. S., & Benrachedi, K. (2010). Impact of Earthquake Demolition Debris on the Quality of Groundwater. *American Journal of Applied Sciences*, *7*(4), 545–550. https://doi.org/10.3844/AJASSP.2010.545.550

Bradford, S. A., Yates, S. R., Bettahar, M., & Simunek, J. (2002). Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media. *Water Resources Research*, *38*(12), 63–1. https://doi.org/10.1029/2002WR001340

Dahan, O. (2020). Vadose Zone Monitoring as a Key to Groundwater Protection. *Frontiers in Water*, *2*, 599569. https://doi.org/10.3389/FRWA.2020.599569

DSI. (2015). *CEYHAN HAVZASI MASTER PLANI*.

DSI. (2016). *FIRAT-DİCLE HAVZASI MASTER PLANI*.

DSI. (2025). *ASİ HAVZASI HİDROJEOLOJİK ETÜT PROJESİ*.

EPA. (1985). *Drinking Water Criteria Document for Asbestos (Final Draft)*.

Fronzi, D., Mirabella, F., Cardellini, C., Caliro, S., Palpacelli, S., Cambi, C., Valigi, D., & Tazioli, A. (2021). The role of faults in groundwater circulation before and after seismic events: Insights from tracers, water isotopes and geochemistry. *Water (Switzerland)*, *13*(11), 1499. https://doi.org/10.3390/W13111499/S1

Hintze, S., Glauser, G., & Hunkeler, D. (2020). Influence of surface water – groundwater interactions on the spatial distribution of pesticide metabolites in groundwater. *Science of the Total Environment*, *733*, 139109. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139109

Hosono, T., Yamada, C., Manga, M., Wang, C. Y., & Tanimizu, M. (2020). Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains. *Nature Communications 2020 11:1*, *11*(1), 2776-. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16604-y

Jang, Y. C., & Townsend, T. (2001). Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris

fines. *Advances in Environmental Research*, *5*(3), 203–217. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00056-3

Kijjanapanich, P., Annachhatre, A. P., Esposito, G., van Hullebusch, E. D., & Lens, P. N. L. (2013). Biological sulfate removal from gypsum contaminated construction and demolition debris. *Journal of Environmental Management*, *131*, 82–91. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2013.09.025

Kim, H., Kaown, D., Kim, J., Park, I. W., Joun, W. T., & Lee, K. K. (2020). Impact of earthquake on the communities of bacteria and archaea in groundwater ecosystems. *Journal of Hydrology*, *583*, 124563. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.124563

Macher, G. Z., Torma, A., & Beke, D. (2025). Examining the Environmental Ramifications of Asbestos Fiber Movement Through the Water–Soil Continuum: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *22*(4), 505. https://doi.org/10.3390/IJERPH22040505

Malinconico, S., Paglietti, F., Serranti, S., Bonifazi, G., & Lonigro, I. (2022). Asbestos in soil and water: A review of analytical techniques and methods. *Journal of Hazardous Materials*, *436*. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129083

Mavroulis, S., Mavrouli, M., Vassilakis, E., Argyropoulos, I., Carydis, P., Lekkas, E., Mavroulis, S., Mavrouli, M., Vassilakis, E., Argyropoulos, I., Carydis, P., & Lekkas, E. (2023). Debris Management in Turkey Provinces Affected by the 6 February 2023 Earthquakes: Challenges during Recovery and Potential Health and Environmental Risks. *Applied Sciences 2023, Vol. 13, 13*(15). https://doi.org/10.3390/APP13158823

Mohanty, S. K., Salamatipour, A., & Willenbring, J. K. (2021). Mobility of asbestos fibers below ground is enhanced by dissolved organic matter from soil amendments. *Journal of Hazardous Materials Letters*, *2*, 100015. https://doi.org/10.1016/J.HAZL.2021.100015

Molla, A. S., Tang, W., Sher, W., Bahar, M. M., & Bekele, D. N. (2025). The Effects of Construction and Demolition Waste (C&DW) Fine Residues on Landfill Environments: A Column Leaching Experiment. *Toxics*, *13*(5), 370. https://doi.org/10.3390/TOXICS13050370

Nakagawa, K., Shimada, J., Yu, Z. Q., Ide, K., & Berndtsson, R. (2021). Effects of the Japanese 2016 kumamoto earthquake on nitrate content in groundwater supply. *Minerals*, *11*(1), 1–17. https://doi.org/10.3390/MIN11010043

Nollet, L. M. L., & De Gelder, L. S. P. (2013). HANDBOOK OF WATER ANALYSIS: THIRD EDITION. *Handbook of Water Analysis: Third Edition*, 1–943. https://doi.org/10.1201/B15314/HANDBOOK-WATER-ANALYSIS-LEO-NOLLET-LEEN-DE-GELDER/RIGHTS-AND-PERMISSIONS

Olías, M., Nieto, J. M., Sarmiento, A. M., Cerón, J. C., & Cánovas, C. R. (2004). Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (South West Spain). *Science of The Total Environment*, *333*(1–3), 267–281. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2004.05.012

Ota, Y., Suzuki, A., Yamaoka, K., Nagao, M., Tanaka, Y., Irizuki, T., Fujiwara, O., Yoshioka, K., Kawagata, S., Kawano, S., & Nishimura, O. (2021). Geochemical distribution of heavy metal elements and potential ecological risk assessment of Matsushima Bay sediments during 2012–2016. *Science of The Total Environment*, *751*, 141825. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141825

Peña-Castro, M., Montero-Acosta, M., & Saba, M. (2023). A critical review of asbestos concentrations in water and air, according to exposure sources. *Heliyon*, *9*(5), e15730. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E15730

Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N., & Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, *42*(16), 4215–4232. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2008.07.020

Rusiñol, M. (2023). Waterborne viruses in urban groundwater environments. *PLOS Water*, *2*(8), e0000168. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PWAT.0000168

Ryan, J. N., & Elimelech, M. (1996). Colloid mobilization and transport in groundwater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *107*, 1–56. https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03384-X

Schreier, H. . (1989). *Asbestos in the natural environment*. 159.

Şimşek, C., Akinci, G., Fistikoğlu, O., Canli, K., Sözbilir, H., Ayol, A., & Bilgiç, E. (2024). Response of water resources to the Kahramanmaraş earthquakes (MW 7.7 and MW 7.6)that occurred on February 6, 2023, on the East Anatolian Fault Zone (Türkiye). *Turkish Journal of Earth Sciences*, *33*(1), 69–84. https://doi.org/10.55730/1300-0985.1899

WHO. (2021). *Asbestos in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality*. https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-WSH-2021.4

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147, p55-63 / Technical Bulletin of DSİ, January 2026, Issue:147, p55-63

Araştırma Makalesi / Research Article

Yeraltı Suyu Suni Beslemenin Önemi: Kemalpaşa (Sinancılar, İzmir) Uygulaması

Importance of Artificial Groundwater Recharge: A Case Study from Kemalpaşa (Sinancılar, İzmir)

Meral ERDOĞAN TOPÇUOĞLU[1*], Ergin DOĞAN[1], Adem SÖMER[1]

[1]Devlet Su İşleri 2. Bölge Müdürlüğü, Yeraltısuları Şube Müdürlüğü, Bornova-İzmir

**Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: erdoganmer@itu.edu.tr*

Geliş (Received): 12.12.2025, Düzeltme (Revised): 15.01.2026, Kabul (Accepted): 19.01.2026

ÖZ

Devlet Su İşleri (DSİ) 2. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde kalan Gediz Havzası Kemalpaşa Alt Havzasında Yeraltı suyu (YAS) Sulama Kooperatif bölgesinde yeraltı suyu seviyesini arttırmak amacıyla yağışlı dönem sularının alüvyon ortamdan yeraltına derive edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda İzmir ili, Kemalpaşa ilçesi, Sinancılar mahallesinde 4m x 5m x 5m ve 5m x 6m x 5m boyutlarında 2 adet süzdürme havuzu (Sinancılar-1 YAS Suni Besleme ve Sinancılar-3 YAS Suni Besleme) yapılmıştır. Ayrıca bu havuzlara ek olarak, 1 adet kullanılmayan keson kuyu (Sinancılar-2 YAS Suni Besleme) kullanılarak toplamda 3 noktada YAS suni besleme yapılmaktadır. Söz konusu YAS suni besleme uygulamasında Sinancılar deresinden alınan yüzey suları kullanılmaktadır. YAS beslenim miktarı minimum 3 l/s ve maksimum 7 l/s aralığında olmak üzere yılda 8 ay boyunca yapılmaktadır. Söz konusu havuzların süzülme miktarları; hacimleri ve yüzey alanları ile doğru orantılıdır. Yeraltı suyu seviye takibi amacıyla proje alanında rasat kuyusundan manuel ve uzaktan erişimli online ölçümler yapılmaktadır. 2023 YAS Suni Besleme sezonu sonunda rasat kuyularında yapılan ölçümler değerlendirildiğinde, önceki yıllara göre, yaklaşık 3-5 metrelik bir yükselme meydana geldiği görülmüştür. Yapılan çalışma ile alt havzada yer alan YAS kooperatifi işletme kuyularındaki yeraltı suyu seviyelerindeki düşümün önlenerek enerji maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı suyu suni besleme, süzdürme havuzu, alüvyon akifer, Gediz Havzası, yeraltı suyu seviye izleme

ABSTRACT

Within the boundaries of the DSİ 2nd Regional Directorate, it is aimed to recharge groundwater by diverting wet-season run off into the aquifer through alluvial material in the groundwater irrigation cooperative area located in the Kemalpaşa Sub-basin of the Gediz Basin. In this context, two infiltration ponds measuring 4 m x 5 m x 5 m and 5 m x 6 m x 5 m (Sinancılar-1 GW Artificial Recharge – Sinancılar-3 GW Artificial Recharge) were constructed in Sinancılar Neighborhood of Kemalpaşa District, İzmir Province. In addition to these ponds, one unused caisson well (Sinancılar-2 GW Artificial Recharge) is also utilized, and groundwater artificial recharge is carried out at a total of three points. In this GW artificial recharge application, surface water taken from the Sinancılar Stream is used. The groundwater recharge rate ranges between a minimum of 3 L/s and a maximum of 7 L/s, and the recharge operation is conducted for 8 months each year. The infiltration amounts of the ponds are directly proportional to their volumes and surface areas. For groundwater level monitoring, manual and remote-access online measurements are performed from an observation well within the project area. At the end of the 2023 GW Artificial Recharge season, evaluations of the measurements taken from the observation wells showed an increase of approximately 3–5 meters compared to previous years. With this study, it is aimed to prevent the decline in groundwater levels in the operation wells of the groundwater cooperative located in the sub-basin and thereby reduce energy costs.

Keywords: Artificial Recharge, infiltration basin, alluvial aquifer, Gediz Basin, groundwater level monitoring

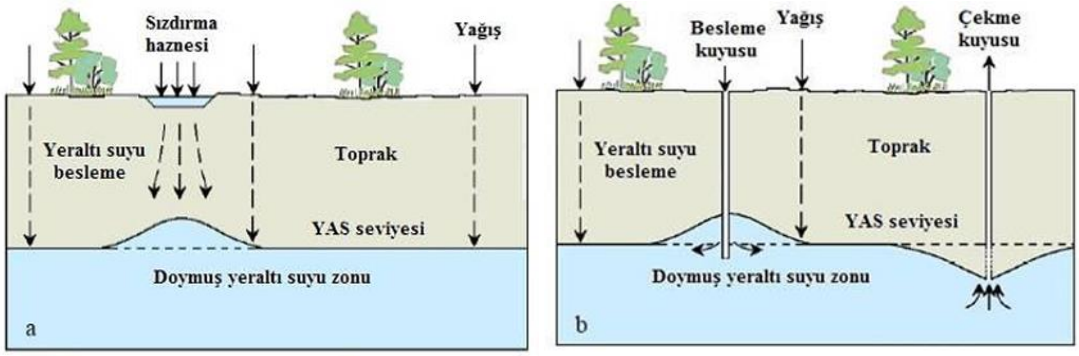
1 Giriş

Türkiye'de bulunan su kaynakları üzerindeki baskıların son yıllarda arttığı görülmektedir. İklim değişikliğiyle birlikte yağış miktarı azalmakta, yağışın zamansal dağılımı düzensizleşmekte, yaz aylarında yeraltısuyu çekimleri hızla artmakta ve yüzeysel akışın önemli bir bölümü denize ulaşarak sistem dışına çıkmaktadır (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, 2021; DSİ Genel Müdürlüğü, 2014). Yeraltısuyu, Türkiye'de tarımsal sulamanın yaklaşık yarısını karşılayan stratejik bir su kaynağıdır; ancak son yıllarda doğal yenilenme hızı mevcut kullanım hızının gerisinde kalmaktadır (DSİ Genel Müdürlüğü, 2023). Bu nedenle suni besleme uygulamaları, özellikle iklim değişikliğine uyum ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından temel araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Dillon vd., 2019; Korkut, 2025).

İzmir Bornova Ovası'nda 1970'li yıllardan itibaren, kış aylarında yüzey sularının kontrollü olarak alüvyon akifere verilmesi yoluyla yeraltısuyu seviyelerinin desteklenmesi amaçlanmıştır. Ancak bu dönemde yapılan çalışmaların çoğu gözlem amaçlıdır**.** Peksezer (2010), Küçük Menderes Havzası'nda taşkın dönemlerinde oluşan yüzey sularının besleme havuzları aracılığıyla yeraltısuyuna kazandırılmasını ele almış; MODFLOW (MODular finite-difference FLOW model) tabanlı yeraltısuyu modeli ile farklı besleme senaryolarının akifer seviyeleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, uygun koşullarda suni beslemenin yeraltı suyu seviyelerini artırabileceğini göstermiştir. Bunu takiben Peksezer ve Yazıcıgil (2011), aynı havzada yapay besleme uygulamalarının yeraltı suyu bütçesine katkısını değerlendirmiş ve suni beslemenin, kontrolsüz çekimlerin devam ettiği alanlarda tek başına yeterli olmayacağını vurgulamıştır. Benzer şekilde Sayit ve Peksezer (2012), suni besleme yapılarının etkisini iki boyutlu yeraltı suyu modelleri ile analiz ederek, besleme alanı seçiminin başarının anahtarı olduğunu ortaya koymuştur. Ali ve Doğan (2017), Şanlıurfa'da bulunan Büyük Cırcıp Yeraltı Suyu Besleme Barajı örneğinde, rezervuardan akifere gerçekleşen sızma süreçlerini HYDRUS-1D modeli ile incelemiş ve taşkın sularının yeraltında depolanmasının teknik olarak mümkün olduğunu göstermiştir. Apaydın (2022), Türkiye genelinde inşa edilen ve planlanan yeraltı barajlarını hidrojeolojik açıdan değerlendirmiş; yanlış yer seçiminin suni besleme projelerinin başarısını ciddi biçimde sınırladığını belirtmiştir. Mouhoumed vd. (2024), Kayseri kentinde kuru kuyu yöntemiyle suni besleme için uygun alanları CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri), DRASTIC kırılganlık analizi ve çok ölçütlü karar verme yöntemleriyle belirlemiş; kentsel MAR (Managed Aquifer Recharge), uygulamalarında miktar kadar kalite riskinin de belirleyici olduğunu göstermiştir. Türkiye'de MAR literatürünü bütüncül biçimde ele alan güncel bir derleme çalışma Korkut (2025) tarafından sunulmuştur.

Söz konusu çalışmalarda, Türkiye'de gerçekleştirilen suni besleme uygulamalarının büyük ölçüde pilot ve sınırlı ölçekli kaldığı; kalıcı ve etkin sonuçların elde edilebilmesi için yeraltı suyu çekimlerinin kontrol altına alınması, düzenli izleme sistemlerinin kurulması ve entegre havza yönetimi yaklaşımının benimsenmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Dillon vd., 2019; DSİ Genel Müdürlüğü, 2014; Korkut, 2025). Bu yaklaşım doğrultusunda, Gediz Havzası Kemalpaşa Alt Havzası'nda baraj ve gölet yapımına elverişli olmayan, ancak yüzey suyu potansiyeli yüksek alanlarda, havuz ve kuyu sistemleri aracılığıyla yeraltı suyunun suni beslenmesine yönelik projeler geliştirilmiştir (Şekil 1).

Bu kapsamda, Kemalpaşa Alt Havzası'nda yer alan Sinancılar Yeraltı Suyu Sulama Kooperatifi'ne yarar sağlamak amacıyla, yağışlı dönemlerde yüzeysel akışa geçen suların alüvyon akifere süzdürülmesi hedeflenmiştir.



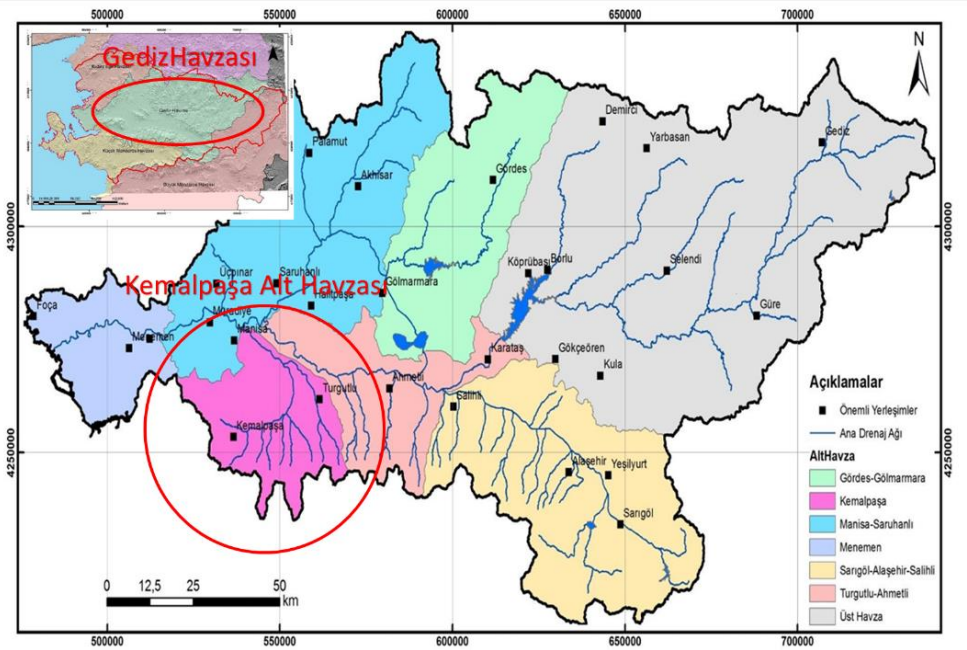
Şekil 1. Yeraltı suyu suni besleme yöntemleri (a: süzdürme havuzları b: kuyular vasıtasıyla) (URL-1)

Bu amaçla, kooperatif sahasına yakın konumda bulunan iki adet süzdürme havuzu ile bir adet kullanılmayan keson kuyu çalışma kapsamında değerlendirilmiş olup toplamda üç ayrı noktada yeraltı suyu suni besleme çalışmaları yürütülmektedir. Söz konusu uygulamalar ile yüzey sularının yeraltında depolanarak akifer seviyelerindeki düşümün azaltılması hedeflenmektedir.

2 Materyal ve Metot

2.1 Çalışma Alanı

DSİ Genel Müdürlüğü (2014) çalışmasına göre Gediz Havzası hidrolojik ve hidrojeolojik çalışmaların daha sağlıklı yürütülebilmesi için alt havzalara bölünmüştür. Gediz Nehri su toplama alanı 17176 km^2 olarak tespit edilmiştir. Havzanın çevresi ise 1166 km olarak hesaplanmıştır. Kemalpaşa Alt Havzası, Gediz Havzasının en önemli alt havzalarından biri olup, güneybatısında 38^0 15' ve 38^0 39' kuzey enlemleri; 27^0 14' ve 27^0 48' doğu boylamları arasında yer almaktadır. Havza toplam olarak 1071,04 km^2 olup büyük bölümü ova ile kaplıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Gediz Havzası ve Kemalpaşa Alt Havzasının konumu (DSİ, 2014).

Gediz havzası gerek hidrojeolojik özellikleri gerekse yüzey suyu potansiyeli açısından yeraltı suyu suni besleme uygulamalarına büyük oranda uygunluk sergilemektedir. Söz konusu koşullar; alanda suni besleme faaliyetlerinin etkinliğini artıran ve uygulamanın sürdürülebilirliğini destekleyen uygun bir hidrolojik-hidrojeolojik ortam özelliği göstermektedir (DSİ, 2014).

3 Bulgular

3.1 Jeoloji ve Hidrojeoloji

Gediz Havzasında temeli, Menderes Masifine ait metamorfik kayalar oluşturmaktadır. Menderes Metamorfikleri farklı evrelerde granitoid ve gabro bileşimli kayalar tarafından kesilmiştir. Menderes metamorfiklerinin üzerine bindirme fayları ile İzmir-Ankara Zonu'na ait kaya birimleri gelmektedir. İzmir-Ankara Zonu, ofiyolit ve flişten oluşan tektonik kuşak şeklindedir. Bu birimler üzerine ise uyumsuz olarak karasal ve gölsel istiflere ait Neojen sedimentler, volkanik ve magmatik birimler gelmektedir. Gediz havzası içerisinde yukarıda bahsedilen birimler Kuvaterner yaşlı bazalt ve alüvyonlar tarafından örtülmektedir (DSİ, 2014)

Çalışma alanında ise temeli Kemalpaşa Alt Havzasının doğusunda yer alan Menderes masifine ait metamorfik kayalar oluşturmaktadır. Temel kayaların üzerine Geç Kretase yaşlı Bornova Karmaşığı (Bornova fliş zonu) gelmektedir. Bornova fliş zonu üzerine açısal uyumsuzlukla Dereköy formasyonu gelmektedir. Dereköy formasyonu üzerine uyumlu olarak Vişneli formasyonu gelmektedir. Vişneli formasyonu üzerine açısal uyumsuzlukla Kızılca Formasyonu; üzerine yine açısal uyumsuzlukla Sütçüler Formasyonu gelmektedir. Kuvaterner yaşlı alüvyon tüm birimleri uyumsuzlukla örtmektedir.

Kemalpaşa Alt Havzasında alüvyon, Neojen yaşlı kırıntılı birimler, Mesozoyik yaşlı karstik kayalar ve Paleozoyik yaşlı kayalar yeraltı suyu kütleleri olarak tanımlanmıştır (DSİ, 2014). Bölgedeki en önemli yeraltı suyu kütlesini taneli birimler (alüvyon) oluşturmaktadır.

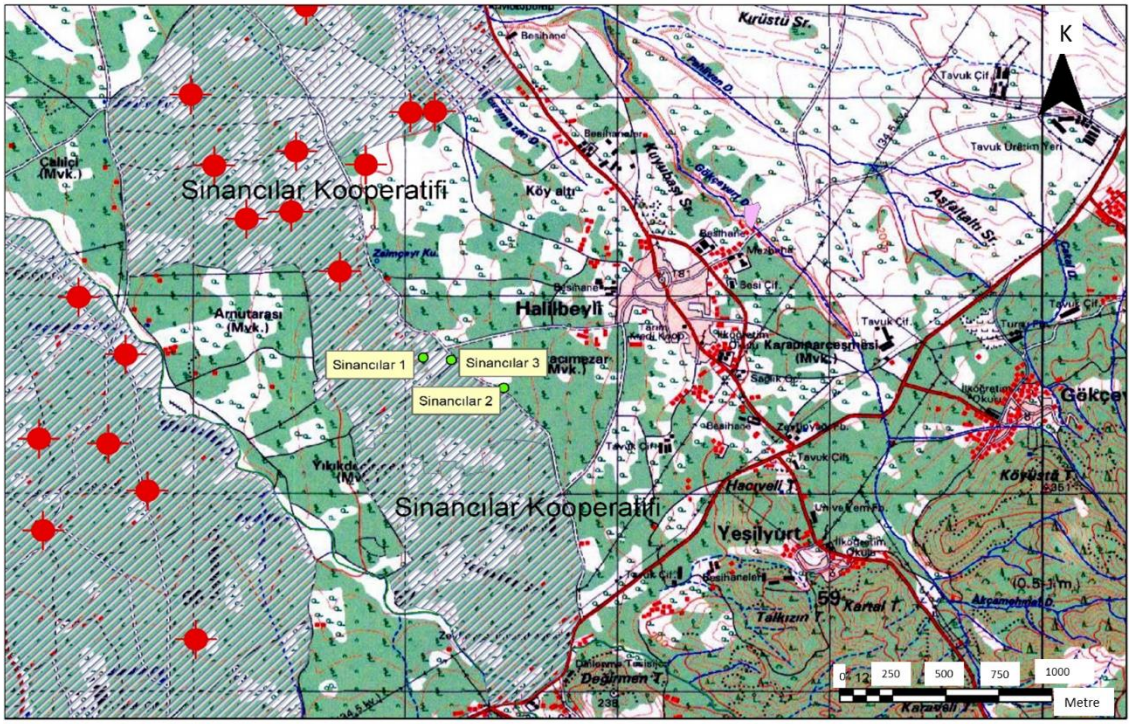
Kemalpaşa Alt Havzası boyunca uzanan alüvyon dolgu geniş bir yüzey alanına sahiptir ve bölgenin en verimli yeraltı suyu kütlesini oluşturmaktadır. Havza genelinde alüvyon örtünün:

- Alanı**:** Yaklaşık 20–25 km²
- Kalınlığı**:** Yer yer 30–80 m arasında
- Taneli birim niteliği**:** Çakıl–kum ardalanması
- Hidrolik iletkenlik (K)**:** 1×10^{-3} – 5×10^{-3} m/s
- Porozite**:** % 20–35 arasında

olduğu saha çalışmaları ile belirlenmiştir. Bu değerler, akiferi suni besleme uygulamaları açısından son derece uygun kılmaktadır. Suni besleme çalışmalarında, derive edilen yüzey sularına ait su kalitesi kirlilik parametreleri değerlendirilmiş ve su kalitesinin uygun bulunması üzerine ilgili alanlarda suni besleme faaliyetlerine başlanmıştır.

3.2 Suni Besleme Yapıları

Sinancılar Mahallesi'nde, Sinancılar Deresi'nden temin edilen yüzey sularının kontrollü olarak yeraltına derive edilmesi amacıyla iki adet süzdürme havuzu (Sinancılar-1 ve Sinancılar-3) inşa edilmiştir. Bu havuzlara ek olarak, bölgede kullanım dışı durumda bulunan bir keson kuyunun (Sinancılar-2) suni besleme amacıyla sisteme entegre edilmesiyle birlikte, toplam üç ayrı noktada YAS suni besleme yürütülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Sinancılar YAS Beslenim alanı ve Kooperatif alanı-kuyuları (Taralı alanlar: Sinancılar Kooperatifi Sulama Alanı, Kırmızı renkli kuyu sembolleri: Kooperatif Kuyuları, Yeşil Renkli noktalar: YAS Besleme Lokasyonları)

Sinancılar Mahallesi'nde yeraltı suyu potansiyelinin artırılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen yapay besleme çalışmaları kapsamında, alanda 4m × 5m × 5m ve 5m × 6m × 5m boyutlarında iki adet süzdürme havuzu inşa edilmiştir (Şekil 4-5). Söz konusu havuzlar, yeraltı suyunun doğal beslenme süreçlerini taklit eden ve yüzey suyunun kontrollü bir şekilde doygun olmayan bölgeye (vadoz bölgesi) iletilmesini sağlayan mühendislik yapıları olarak tasarlanmıştır.

Havuzların içerisine, uygulamanın hidrolik performansını artırmak ve infiltrasyon kapasitesini maksimize etmek amacıyla, belirlenen boyutlarla uyumlu şekilde çakıl malzemesi yerleştirilmiştir. Çakıl dolgu malzemesi seçilirken; çakılların eş boyutlu ve maksimum boşluk oluşturacak yapıda olması tercih edilmiştir. Çakıl dolgusu, yüksek porozite ve hidrolik iletkenlik özellikleri sayesinde suyun yüzeyden akifere doğru geçişini hızlandırarak suni besleme verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Besleme suyunun havuzlara kontrollü bir şekilde iletilmesi amacıyla, uygulama sahasında açılmış bulunan su alma yapısına filtre yerleştirilmiştir. Böylece boru içerisine girme potansiyeli bulunan partiküllerin yeraltı suyu suni besleme sisteminin içerisine girmesi ve sistemi kirletmesinin önüne geçilmiştir.

Filtreli boru sistemi, özellikle süzdürme havuzlarının tıkanmasını engellemede önemli bir mühendislik çözümü sunmakta ve suyun infiltrasyon hızının uzun vadede sabit kalmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 4. Sinancılar 1 yeraltı suyu suni besleme çalışmaları. (a-b. besleme çukurunun ekskavatör ile açılması, c. çukur içerisine filtre malzemesinin (çakıl) dökülmesi, d. filtreli borunun yerleştirilmesi, e. koruyucu malzemenin serilmesi.)

Süzdürme havuzlarında karşılaşılan en kritik sorunlardan biri olan taneler arası boşlukların ince materyal ile tıkanması riskinin azaltılması için, havuz yüzeyleri plastik örtü ile kapatılmıştır. Bu uygulama, hem rüzgar ve yüzey akışlarıyla taşınabilecek ince taneli sedimentlerin havuz içerisine girişini sınırlamakta hem de yağış ve yüzey çevrimi gibi dış etkilerin havuzun filtrasyon yapısını bozmasını engellemektedir. Böylece, yapının uzun dönemli sürdürülebilirliği ile besleme kapasitesi korunmuş olmaktadır.

Havuzlara iletilen su miktarı, sisteme entegre edilen mekanik sayaç aracılığıyla düzenli olarak ölçülmekte olup, tüm debi ve hacim ölçümleri kayıt altına alınmaktadır. Bu veriler, yapay besleme uygulamasının etkinliğinin değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir. Ayrıca, Şekil 5 ve 6'da gösterildiği gibi süzdürme havuzlarına ilave olarak bölgede bulunan ve kullanılmayan bir keson kuyu sisteme dahil edilerek bu lokasyonda da YAS suni besleme yapılmaktadır.



Şekil 5. Sinancılar 3 suni besleme çalışmaları. (a. Ekskavatör ile kazı çalışması; b. debi ölçüm ekipmanının (su sayacı) kurulumu; c. Besleme çukuru kazısının tamamlanması. d. besleme çukurunun derinleştirilmesi. e. Saha incelemesi sırasında teknik personelin besleme alanını yerinde değerlendirmesi. f. Koruyucu malzeme serilmesi işlemi.)



Şekil 6. Sinancılar 2 yeraltısuyu suni besleme çalışmaları. (a. mini ekskavatör ile besleme çukuru kazısının yapılması; b. saha kontrolü; c. debi ölçüm ekipmanının (su sayacı) kurulumu)

Keson kuyunun sisteme dâhil edilmesi, hem mevcut altyapının yeniden işlevlendirilerek değerlendirilmesine olanak sağlamış hem de besleme suyunun akifere daha derin seviyelerden doğrudan iletilmesine imkân tanımıştır. Bu tür kuyular, geniş çapa sahip yapıları ve yüksek sızma yüzey alanları nedeniyle, özellikle geçirgenliği yüksek zeminlerde suni besleme verimliliğini artıran önemli bir hidrojeolojik bileşen olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, çok noktalı besleme sistemlerinin sağladığı mekânsal çeşitlilik sayesinde, akifer yenilenme performansının artırılması ve yeraltı suyu seviyelerinin daha dengeli bir şekilde yükseltilmesine katkıda bulunmaktadır. Söz konusu suni besleme projeleri, dış etkenlere karşı korunması ve işletme güvenliğinin sağlanması amacıyla kapalı bir kabin içerisinde muhafaza altına alınmıştır. Bu kabin içerisinde yer alan vana ve debi kontrol elemanları sayesinde sisteme verilen su miktarı düzenli olarak izlenmekte ve besleme işlemi kontrollü bir şekilde yürütülmektedir (Şekil 7).

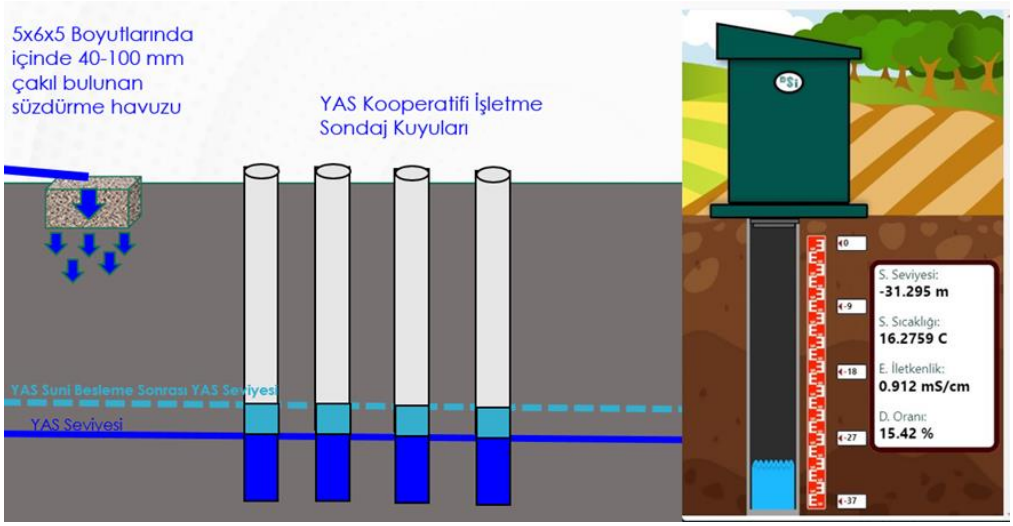


Şekil 7. Kemalpaşa Sinancılar yeraltı suyu (YAS) suni besleme projeleri.

YAS suni besleme uygulamalarında sisteme verilen su miktarı, minimum 3 l/s ile maksimum 7 l/s aralığında değişmekte olup, besleme işlemi yılın yaklaşık sekiz ayı boyunca sürdürülebilir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu debi aralığı, hem havuzların hidrolik kapasitesine hem de akiferin su kabul edebilirlik özelliklerine uyum sağlayacak biçimde belirlenmiştir. Minimum 3 l/s debi, besleme uygulamasının akifer üzerinde ölçülebilir ve sürdürülebilir bir hidrolik etki oluşturabilmesi için gerekli olan alt eşik değeri temsil etmektedir. Bu değerin altında gerçekleştirilen besleme uygulamalarında, yeraltı suyu seviye gözlem kuyularında kayda değer bir seviye artışı oluşmadığı düzeye ulaşmadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla 3 l/s, beslemenin hidrolik açıdan etkinliğini sağlayan en düşük işletme debisi olarak kabul edilmiştir. Maksimum 7 l/s debi ise akiferin doğal kabul kapasitesi ve süzülme yeteneği dikkate alınarak belirlenen üst güvenlik sınırını ifade etmektedir. Bu değerin aşılması durumunda, besleme havuzlarında yüzeysel birikme, infiltrasyon veriminde düşüş, ince tanelerin hareketlenmesine bağlı gözenek tıkanması ve hidrolik iletkenlikte azalma gibi olumsuz etkilerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle 7 l/s, sistemin güvenli, sürdürülebilir ve verimli işletilmesi açısından üst sınır olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, 3–7 l/s aralığı, yeraltı suyu besleme sisteminin hem hidrojeolojik açıdan etkin çalışmasını sağlayan hem de akifer ve tesis güvenliğini koruyan optimum işletme debi aralığı olarak değerlendirilmiştir.

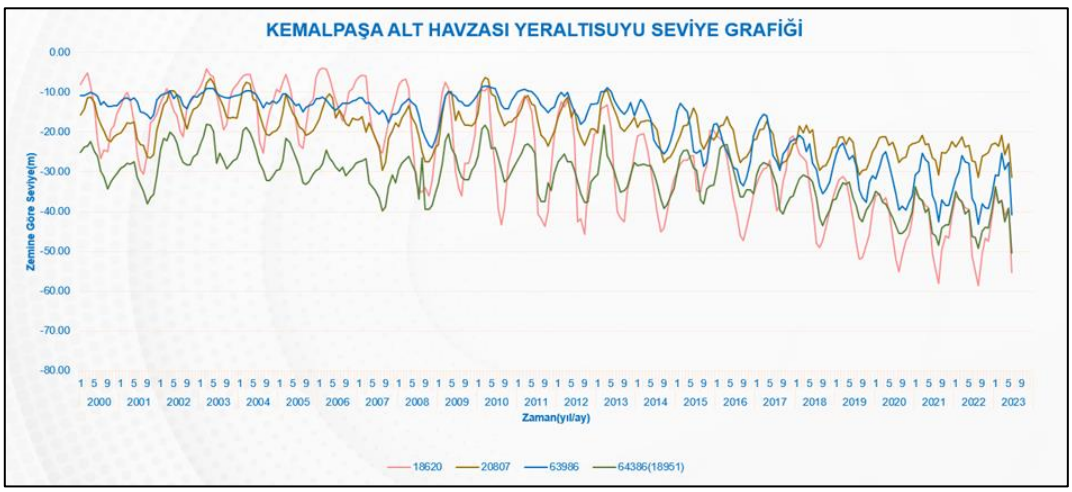
3.3 İzleme Çalışmaları

Yeraltı suyu suni besleme uygulamasının etkilerini izlemek amacıyla, çalışma alanına yakın konumda bulunan DSİ rasat kuyularında manuel ölçümler ve uzaktan erişimli çevrimiçi (online) seviyeler kullanılmaktadır (Şekil 8).



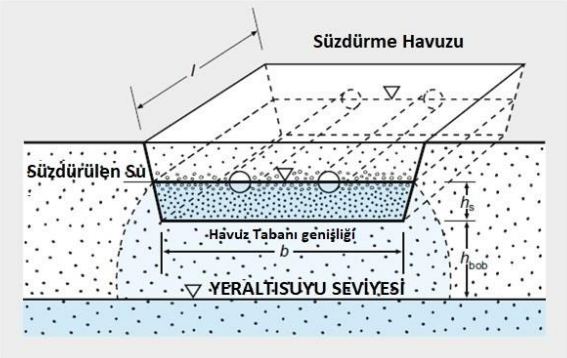
Şekil 8. Sinancılar suni besleme çalışmalarının online izlenmesinin şematik gösterimi.

2023 YAS suni besleme sezonu sonunda elde edilen rasat verileri değerlendirilip, önceki yıllarla karşılaştırıldığında yeraltı suyu seviyelerinde yaklaşık 3–5 metre arasında değişen bir yükselme meydana geldiği belirlenmiştir. Bu artış, uygulanan besleme yöntemlerinin akifer üzerinde olumlu bir etki yarattığını ve suni besleme sisteminin çalıştığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, besleme miktarı ile seviye yükselimi arasında anlamlı bir ilişki olduğunu doğrulamaktadır. Şekil 9'daki grafikte görülen mevsimsel dalgalanmalara rağmen uzun dönemli eğilimin yukarı yönlü olması, uygulanan suni besleme yöntemlerinin akifer sistemini etkin biçimde desteklediğini ve sistemin sürdürülebilir ve verimli bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Ancak bazı mevsimsel alçalmalar ara ara devam etmekle birlikte, minimum seviye değerlerinin yıllar içinde yukarı taşınması beklenmektedir. Ayrıca yeraltı suyu seviyeleri incelendiğinde sistemin toparlanma eğiliminin bulunduğunu görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Kemalpaşa Alt Havzası yeraltı suyu seviye değişimleri

Süzdürme havuzlarının infiltrasyon (süzülme) miktarları, havuzların hacimleri, taban yüzey alanları ve kullanılan çakıl dolgusu malzemesinin hidrolik iletkenlik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Daha geniş yüzey alanına ve daha büyük hacme sahip havuzlarda, suyun vadoz bölgesine geçişi için daha fazla temas yüzeyi oluşmakta, bu da infiltrasyon kapasitesini artırmaktadır (Şekil 10). Dolayısıyla her bir havuzun besleme performansı, geometrik özellikleri ve zemin koşullarına bağlı olarak farklılık göstermekte; bu parametreler suni besleme tasarımının temel belirleyicileri arasında yer almaktadır.



$$\dot{V} = l \cdot b \cdot \frac{k_f}{2} \cdot \frac{h_{bob} + h_s}{h_{bob}}$$

Burada;

- $\dot{V}$: Süzdürülmesi (infiltre edilmesi) gereken su hacmi (m^3/s),
- l : Sızdırma (infiltrasyon) havuzunun uzunluğu (m),
- b : Sızdırma (infiltrasyon) havuzunun genişliği (m),
- k_f : Geçirgenlik katsayısı (m/s),
- h_{bob} : Sızdırma havuzu tabanının yeraltısuyu seviyesinin üzerindeki yüksekliği (m),
- h_s : Sızdırma havuzundaki su derinliği (m).

Şekil 10. Sızdırma (infiltrasyon) havuzlarında süzdürülmesi gereken su hacminin hesaplanmasında kullanılan bağıntı ve şematik gösterimi (Hölting ve Coldewey, 2019).

Çizelge 1'de, Kemalpaşa ilçesinde gerçekleştirilen YAS suni besleme çalışmalarına ait bilgiler sunulmaktadır. Buna göre Sinancılar mevkiinde üç farklı suni besleme uygulaması yer almakta olup, bu uygulamalardan Sinancılar 1-2 ve 3 projeleri için yıllık fayda miktarları hesaplanmıştır. Sinancılar-1 YAS Suni Besleme çalışmasının yıllık faydası 116.640 m³/yıl, Sinancılar-2 YAS Suni Besleme çalışmasının yıllık faydası 69.984 m³/yıl olarak belirlenirken, Sinancılar-3 YAS Suni Besleme çalışmasının yıllık faydası 163.296 m³/yıl olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Kemalpaşa Sinancılarda gerçekleştirilen yeraltı suyu (YAS) suni besleme çalışmalarının yıllık faydaları.

Sayı	Suni Besleme Çalışmaları	Fayda (m3/yıl)
1	Kemalpaşa Sinancılar-1 YAS Suni Besleme	116.640
2	Kemalpaşa Sinancılar-2 YAS Suni Besleme	69.984
3	Kemalpaşa Sinancılar-3 YAS Suni Besleme	163.296

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Gediz Havzası Kemalpaşa Alt Havzası'nda yer alan, Sinancılar Yeraltı Suyu Sulama Kooperatifi sahasında YAS suni besleme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu alanda 2 adet süzdürme havuzu ve 1 adet de keson kuyu kullanılıp yüzeysel akışa geçen sular alüvyon akifere süzdürülerek YAS Suni Besleme yapılmıştır.

Süzdürme havuzlarının infiltrasyon kapasitelerinin; havuz hacmi, taban yüzey alanı ve kullanılan çakıl dolgu malzemesinin hidrolik özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Daha geniş yüzey alanına ve yüksek geçirgenliğe sahip havuzlarda, vadoz bölgesine geçen su miktarının arttığı ve akifer besleniminin daha etkin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

DSİ Rasat kuyularında 2023 YAS suni besleme sezonu sonunda yapılan ölçümler, önceki yıllarla karşılaştırıldığında yeraltı suyu seviyelerinde yaklaşık 3–5 m mertebesinde bir yükselme meydana geldiğini göstermiştir. Bu çalışmada, suni besleme uygulamasının yeraltı suyu seviyeleri üzerindeki gerçek hidrolik etkisini doğru biçimde ortaya koyabilmek amacıyla, seviye değişimlerinde mevsimsel etkiler (yağış, doğal beslenim, buharlaşma ve sıcaklık koşulları) değerlendirme kapsamı dışında bırakılmıştır. Analiz sürecinde, farklı yıllara ait yeraltı suyu seviye gözlemleri karşılaştırılırken yalnızca suni besleme uygulamasının yürütüldüğü dönemler esas alınmış, yağışlı ve kurak dönemlere bağlı doğal dalgalanmalar, besleme–etki ilişkisini maskeleyen bir unsur olarak kabul edilerek değerlendirmeye dâhil edilmemiştir.

Yeraltı suyu seviyelerinin yükselmesi, pompaj derinliğinin azalmasına doğrudan katkı sağlamakta; yeraltı suyu seviyesinin yükselmesiyle birlikte pompaj derinliklerinin azalması, hem şahıs kuyularında hem de YAS Kooperatifi işletme kuyularında; enerji tüketimini düşürmekte ve maliyetleri uzun vadede sürdürülebilir hâle getirmektedir. Bu kapsamda uygulanan suni besleme faaliyetleri, yeraltı suyu kaynakların korunması ve bölgesel su yönetiminin iyileştirilmesi açısından stratejik bir önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, Kemalpaşa Alt Havzası'nda uygulanan bu suni besleme modeli; baraj ve gölet yapımına elverişli olmayan, ancak yüzey suyu potansiyeli bulunan havzalarda, yeraltı suyu kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı açısından etkin, uygulanabilir ve yaygınlaştırılabilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Uzun vadeli izleme çalışmalarının sürdürülmesi ve çekim–besleme dengesinin entegre havza yönetimi yaklaşımıyla ele alınması, uygulamanın kalıcı başarısını artıracaktır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular; besleme yönteminin hidrojeolojik koşullara bağlı performansını ortaya koyması, izleme verileri ile desteklenmesi ve sahaya özgü uygulama esaslarını

tanımlaması bakımından, benzer hidrojeolojik özelliklere sahip havzalarda gerçekleştirilecek gelecekteki yeraltı suyu suni besleme çalışmalarına bilimsel ve teknik bir referans niteliği taşımaktadır. Uygulamanın uzun vadeli başarısının güvence altına alınabilmesi için düzenli ve sürekli izleme çalışmalarının sürdürülmesi, yeraltı suyu çekimleri ile besleme miktarlarının birlikte değerlendirilmesi ve bu sürecin entegre havza yönetimi yaklaşımı çerçevesinde ele alınması büyük önem arz etmektedir.

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

Ali, M., & Doğan, E. (2017). Yeraltısuyu besleme barajlarında infiltrasyonun modellenmesi: Büyük Cırcıp Yeraltısuyu Besleme Barajı örneği. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9, 1–8.

Apaydın, A. (2022). Türkiye'de yeraltı barajları ve yeraltısuyu besleme uygulamalarının hidrojeolojik açıdan değerlendirilmesi. Yerbilimleri Dergisi, 43(2), 123–138.

Dillon, P., et al. (2019). Managed aquifer recharge: rediscovering nature as a leading edge technology. Water Science and Technology.

DSİ Genel Müdürlüğü (2014). Yeraltısuyu Planlaması ve Yönetimi. Ankara.

DSİ Genel Müdürlüğü , 2. Bölge Müdürlüğü. (2014). Gediz Havzası Yeraltısuyu Planlaması, Hidrojeolojik Etüt Yaptırılması. Ankara.

DSİ Genel Müdürlüğü (2023). Türkiye Su Kaynakları Durum Raporu. Ankara.

Hölting and W. G. Coldewey, (2019). "Groundwater exploitation," in Hydrogeology. Berlin, Germany: Springer, pp. 203–230.

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

Korkut, R. (2025). Türkiye'de yeraltısuyu suni besleme uygulamalarının değerlendirilmesi. (Türkiye odaklı güncel derleme).

Korkut, E. (2025). Managed aquifer recharge practices in Türkiye: Current status, challenges, and future perspectives. Water, 17(4), 1–18. https://doi.org/10.3390/w1704xxxx

Mouhoumed, I., Çelik, R., & Kaya, M. (2024). Assessment of suitable areas for managed aquifer recharge using GIS-based DRASTIC and multi-criteria decision analysis: A case study from Kayseri, Türkiye. Environmental Science and Pollution Research, 31, 45678–45695.

Peksezer, E. (2010). Artificial recharge of groundwater in Küçük Menderes River Basin, Türkiye (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Peksezer, E., & Yazıcıgil, H. (2011). Artificial recharge of groundwater in Küçük Menderes River Basin. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Bülteni, 55(3), 45–56.

Sayit, M., & Peksezer, E. (2012). Evaluation of artificial recharge potential using groundwater flow modeling: A case study from Küçük Menderes Basin, Türkiye. Proceedings of the International Symposium on Groundwater, 233–240.

Url-1: epa.wa.gov.au/EPADocLib/2125_B1199.pdf.

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147 p64-73 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p64-73

Araştırma Makalesi / Research Article

Kovada Gölü'nün Trofik Durumundaki Değişimler, Hidrolojik Baskılar ve Ekosistem Risklerinin Değerlendirilmesi

Changes in the Trophic Status of Lake Kovada, Hydrological Pressures, and the Assessment of Ecosystem Risks

Cafer BULUT[1]*

[1] Su Ürünleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Menderes Mah. No:39

**Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: caferbulut@gmail.com*

Geliş (Received): 16.12.2025, Düzeltme (Revised): 07.01.2026, Kabul (Accepted): 08.01.2026

ÖZ

Bu çalışmada, Akdeniz Bölgesi Göller Yöresi'nde yer alan Kovada Gölü'nün tarihsel süreç içerisinde geçirdiği trofik ve hidrolojik değişimler ayrıntılı olarak incelenmiş; gölün güncel ekolojik durumu değerlendirilmiş ve geleceğe yönelik potansiyel ekosistem riskleri ortaya konmuştur. Araştırma kapsamında, uzun dönemli su kalitesi verileri, besin elementi konsantrasyonları, hidromorfolojik değişimler ve antropojenik baskılar bütüncül bir çerçevede ele alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Kovada Gölü'nün trofik yapısında belirgin ve süreklilik arz eden bir bozulma eğilimi bulunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle küresel iklim değişikliğine bağlı yağış rejimindeki azalma, Eğirdir Gölü'nden sağlanan su transferindeki düşüş, gölden yapılan su alımları ve havza kaynaklı dış besin girdileri, göl ekosistemi üzerinde baskıyı artıran temel faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, Kovada Gölü'nün ekolojik bütünlüğünün korunması ve sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi amacıyla, bilimsel temelli koruma, izleme ve yönetim stratejilerine yönelik öneriler geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kovada Gölü, habitat kaybı, trofik seviye, su kalitesi, hidrolojik değişim

ABSTRACT

In this study, the long-term trophic and hydrological changes of Lake Kovada, located in the Lakes District of the Mediterranean Region, were comprehensively examined, the current ecological status of the lake was assessed, and potential future ecosystem risks were identified. Within this framework, long-term water quality data, nutrient concentrations, hydromorphological alterations, and anthropogenic pressures were evaluated using an integrated and holistic approach. The findings clearly indicate a pronounced and ongoing deterioration in the trophic structure of Lake Kovada. In particular, decreased precipitation associated with global climate change, reduced water transfer from Lake Eğirdir, water abstraction from the lake, and external nutrient inputs originating from the catchment area have emerged as the primary drivers intensifying pressure on the lake ecosystem. In this context, science-based conservation, monitoring, and management strategies were proposed to support the sustainable management and long-term ecological integrity of Lake Kovada.

Keywords: Lake Kovada, habitat loss, trophic level, water quality, hydrological change

1 Giriş

Tatlı su ekosistemleri, iklimsel değişkenlik ve artan antropojenik baskılar nedeniyle günümüzde en hassas doğal sistemler arasında yer almaktadır. Özellikle yarı kapalı havzalarda bulunan göller, havza ölçeğinde gerçekleşen arazi kullanımı değişiklikleri, besin elementi yüklenmesi ve hidrolojik müdahalelere karşı oldukça duyarlıdır. Bu baskılar, göllerin trofik yapısında değişimlere, su kalitesinde bozulmaya ve ekosistem bütünlüğünün zayıflamasına neden olabilmektedir (Türkeş, Sümer ve Çetiner, 2000; Bahadır, 2012; Pulatsü vd., 2025).

Akdeniz Bölgesi Göller Yöresi'nde yer alan Kovada Gölü, Batı Toros Dağları'nın güney kesiminde, Isparta ilinin Eğirdir ilçesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. Göl, yaklaşık 37°40′ K enlemleri ile 30°52′

D boylamları arasında yer almakta olup, Eğirdir Gölü'nün yaklaşık 20–25 km güneyinde, kuzey–güney doğrultusunda uzanmaktadır. Tektonik kökenli bir çöküntü gölü olan Kovada Gölü, deniz seviyesinden yaklaşık 905 m yükseklikte bulunmakta ve yaklaşık 77 km² büyüklüğünde bir havzaya sahiptir (Bulut & Atay, 2005; Erdoğan & Savaş, 2024).

Yaklaşık 900 hektarlık (9 km²) yüzey alanına sahip olan gölün kuzey–güney doğrultusundaki uzunluğu yaklaşık 6 km, ortalama genişliği ise 1,5 km'dir. Kovada Gölü'nün en önemli su kaynağını, Eğirdir Gölü'nden gelen ve 22 km uzunluğundaki Kovada Kanalı aracılığıyla taşınan sular oluşturmaktadır. Bu hidrolik bağlantı, gölün su seviyesi, besin dinamikleri ve trofik yapısı üzerinde belirleyici bir rol oynamakta; gölün hidromorfolojik özelliklerini Eğirdir Gölü ile doğrudan ilişkilendirmektedir (Bulut & Atay, 2005; Çiçek & Yamuç, 2017).

Gölün kıyı ve taban özellikleri mekânsal olarak farklılık göstermektedir. Kovada Kanalı'nın göle karıştığı kuzey kesimlerde saz, kamış ve hasır otlarıyla kaplı alanlar yaygınken, diğer kıyı kesimleri ağırlıklı olarak kumsal ve kayalık yapıdadır. Çevresini saran orman örtüsü ve doğal peyzaj özellikleri, Kovada Gölü'nün ekolojik ve görsel değerini artıran unsurlar arasında yer almaktadır. Kovada Gölü ve havzasını kapsayan yaklaşık 6.534 hektarlık alan, sahip olduğu ekolojik, biyolojik ve peyzaj değerleri nedeniyle 03.11.1970 tarihinde Milli Park ilan edilmiş, 1992 yılında ise I. Derece Doğal Sit Alanı statüsü kazanmıştır. Bu koruma statüleri, gölün bölgesel ölçekte önemli bir doğal alan olduğunu ortaya koymakla birlikte, mevcut baskıların tamamen ortadan kaldırılmasında yeterli olmamıştır (Kesici, Şahin & Serin, 2005; Şener & Şener, 2016).

Son yıllarda Kovada Gölü, iklim değişikliğinin etkisiyle artan kuraklık, yağış rejimindeki düzensizlikler ve havza su bütçesindeki kayıpların yanı sıra, Kovada Kanalı aracılığıyla taşınan besin ve kirletici yükler nedeniyle ciddi çevresel sorunlarla karşı karşıya kalmıştır. Özellikle su seviyesindeki düşüş, makrofit baskısının hızla artması, sedimentte metal birikimi ve biyolojik çeşitlilikte gözlenen azalma, gölün hızlı bir ötrofikleşme sürecine girdiğini göstermektedir (Zeybek, 2012; Şener & Şener, 2016).

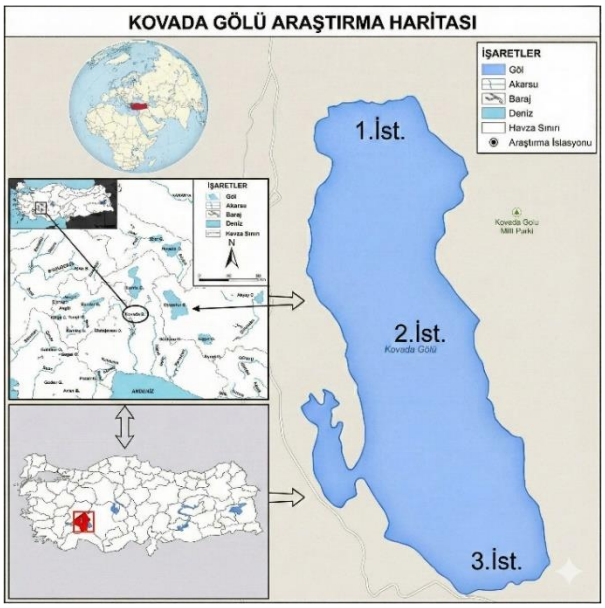
Ekosistemin biyotik bileşenleri de bu süreçten belirgin biçimde etkilenmiştir. Bentik topluluklarda toleranslı türlerin baskın hâle gelmesi (Arslan & Şahin, 2006), diyatom topluluklarında ötrofik türlerin hâkimiyet kazanması (Çiçek & Yamuç, 2017) ve zooplankton yapısında gözlenen değişimler (Erdoğan & Savaş, 2024), Kovada Gölü'nün biyolojik açıdan da bozulma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu göstergeler, göl ekosisteminin geleceğine yönelik ekolojik risklerin giderek arttığını açıkça göstermektedir.

Kovada Gölü'nün trofik ve hidrolojik durumunun yalnızca tekil parametreler üzerinden değil, uzun dönemli literatür verileri ile 2025 yılı güncel yerinde ölçüm sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi yoluyla bütüncül bir çerçevede ele alınmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde Kovada Gölü'ne ilişkin çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, bu çalışmaların büyük bölümü gölün belirli bir dönemine veya tek bir biyolojik ya da fizikokimyasal bileşenine odaklanmıştır. Gölün trofik durumundaki zamansal dönüşümün, hidrolojik daralma ve iklim kaynaklı baskılarla birlikte değerlendirilerek geleceğe yönelik ekosistem riskleri bağlamında ele alındığı bütüncül bir analiz ise sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlamakta; Kovada Gölü'nün mevcut ekolojik durumunu ortaya koyarak, sürdürülebilir yönetim ve koruma stratejilerine bilimsel bir zemin sunmayı hedeflemektedir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışma, Kovada Gölü'ne ilişkin önceki literatür verileri, gölün fiziko-kimyasal ölçümleri, sediment analizleri, biyolojik veriler ve hidrolojik dinamikleri üzerine yapılan değerlendirmelere dayanmaktadır. Ayrıca halen devam eden "Eğirdir Gölü'nün Limnolojik Olarak İzlenmesi (2023-2027)" projesinin 2025 yılında yerinde gerçekleştirilen verileri de değerlendirmeye alınmıştır. Ayrıca daha önceki araştırmalarda raporlanan su kalitesi, trofik durum ve biyolojik indikatör türler dikkate alınarak gölün mevcut ekolojik durumu analiz edilmiştir. 2025 yılında gerçekleştirilen yerinde ölçümler gölün 3 farklı noktasından gerçekleştirilmiştir (giriş, orta ve denizaltı bölgeleri) (Şekil 1).

Arazi çalışmaları sırasında, Kovada Gölü'nün fiziksel ve kimyasal su kalitesi parametreleri yerinde (in situ) ölçülmüştür. Su sıcaklığı (°C), çözünmüş oksijen konsantrasyonu (mg L^{-1}), oksijen doygunluğu (%), pH, redoks potansiyeli (-mV) ve elektriksel iletkenlik (EC; µS cm^{-1}) ölçümleri, WTW 3620i Multiplus arazi ölçüm seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Suyun ışık geçirgenliğini belirlemek amacıyla Secchi diski derinliği (m/cm) ölçülmüş ve bu parametre, gölün trofik durumunun değerlendirilmesinde temel göstergelerden biri olarak kullanılmıştır. Ölçümler, standart limnolojik yöntemlere uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Örnekleme noktalarındaki su derinliği derinlik ölçer yardımıyla belirlenmiş, elde edilen derinlik verileri istasyonların morfometrik özelliklerinin tanımlanmasında kullanılmıştır.



Şekil 1. Kovada Gölü araştırma sahası

3 Bulgular ve Tartışma

2025 yılı arazi ölçümleri, Kovada Gölü'nün hidrolojik ve trofik açıdan ileri düzeyde baskı altında olduğunu ve ekosistemin kritik eşiklere yaklaştığını açık biçimde ortaya koymaktadır (Tablo 1). Yıl boyunca ölçülen su sıcaklığı ortalama 16,2 °C olup, minimum 6,5 °C ve maksimum 25,6 °C değerleri gölün belirgin bir mevsimsel ısınma–soğuma döngüsüne sahip olduğunu göstermektedir. Yaz döneminde yüzey sularında sıcaklığın 25 °C'nin üzerine çıkması, fitoplankton gelişimi ve algal üretim için son derece elverişli koşullar oluşturmakta, bu durum gölde primer üretimin belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Özellikle düşük su seviyesi ile birleşen yüksek sıcaklıklar, trofikleşme sürecini hızlandıran temel fiziksel faktörler arasında yer almaktadır.

Tablo 1. Kovada Gölü 2025 yılı su kalitesi yerinde ölçüm değerleri

Parametre	Ortalama	Minimum	Maksimum
Sıcaklık (°C)	**16,2**	6,5	25,6
Çözünmüş O_2 (mg/L)	**6,18**	4,75	13,50
Doymuşluk (%O_2)	**81,96**	46,1	236,0
pH	**9,86**	8,95	10,00
Redoks (mV)	**-123,61**	-88,9	-202,5
EC (µS/cm)	**327**	236	382

Çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının ortalama 6,18 mg/L düzeyinde ölçülmesi, yüzey sularında kısa vadede oksijen yetersizliği yaşanmadığını göstermektedir. Ancak minimum değerin 4,75 mg/L'ye kadar düşmesi, özellikle gece saatlerinde veya durağan alanlarda oksijen stresinin gelişebileceğine işaret etmektedir. Buna paralel olarak, %O_2 doygunluk değerlerinin %46,1–236,0 gibi son derece geniş bir aralıkta değişmesi, yaz aylarında yoğun fotosenteze bağlı aşırı oksijenlenme (supersaturasyon) koşullarının oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, gündüz saatlerinde yüksek oksijen üretimi ile gece saatlerinde artan solunum ve ayrışma süreçleri arasında keskin dalgalanmalar yaşandığını ve ekosistemin metabolik açıdan dengesiz bir yapı sergilediğini göstermektedir. pH değerlerinin ortalama 9,86, maksimumda ise 10,00 seviyelerine ulaşması, Kovada Gölü'nün belirgin biçimde alkali karakter kazandığını ortaya koymaktadır. Bu düzeyde yüksek pH değerleri, literatürde ileri ötrofik ve trofik göller için tipik olup, yoğun algal fotosentez sonucu sudaki CO_2'nin tüketilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Göl suyunun bu derece alkali koşullar göstermesi, biyolojik üretimin aşırı düzeylere ulaştığını ve trofik bozulmanın ileri bir aşamaya geçtiğini desteklemektedir. Redoks potansiyelinin ortalama −123,61 mV, minimumda ise −202,5 mV gibi belirgin negatif değerlere ulaşması, göl sisteminde yarı indirgen–indirgen koşulların yaygınlaştığını göstermektedir. Bu durum özellikle sediment–su arayüzünde fosforun bağlandığı formlardan çözünerek su kolonuna geri salınması açısından büyük önem taşımaktadır. İçsel fosfor yüklenmesinin bu şekilde artması, dış kaynaklı besin girdileri azalsa dahi gölde trofikleşmenin

kendi kendini sürdüren bir yapıya dönüşme riskini ortaya koymaktadır. Elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin 236–382 µS/cm aralığında değişmesi, gölün iyonik içeriğinin hem mevsimsel hidrolojik koşullara hem de dış kaynaklı girdilere duyarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük su seviyeleri dönemlerinde EC değerlerindeki artış, buharlaşma etkisiyle birlikte besin tuzları ve çözünmüş iyonların konsantre hale geldiğini düşündürmektedir. Bu durum, göl suyunun kimyasal dengesinin kırılgan bir yapıya sahip olduğunu ve hidrolik yenilenmenin yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 2025 yılı yerinde ölçüm verileri Kovada Gölü'nün ileri düzeyde ötrofik–trofik koşullar altında bulunduğunu, biyolojik üretimin aşırı seviyelere ulaştığını ve hidrolojik zayıflama ile birlikte ekosistem direncinin ciddi biçimde azaldığını göstermektedir. Bu bulgular, önceki yıllarda rapor edilen uzun dönemli eğilimlerle uyumlu olup, gölün mevcut durumu itibarıyla hem su kalitesi hem de ekolojik sürdürülebilirlik açısından yüksek risk altında bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Kovada Gölü 2025 yılı secchi ve derinlik değişim değerleri (m)

Mevsim	**İstasyon**	**2025-Secchi (m)**	**2025-Derinlik (m)**
Kış	*Giriş*	0,20	0,70
	Orta	0,25	0,90
	Denizaltı	0,25	0,80
İlkbahar	*Giriş*	0,15	0,65
	Orta	0,20	0,75
	Denizaltı	0,15	0,70
Yaz	*Giriş*	Su yok	0
	Orta	0,15	0,50
	Denizaltı	0,15	0,50
Sonbahar	*Giriş*	Su yok	0
	Orta	0,15	0,40
	Denizaltı	0,15	0,40

Secchi diski derinliği ölçümleri, Kovada Gölü'nün optik özelliklerinde ciddi bir bozulma yaşandığını göstermektedir. Tüm mevsimler ve istasyonlar dikkate alındığında Secchi derinliği 0,15–0,25 m aralığında kalmış, yaz ve sonbahar dönemlerinde ise göl giriş istasyonunda su bulunmaması nedeniyle ölçüm yapılamamıştır Bu durum, gölün özellikle yaz aylarında yer yer tamamen kuruduğunu ve su seviyesinin kritik eşiklerin altına düştüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Ölçülen su derinliklerinin 0,40–0,90 m arasında değişmesi, Kovada Gölü'nün günümüzde son derece sığ bir sistem hâline geldiğini göstermektedir. Bu sığlaşma, ışığın göl tabanına kadar ulaşmasına, makrofitlerin hızla yayılmasına ve sedimentten besin maddelerinin kolayca su kolonuna karışmasına zemin hazırlamaktadır (Tablo 2).

2025 yılı bulguları, Kovada Gölü'nde 1990'lı yıllardan itibaren rapor edilen trofikleşme eğiliminin günümüzde ileri bir aşamaya ulaştığını göstermektedir. Yüce (1999) tarafından bildirilen mezotrofik yapı, Zeybek vd. (2012) ve Şener & Şener (2016) çalışmalarında ötrofik özelliklere evrilmiş; 2025 yılı ölçümleri ise gölün trofik koşullara geçtiğini nicel olarak ortaya koymuştur. Önceki yıllarda Secchi derinliğinin 1–1,5 m düzeylerinde rapor edilmesine karşın, 2025 yılında bu değerin 0,15–0,25 m seviyelerine düşmesi, fitoplankton yoğunluğunda ve askıda katı madde miktarında dramatik bir artışa işaret etmektedir. Benzer şekilde, daha önce birkaç metre olan su derinliğinin günümüzde 1 m'nin altına gerilemesi, iklim değişikliği kaynaklı hidrolojik baskıların ve su transferindeki azalmaların göl üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir (Şekil 2 ve Şekil 3).



Kovada Gölü giriş (Kasım/2025)



Kovada Gölü giriş (Eylül/2025)



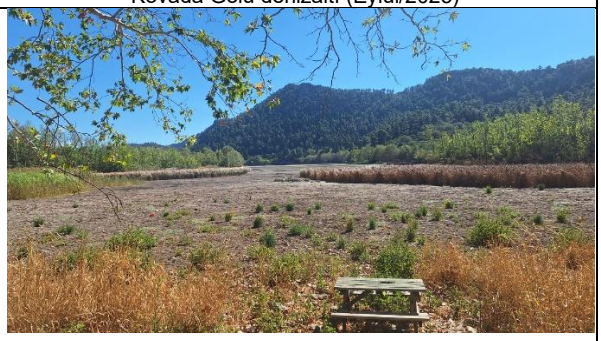
Kovada Gölü denizaltı (Kasım/2025)



Kovada Gölü denizaltı (Eylül/2025)

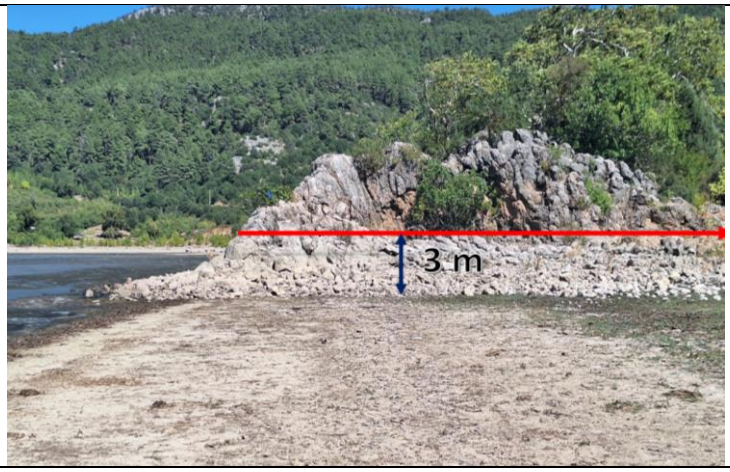


Kovada Gölü gözlem merkezi (Kasım/2025)



Kovada Gölü gözlem merkezi (Eylül/2025)

Şekil 2. Kovada Gölü'ne ait 2025 yılı görüntüleri



Şekil 3. Kovada Gölü'nde son yaşanan su seviyesi düşmesinin kayalardan görünümü

2025 yılı yerinde ölçüm verileri, Kovada Gölü'nün artık yalnızca ötrofik değil, hidrolojik ve ekolojik açıdan kritik bir eşikte bulunan trofik bir sistem hâline geldiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu veriler, önceki literatür bulgularını doğrulamakla kalmayıp, gölün geleceğine yönelik risklerin artık öngörü değil, ölçülebilir ve gözlenebilir bir gerçeklik hâline geldiğini göstermektedir. Mevcut hidrolojik ve trofik eğilimlerin devam etmesi durumunda, Kovada Gölü'nün yakın gelecekte yaz ve sonbahar dönemlerinde geniş alanlarda tamamen kuruyan, içsel fosfor yükü yüksek, makrofit ve alg baskısının kalıcı hâle geldiği,

biyolojik çeşitliliği düşük, yarı-bataklık karakterli bir ekosisteme dönüşmesi kuvvetle muhtemeldir. Bu süreçte gölün restorasyonu, her geçen yıl daha zor hâle gelecektir.

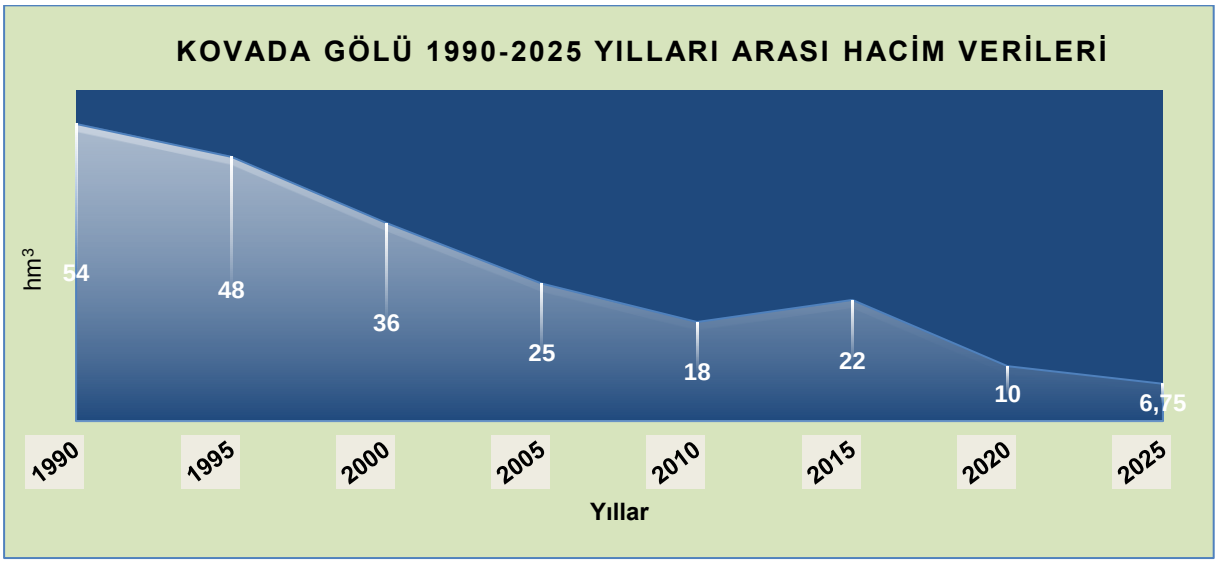
Kovada Gölü'nün 1995–2025 yılları arasındaki trofik durumundaki zamansal değişimi açık biçimde ortaya koymaktadır. 1990'lı yılların ortalarında oligotrofik–mezotrofik özellikler gösteren göl, 2000–2005 döneminde ağırlıklı olarak mezotrofik koşullarda seyretmiştir. Ancak 2009 ve 2013 yıllarında ötrofik sınıfa geçiş dikkat çekmekte, bu durum artan besin elementi girdileri ve hidrolik yenilenme kapasitesindeki azalma ile ilişkilendirilmektedir. 2015–2017 yıllarında gözlenen sınırlı iyileşme eğilimi ise kalıcı olmamış ve göl kısa sürede yeniden bozulma sürecine girmiştir (Şekil 4)**.** 2019 sonrasında Kovada Gölü'nün trofik yapısının sürekli olarak ötrofik karakter kazanması, trofikleşme sürecinin kronikleştiğini göstermektedir. Özellikle 2021–2025 döneminde bu durumun devam etmesi; iklim değişikliğine bağlı yağış azalması, Eğirdir Gölü'nden su transferinin yetersizliği, gölden yapılan su alımları ve havza kaynaklı dış besin yüklerinin birleşik etkisini ortaya koymaktadır. Bu eğilim, göl ekosisteminde biyolojik çeşitliliğin azalması ve ekosistem işlevlerinin zayıflaması açısından ciddi bir risk oluşturmakta olup, Kovada Gölü'nün sürdürülebilirliği için acil ve bütüncül yönetim önlemlerinin gerekliliğine işaret etmektedir.



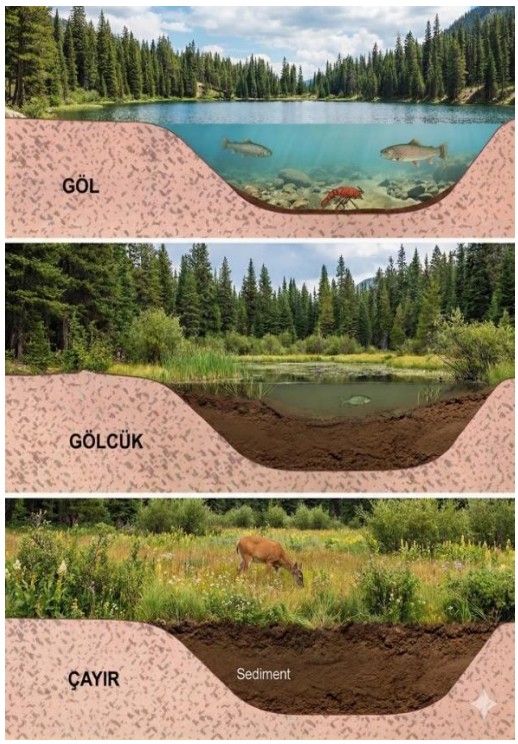
Şekil 4. Kovada Gölü'nün 1995-2025 yılları arası trofik değişim süreci (Bulut vd., 2025)

Kovada Gölü'nün 1990–2025 yılları arasındaki hacim değişimi gölün hidrolojik daralma sürecini açık biçimde belgelemektedir (Şekil 5). Gölün seviyesinde 1 m'lik bir düşüsün alansal ve hacimsel olarak gölün yaklaşık % 22'sinin kaybı anlamına gelmektedir. Bu kayıp ise 8 milyon m^3'e karşılık gelmektedir (DSİ, 2007). Özellikle göl su hacminde yaşanan azalma gölün geleceği açısından büyük risk taşımaktadır. 1990 yılında yaklaşık 54 hm^3 olan göl hacmi, 2000 yılına gelindiğinde yaklaşık 36 hm^3'e düşmüş; bu durum özellikle 1990–2000 döneminde hızlı bir hacim kaybına işaret etmektedir. 2000–2010 aralığında azalma eğilimi devam etmiş ve hacim 18 hm^3'e kadar gerilemiştir (Bulut ve Atay, 2005). 2015 yılında hacimde kısa süreli bir artış (22 hm^3) gözlenmesi, yıllar arası hidrolojik değişkenliğin (yağış rejimi, yüzeysel beslenme, işletme koşulları vb.) göl hacmi üzerinde geçici etkiler oluşturabildiğini düşündürmektedir (Şekil 5). Ancak bu toparlanma kalıcı olmamış, 2020 yılında hacim 10 hm^3'e, 2025 yılında ise yaklaşık 6,75 hm^3 seviyesine kadar düşerek kritik bir eşik düzeyine ulaşmıştır. Gelinen süreç Kovada Gölü'nün son 35 yıllık süreçte yaklaşık %87'lik bir hacim kaybı yaşadığını ortaya koymakta ve gölün hidrolojik sürdürülebilirliği açısından ciddi bir risk altında olduğunu göstermektedir. Benzer olarak 1990 yılında yaklaşık 9 km^2 olan göl yüzey alanının 2000 yılında 7,5 km^2'ye, 2010 yılında 6,5 km^2'ye ve 2025 yılı için tahmini olarak 5 km^2 seviyesine gerilediği görülmektedir. Bu kademeli azalma, yaklaşık 35 yıllık süreçte göl yüzey alanında %40'a varan bir kayba işaret etmekte olup, Kovada Gölü'nün su bütçesinde ciddi ve kalıcı bir bozulmanın meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle kıyı çizgisindeki belirgin geri çekilme, litoral zonun genişlemesi ve daha önce su altında kalan alanların açığa çıkması, su seviyesindeki düşüşün mekânsal yansımalarını net biçimde ortaya koymaktadır. Söz konusu yüzey alanı cve ciddi hacimsel kayıp; iklim değişikliğine bağlı yağış azalması ve artan buharlaşma, Eğirdir Gölü'nden Kovada Gölü'ne sağlanan su transferinin azalması, tarımsal ve diğer amaçlarla yapılan su alımları ile birlikte değerlendirilmelidir. Göl yüzey alanındaki küçülme, yalnızca hidromorfolojik bir değişim değil, aynı zamanda gölün trofik yapısını hızlandıran ve ekosistem direncini zayıflatan temel bir

baskı unsuru olarak öne çıkmaktadır. Su hacminin azalmasına bağlı olarak besin elementlerinin daha küçük bir hacimde yoğunlaşması, ötrofik ve hipertrofik koşulların kalıcı hâle gelmesini kolaylaştırmakta; habitat kaybı, biyolojik çeşitlilikte azalma ve mevsimsel kuruma riskini artırmaktadır. Bu nedenle görselde sunulan yüzey alanı değişimi, Kovada Gölü'nün ekolojik bozulma sürecinin nicel ve mekânsal bir göstergesi niteliğinde olup, gölün geleceğine yönelik risklerin boyutunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Kovada Gölü'nün yüzey hacim değişim grafiği (Bulut vd., 2025)



Şekil 6. Karalaşma süreci ve sedimentasyon (orjinal)

Şekil 6'da Kovada Gölü özelinde ele alınmakla birlikte, iç su göllerinde yaygın olarak gözlenen yaşlanma ve karalaşma sürecini tanımlamaktadır. Bu süreç, havzadan taşınan sediment ve besin elementlerinin göl tabanında birikmesiyle başlamakta; zamanla gölün efektif derinliğinin azalmasına, ışık geçirgenliğinin düşmesine ve trofik seviyenin yükselmesine neden olmaktadır. Sedimentasyonun ilerlemesiyle birlikte göl, açık su karakterini giderek kaybetmekte; önce sığ göl (gölcük), ardından bataklık ve çayır ekosistemlerine dönüşen ardışık bir ekolojik değişim süreci sergilemektedir. Bununla birlikte bu süreci, iklimsel ve antropojenik etkilerle doğrudan ilişkili olan hidrolojik baskılar tarafından önemli ölçüde hızlandırılmaktadır. Özellikle yüksek buharlaşma oranları, yarı kurak iklim koşullarında

göl su seviyesinin düşmesine yol açarak hidrolik yenilenme süresini uzatmakta ve besin maddelerinin seyrelme kapasitesini azaltmaktadır. Buna ek olarak, göl havzasında artan yeraltı suyu (sondaj) kullanımları, göl ile yeraltı suyu arasındaki doğal hidrolik dengeyi bozmakta; gölü besleyen kaynakların zayıflamasına ve uzun vadede göl su bütçesinde kalıcı açıkların oluşmasına neden olmaktadır. Öte yandan, Kovada Gölü gibi kapalı veya yarı kapalı havza özelliği gösteren sistemlerde harici su transferinin sınırlı olması**,** gölün hidrodinamik olarak izole bir yapıya bürünmesine yol açmaktadır. Dış kaynaklı su girdilerinin yetersizliği, gölün kendi içi besin yükleriyle baş başa kalmasına neden olurken, su seviyesindeki azalma ve sığlaşma süreçleri sedimentasyon ve ötrofikasyon etkilerini daha da belirgin hale getirmektedir. Bu bağlamda, buharlaşma, yeraltı suyu kullanımı ve su transferi yetersizliği; sediment ve besin maddesi birikimiyle birlikte değerlendirilmesi gereken çoklu etkenler olarak, iç su göllerinde ekosistem temelli ve bütüncül yönetim yaklaşımlarının gerekliliğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Kovada Gölü üzerine yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, göl ekosisteminin yaklaşık son otuz yıllık süreçte mezotrofik koşullardan ötrofik ve yer yer trofik bir yapıya doğru sistematik bir dönüşüm geçirdiği açıkça görülmektedir. Erken dönem araştırmalar (Atay, 1997; Kesici vd., 2005), gölün su kalitesi ve biyolojik bileşenlerinin görece dengeli bir yapı sergilediğini, ancak Kovada Kanalı yoluyla taşınan kirletici yüklerin potansiyel bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymuştur. Bu dönemde göl, hâlen ekolojik işlevlerini büyük ölçüde sürdürebilen bir iç su ekosistemi niteliği taşımaktadır.

2000'li yıllar sonrasında gerçekleştirilen çalışmalar, gölde trofik seviyenin yükseldiğini ve biyolojik kalite bileşenlerinde belirgin bozulmaların başladığını göstermektedir. Bentik makroomurgasızlar (Arslan & Şahin, 2006), epilitik algler (Yüce, 1999; Çiçek & Yamuç, 2017) ve zooplankton toplulukları (Erdoğan & Savaş, 2024) üzerinden yapılan değerlendirmeler, kirlenmeye toleranslı ve ötrofik koşullara uyumlu türlerin baskın hâle geldiğini ortaya koymuştur. Bu biyolojik göstergeler, fizikokimyasal parametrelerle uyumlu biçimde, gölün ekolojik durumunun giderek bozulduğunu teyit etmektedir. Sediment ve fitoplankton yapısındaki değişimler, toksik siyanobakteri gelişimi açısından da risk oluşturmaktadır (Gürbüz, 2008). Zeybek vd. (2012) tarafından Carlson Trofik Durum İndeksi kullanılarak yapılan değerlendirmeler de Kovada Kanalı'nın trofik, Kovada Gölü'nün ise ötrofik–mezotrofik geçiş zonunda yer aldığını ortaya koymuştur. 2025 yılı çalışmalar ise gölün artık trofik seviyeye geçmiş durumdadır (Bulut vd., 2025).

Son yıllarda yapılan hidrojeokimyasal, toksikolojik ve iklim temelli çalışmalar ise bozulmanın yalnızca besin tuzu girdileriyle sınırlı olmadığını göstermektedir. Sedimentte ve su ürünleri türlerinde ağır metal birikimi (Tekin Özan & Kır, 2005; Tuncay, 2007; Kayrak, 2014; Şener & Şener, 2015; Sancer & Tekin Özan, 2016; Bulut vd., 2018), göl hacmi ve derinliğinde belirgin azalma (Kazancı vd., 1999; Bulut vd., 2025), artan buharlaşma ve azalan yağış rejimi (Küçükyaman, 2010; Bahadır, 2012; Şener & Şener, 2016) ile birlikte değerlendirildiğinde, Kovada Gölü'nün çoklu stres etmenleri altında işlev kaybına uğrayan kırılgan bir ekosisteme dönüştüğü anlaşılmaktadır. Güncel bulgular, gölün artık yalnızca ötrofik değil, hidrolojik daralma ve kuruma riski taşıyan bir sistem hâline geldiğini ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar

4.1. Sorunlar ve Riskler

Bu çalışma ve önceki araştırmalar birlikte değerlendirildiğinde, Kovada Gölü'nün karşı karşıya olduğu temel sorunlar; yüksek besin maddesi yükü, yetersiz su yenilenmesi, hidrodinamik dengesizlik, sediment birikimi ve iklim değişikliğine bağlı hidrolojik kayıplar olarak öne çıkmaktadır. Kovada Kanalı'nın fiilen bir atıksu taşıyıcısı gibi çalışması, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan difüz kirlilik ve kontrolsüz yeraltı suyu kullanımı, gölün su kalitesini belirleyen başlıca baskı unsurlarıdır. Bu baskılar, trofik koşulların kalıcı hâle gelmesi, mevsimsel ve kalıcı kuruma riski, habitat kaybı ve biyolojik çeşitlilikte ciddi düşüş gibi ekolojik riskleri beraberinde getirmektedir.

4.2. Çözüm Önerileri ve Yönetim Yaklaşımları

Kovada Gölü'nün sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için havza ölçeğinde, entegre ve ekosistem temelli bir yönetim yaklaşımının benimsenmesi zorunludur. Eğirdir Gölü–Kovada Gölü sistemi tek bir hidrolojik bütün olarak ele alınmalı; göle giren temiz su miktarı ve sürekliliği ekosistem ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde düzenlenmelidir. Kovada Kanalı boyunca noktasal ve difüz kirlilik kaynakları etkin biçimde kontrol altına alınmalı, atıksu arıtma altyapısı güçlendirilmeli ve tarımsal girdilerin kullanımı bilimsel esaslara göre sınırlandırılmalıdır. Ayrıca, göle giren suyun göl kütlesi içerisinde etkin sirkülasyon oluşturması sağlanarak durağan alanlar azaltılmalı, düzenli ve yüksek frekanslı izleme programlarıyla erken uyarı mekanizmaları devreye alınmalıdır.

4.3. Genel Değerlendirme

Sonuç olarak Kovada Gölü, geçmişte daha derin, biyolojik çeşitlilik açısından zengin ve ekolojik işlevleri güçlü bir sistem iken, günümüzde ileri düzeyde kirlenmiş, hidrolojik açıdan zayıflamış ve ekolojik bütünlüğü tehdit altında olan bir göl ekosistemine dönüşmüştür. Mevcut eğilimlerin devam etmesi durumunda, gölün açık su karakterini büyük ölçüde kaybetmesi ve karalaşma–kuruma sürecinin hızlanması kaçınılmaz görünmektedir. Bu nedenle Kovada Gölü'nün korunması, yalnızca yerel ölçekte bir çevre sorunu değil; Göller Bölgesi'nin su kaynakları güvenliği ve doğal mirasının sürdürülebilirliği açısından stratejik bir zorunluluk olarak değerlendirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında ortaya konan bulgular, Kovada Gölü'nün yalnızca trofik açıdan değil, hidrolojik sürdürülebilirlik bakımından da kritik bir eşikte bulunduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, göl ekosisteminin geleceğine yönelik risklerin artık varsayımsal değil, ölçülebilir ve gözlenebilir bir boyuta ulaştığını ortaya koymakta; bu yönüyle çalışma, Kovada Gölü özelinde ve benzer yarı kapalı göl sistemleri için bilimsel ve yönetsel açıdan önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

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

Arslan, N., & Şahin, Y. (2006). A preliminary study on the identification of the littoral oligochaete (Annelida) and Chironomidae (Diptera) fauna of Lake Kovada, a national park in Turkey. Turkish Journal of Zoology, 30(1), 67–72.

Atay, R. (1997). Kovada Kanalı ve Gölü'nde bazı kimyasal parametrelerin değişimi. IX. Su Ürünleri Sempozyumu, 17–19 Eylül 1997, Eğirdir–Isparta.

Bahadır, M. (2012). Kovada Gölü Havzası ekosistemine genel bir bakış. E-Turkish Studies, 7(4), 947–963.

Bulut, C., & Atay, R. (2005). Eğirdir, Beyşehir, Kovada, Çivril ve Karakuyu (Çapalı) göllerinde su kirliliği projesi [Yayımlanmamış proje raporu]. Eğirdir Su Ürünleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.

Bulut, C., Uysal, K., Yaman, M., Emre, Y., Dalkıran, N., Pak, F., Aktaş, Ö., Şener, E., Koçer, M. A. T., Yalım, F. B., Yener, O., Savaşer, S., Çınar, Ş., Ceylan, M., Akçimen, U., Erbatur, İ., Uysal, R., & Oruç, H. (2018). Eğirdir, Beyşehir, Uluabat, İznik ve Kovada göllerinin su–sediman yapısı ile makrofit, bentoz, plankton ve ekonomik su ürünleri türlerinde ağır metal düzeylerinin araştırılması (Proje No: TAGEM/HAYSUD/2014/A11/P-02/06). Su Ürünleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.

Bulut, C., Yerli, S. V., Yegen, V., Dalkıran, N., Apaydın Yağcı, M., Karacaoğlu, D., Külköylüoğlu, O., Şener, E., Şener, Ş., Yıldırım, M. Z., Solak, C. N., Ergün, M., Bilgin, F., Koçer, G., Pazar, M., Fidan, D., Koçer, M. A. T., Özcü, A., Özdal, İ., Koç, S., Yılmaz, B., Akyıldız, G. K., Tatlı, G., Zeybekçi, L., Cilbiz, M., Yaman, S., Alperi, H., Eren, H., & Sezginer, M. M. (2025). Eğirdir Gölü'nün limnolojik olarak izlenmesi (2023–2027) [Devam eden araştırma projesi]. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM), Su Ürünleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Eğirdir.

Çiçek, N. L., & Yamuç, F. (2017). Using epilithic algae assemblages to assess water quality in Lake Kovada and Kovada Channel (Turkey), and in relation to environmental factors. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 17(4), 701–711.

DSİ, (2007). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Su Yıllığı.

Erdoğan, Ö., & Savaş, A. (2024). Determination of Kovada Lake water quality according to zooplankton. International Journal of Engineering and Innovative Research, 6(2), 86–97.

Gürbüz, F. (2008). Göller Bölgesindeki bazı su kaynaklarında bulunan toksik siyanobakteri türlerinin tanımlanması ve toksin seviyelerinin belirlenmesi (Doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Kazancı, G., Girgin, S., Dügel, M., Oğuzkurt, D., Mutlu, B., Dere, Ş., … Özçelik, M. (1999). Türkiye iç suları araştırmaları dizisi IV: Köyceğiz, Beyşehir, Eğirdir, Akşehir, Eber, Çorak, Kovada, Yarışlı, Bafa, Salda, Karataş, Çavuşçu gölleri; Büyük ve Küçük Menderes Deltası; Güllük Sazlığı ve Karamuk Bataklığı'nın limnolojisi, çevre kalitesi ve biyolojik çeşitliliği. Form Ofset.

Kayrak, Ş. (2014). Kovada Gölü (Isparta)'nün suyunda, sedimentinde ve gölde yaşayan kadife balığı (Tinca tinca L., 1758)'nda ağır metal birikiminin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Kesici, E., Şahin, C., & Serin, N. (2005). Çevresel faktörlerin Kovada Gölü sulak alanı üzerine etkileri. Korunan Doğal Alanlar Sempozyumu, 8–10 Eylül 2005, SDÜ, Isparta.

Küçükyaman, D. (2010). Kovada Gölü'nün meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizi (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Özan, S. T., & Kır, İ. (2005). Kovada Gölü havuz balığı (Carassius carassius L., 1758)'nın parazitleri üzerine bir çalışma. Türkiye Parazitoloji Dergisi, 29(3), 200–203.

Pulatsü, S., Demir, N., Özcan, D., Çetin, T., & Sayın, S. (2025). İklim krizinin sucul ekosistemler ile su ürünleri üretimine yansımaları ve strateji önerileri. Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi Bildirileri (ss. 328–349). Ankara.

Sancer, O., & Tekin-Özan, S. (2016). Seasonal changes of metal accumulation in water, sediment and Phragmites australis growing in Lake Kovada (Isparta, Türkiye). Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science, 11(2), 45–60.

Şener, Ş., & Şener, E. (2015). Kovada Gölü (Isparta) dip sedimanlarında ağır metal dağılımı ve kirliliğinin değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(2), 86–96.

Şener, Ş., & Şener, E. (2016). Kovada Gölü'nün (Isparta) hidrojeokimyasal incelemesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 4(2).

Tuncay, Y. (2007). Kovada Gölü'nde yaşayan istakozlarda (Astacus leptodactylus Eschscholtz, 1823) ağır metal birikiminin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G. (2000). Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri. Çevre Bakanlığı, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Seminer Notları (İstanbul, 13 Nisan 2000), 7–24.

Yüce, A. (1999). Kovada Gölü ve kanalı alglerinin taksonomik ve ekolojik yönden incelenmesi (Doktora tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Zeybek, M., Kalyoncu, H., & Ertan, Ö. O. (2012). Eğirdir ve Kovada göllerini bağlayan Kovada kanalı ile göllerin kanala yakın bölümünde trofik durumun belirlenmesi. Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 29(3), 137–141.

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147 p74-86 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p74-86

Araştırma Makalesi / Research Article

Gölge Süper Bilgisayar: Kamu Sektöründe Dağıtık Yüksek Başarımlı Hesaplama ile Atıl GPU Kaynaklarının Taşkın Modelleme ve Yapay Zeka İş Yükleri İçin Fırsatçı Kullanımı

Shadow Supercomputing: Opportunistic Utilization of Idle GPU Resources with Distributed High-Performance Computing in the Public Sector for Predictive Flood Modeling and AI Workloads

Önder KARAGÖZ[1*] Salih BABAGİRAY[2]

[1]Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Bilgi Teknolojileri Dairesi Başkanlığı, 06530 ANKARA
[2]Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Taşkın Kontrol Dairesi Başkanlığı, 06530 ANKARA

**Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: onderk@dsi.gov.tr*

Geliş (Received): 16.12.2025, Düzeltme (Revised):16.01.2026, Kabul (Accepted): 21.01.2026

ÖZ

Kamu yönetiminde dijital dönüşüm süreçlerinin hızlanmasıyla birlikte, özellikle afet yönetimi ve hidrodinamik simülasyonlar gibi kritik alanlarda Yüksek Performanslı Hesaplama (HPC) kaynaklarına olan ihtiyaç artmaktadır. Bununla birlikte, artan donanım maliyetleri ve veri egemenliği gereksinimleri, kurumların merkezi süper bilgisayarlara ve kamu bulutlarına yaptığı yatırımları sınırlamaktadır. Bu çalışma, kamu kurumlarının yerel alan ağlarında (LAN) bulunan ve çalışma saatleri dışında %90 oranında boşta kalan heterojen GPU (Grafik İşlem Birimi) kaynaklarını "Fırsatçı Hesaplama" yaklaşımı kullanarak değerlendirilmesini önermektedir. Çalışma kapsamında, Docker konteynerleştirme teknolojisi, daemonless yapısıyla Podman ve/veya K3s orkestrasyon altyapısı kullanılarak donanımdan bağımsız ve ölçeklenebilir bir "Kurumsal Masaüstü Bilgisayarlara yönelik bir GPU Grid" mimarisi tasarlanmıştır. Önerilen sistem, özellikle yüksek işlem gücü gerektiren 2 boyutlu taşkın modellemesi ve yapay zeka çıkarım süreçlerinde kullanımı önerilmiştir. Dağıtık mimariler Gustafson Yasası'na göre yüksek verimlilik performansı gösterdiği bilinmektedir; Bu çalışmada öngörülen sistemin geleneksel merkezi yatırımlara kıyasla sermaye harcamalarını (CapEx) en aza indirdiğini ve mevcut ekipmanın marjinal enerji tüketimiyle çalışarak Yeşil Bilişim hedeflerine katkıda bulunacağı fikri sunulmakta, ayrıca, verilerin kuruluş dışına aktarılmasını önleyen "yerinde işleme" prensibi sayesinde sistem, ulusal siber güvenlik ve AB Genel Veri Koruma Tüzüğü (GDPR) düzenlemelerine tamamen uyumlu olacağı belirtilmektedir. Atıl kamu kaynaklarını stratejik bir siber güce dönüştürmek için kolay uygulanabilir teknik bir yol haritası sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Başarımlı Hesaplama (HPC), Masaüstü Grid Sistemleri (Desktop Grids), Milli GPU Gridi, Federe Öğrenme, Yeşil Bilişim

ABSTRACT

With the acceleration of digital transformation processes in public administration, the need for High-Performance Computing (HPC) resources is increasing, especially in critical areas such as disaster management and hydrodynamic simulations. However, rising hardware costs and data sovereignty requirements are limiting investments in centralized supercomputers and public clouds by institutions. This study proposes to utilize the heterogeneous GPU (Graphics Processing Unit) resources located in local area networks (LANs) of public institutions, which are idle at a rate of 90% outside of working hours, using an "Opportunistic Computing" approach. Within the scope of the study, a hardware-independent and scalable "GPU Grid for Enterprise Desktop Computers" architecture is designed using Docker containerization technology, daemonless Podman and/or K3s orchestration infrastructure. The proposed system is particularly suggested for use in 2D flood modeling and artificial intelligence

inference processes that require high processing power. Distributed architectures are known to exhibit high throughput performance according to Gustafson's Law; This study proposes a system that minimizes capital expenditures (CapEx) compared to traditional centralized investments and contributes to Green Computing goals by operating with marginal energy consumption of existing equipment. Furthermore, it states that the system will be fully compliant with national cybersecurity and EU General Data Protection Regulation (GDPR) regulations thanks to its "on-site processing" principle, which prevents data transfer outside the organization. An easily implementable technical roadmap is presented to transform idle public resources into a strategic cyber force.

Keywords: High-Performance Computing (HPC), Desktop Grid Systems (Desktop Grids), National GPU Grid, Federated Learning, Green Computing

1 Giriş

Son yıllarda, küresel teknoloji ekosistemi, yapay zekânın (YZ) yarattığı sarsıcı dönüşüm nedeniyle benzeri görülmemiş bir enerji ve donanım darboğazına sürüklenmiştir. McKinsey & Company'nin 2025 durum raporunda (The State of AI Report 2025) vurgulandığı gibi, Büyük Dil Modellerinin (LLM) ve otonom karar alma "Ajan" YZ sistemlerinin yaygınlaşması, donanım talebini üreticilerin karşılama kapasitesinin çok ötesine taşıyarak, ülkeler arası teknolojik rekabeti "hayatta kalma mücadelesine" dönüştürmüştür (Singla ve ark., 2025).

Bu rekabet, yazılım algoritmalarıyla sınırlı kalmayıp, trilyon dolarlık veri merkezi yatırımlarını ve gelişmiş soğutma sistemlerini kapsayan devasa bir altyapı savaşına dönüşmüştür. Deloitte'nin geleceğe hazır YZ altyapıları analizinde belirttiği gibi, operasyonel sürdürülebilirlik ve donanım kapasitesi artık ulusal ekonomilerin dayanıklılığını belirleyen en kritik parametrelerdir (*Deloitte Insights,* 2025). Bu bağlamda, yüksek teknolojiye yönelik siyasi ve mali yaptırımlar, teknolojiye erişimi "ulusal güvenlik" meselesi haline getirmiştir. ABD'nin Kasım 2025 tarihli "Genesis Misyonu" bildirisi ve Çin ile yaşana somut rekabet bu altyapıların korunması ve geliştirilmesinin devletler için en önemli stratejik öncelik olduğunu açıkça belgelemektedir (The White House*,* 2025).

Bu çalkantılı ortamda, büyük ölçüde donanım ithalatçısı olan Türkiye için durum daha da kritik hale gelmektedir. Yüksek teknolojiye olan artan talep ve veri egemenliği konusundaki derinleşen endişeler, dış bağımlılığı azaltmak için alternatif stratejileri zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, Türkiye'nin mevcut kamu ve özel sektör envanterlerindeki atıl donanım kaynaklarının belirlenmesini ve bu kaynakların verimli ve ekonomik bir şekilde konsolide edilerek ulusal bir bilgi işlem gücüne dönüştürülmesi için teknik bulguları, değerlendirmeleri ve çözüm önerilerini ele almaktadır.

1.1 Problem Tanımı

Kamu yönetiminde dijital dönüşüm süreçlerinin hızlanmasıyla birlikte, afet yönetimi, şehir planlaması ve hidrolik modelleme gibi kritik alanlarda gereken veri hacmi ve hesaplama karmaşıklığı katlanarak artmaktadır. Özellikle, iklim değişikliği nedeniyle giderek daha sık meydana gelen taşkın olaylarının analizi, geleneksel 1 boyutlu (1D) modellemeden yüksek işlem gücü gerektiren yüksek çözünürlüklü 2 boyutlu (2D) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonlarına geçişi zorunlu kılmıştır (Kalyanapu ve ark., 2011). Bununla birlikte, bu hesaplamalar için gerekli olan Yüksek Performanslı Hesaplama (HPC) altyapılarının kurulması ve işletilmesi, kamu bütçeleri üzerinde önemli bir sermaye harcaması (CapEx) ve işletme gideri (OpEx) yükü oluşturmaktadır (Beloglazov ve ark*.,* 2011).

Şu anda, kamu kurumları bu ihtiyacı karşılamak için genellikle merkezi veri merkezlerine yatırım yapıyor veya TRUBA gibi sınırlı kapasiteli ulusal altyapıları kullanıyor. Ancak bu merkezi yaklaşım, veri egemenliği ve gizlilik gereksinimleri nedeniyle hassas kamu verilerinin kamu bulut sağlayıcılarına aktarılmasını engelliyor (McMahan ve ark*.,* 2017). Bu durum, kuruluşları kendi yerinde sistemlerini kurmaya itiyor.

Buradaki temel paradoks, Devlet Su İşleri gibi kurumların mühendislik birimlerinde zaten mevcut olan yüksek performanslı iş istasyonlarının kullanım oranlarındaki verimsizliktir. Ampirik çalışmalar, kurumsal ağlardaki masaüstü bilgisayarların işlem kapasitesinin %80 ila %95'inin, özellikle mesai saatleri dışında (gece ve hafta sonları) tamamen boşta kaldığını göstermektedir (Kondo ve ark., 2004). Kamu envanterinde bulunan binlerce NVIDIA Quadro ve RTX serisi profesyonel GPU, gün içinde CAD/GIS uygulamaları için kullanılırken, günün geri kalanında atıl bir silikon rezervi haline geliyor.

Bu bağlamda sorun, artan hesaplama talepleri ve bütçe kısıtlamaları ile kuruluş içinde zaten var olan devasa, parçalı ve yönetilmeyen (unmanaged) GPU rezervi arasındaki koordinasyon eksikliğinde yatmaktadır. Merkezi bir düzenleme mekanizmasının yokluğu, bu atıl kaynağın ulusal yapay zeka ve simülasyon stratejileri doğrultusunda fırsatçı bir şekilde kullanılmasını engellemektedir. Bu çalışma, veri

güvenliğinden ödün vermeden, bu atıl GPU havuzunun dağıtık ve hibrit bir mimari aracılığıyla sürdürülebilir bir hesaplama gücüne nasıl dönüştürülebileceğine odaklanmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, kamu kurumlarının intranetlerindeki dağınık ve heterojen atıl GPU kaynaklarını konteyner tabanlı sanallaştırma teknolojilerini kullanarak birleştiren güvenli, ölçeklenebilir ve düşük maliyetli bir "Kurumsal Masaüstü Grid (Enterprise Desktop Grid)" mimarisi tasarlamak ve doğrulamaktır (Buyya ve ark., 2009).

Çalışma, önerilen bu dağıtık mimarinin, özellikle yüksek işlem gücü gerektiren hidrodinamik taşkın modellemesi ve yapay zeka tabanlı mekansal analiz süreçlerinde, geleneksel merkezi sunucu yaklaşımlarına kıyasla maliyet etkin bir alternatif oluşturduğunu deneysel olarak göstermeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, çalışma aşağıdaki alt hedeflere odaklanmaktadır:

1. Operasyonel Verimlilik: Kurum envanterindeki GPU donanımlarının kullanım oranlarını (resource utilization) maksimize ederek, ek donanım yatırımı (CapEx) gerektirmeyen sürdürülebilir bir hesaplama havuzu oluşturmak (*Marinos, C., & Fasli, M., 2011)*.
2. Süreç Hızlandırma: Dağıtık GPU gücüyle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) tabanlı taşkın simülasyonlarının çözüm sürelerini en aza indirerek, afet yönetiminde "gerçek zamana yakın (near real-time)" karar destek mekanizmalarını mümkün kılmak (Smith ve ark*., 2020*).
3. Veri Egemenliği ve Güvenliği: Hassas kamu verilerinin kuruluş dışına (kamu bulut hizmetlerine) aktarılmasına gerek kalmadan, kurum içi işlenmesine olanak tanıyan yerinde (on-premise) işlenmesini sağlayan kapalı devre bir mimari sunarak ulusal veri güvenliği stratejilerine uyumu sağlamak.
4. Yeşil Bilişim: Yeni donanım üretimi ve enerji yoğun veri merkezi soğutma maliyetleri yerine mevcut donanımın marjinal enerji tüketimiyle çalışarak karbon ayak izini azaltan çevre dostu bir yaklaşım sergilemek.

Özetle, bu çalışma, teknik bir çerçeve içinde, atıl kamu kaynaklarının "fırsatçı hesaplama (opportunistic computing)" yaklaşımıyla stratejik bir siber güce dönüştürülebileceğini kanıtlamayı amaçlamaktadır.

1.3 Kapsam ve Sınırlamalar

Bu çalışma, yüksek teknik altyapı yoğunluğuna sahip kamu kurumlarının (örneğin, Devlet Su İşleri, Karayolları Genel Müdürlüğü) yerel alan ağlarında (LAN) konuşlandırılmış, NVIDIA CUDA mimarisini destekleyen grafik işlem birimlerine (GPU) sahip iş istasyonlarının çalışma saatleri dışındaki atıl kapasitesinin kullanımını kapsamaktadır.

Önerilen mimari ve performans boyutları ile ele alınarak aşağıdaki sınırlamalar dahilinde değerlendirilmiştir:

1**.** Donanım Heterojenliği: Homojen (tek tip) süper bilgisayar kümeleri yerine, çalışma farklı nesil ve kapasitelerdeki GPU'lardan (örneğin, Quadro, RTX ve T serisi) oluşan heterojen bir donanım havuzunun yönetimine dayanmaktadır (Mittal & Vetter, 2015).

2. Uygulama Alanı: Çalışma, yüksek bant genişliği (high-bandwidth) ve düşük gecikme süresi (low-latency) gerektiren "Büyük Dil Modeli Eğitimi (Large Scale LLM Training)" süreçlerini içermemektedir. Bunun yerine, standart ofis ağ altyapısının (1 Gbps Ethernet) sınırlamaları göz önüne alındığında, düşük iletişim yüküne ancak yüksek hesaplama yüküne sahip olan "Hidrodinamik Taşkın Modellemesi" ve önceden eğitilmiş modeller kullanan "Yapay Zeka Çıkarımı (AI Inference)" süreçlerine odaklanılmıştır (Li ve ark., 2014).

3. Ağ ve Güvenlik: Sistem tasarımı, dahili kapalı döngü bir ağ (İntranet) ile sınırlıdır ve verilerin kamu internetine veya harici bulut sağlayıcılarına gönderilmediği "yerinde işleme (on-premise processing)" senaryosuna dayanmaktadır.

4. Yazılım Altyapısı: Dağıtık yönetim için Konteynerleştirme (Docker) ve Hafif Orkestrasyon (K3s/Kubernetes) teknolojileri kullanılmalıdır; sanal makinelerin (VM'ler) getirdiği yükler hariç tutulacaktır (Bernstein, 2014).

2 Literatür Taraması

2.1 Gönüllü ve Fırsatçı Hesaplama

Yüksek Başarımlı Hesaplama (HPC) alanında geleneksel yaklaşım, işlem gücünün merkezi süper bilgisayarlarda konsolide edilmesine dayalıyken; 1990'ların sonlarında ortaya çıkan Gönüllü Hesaplama (Volunteer Computing) paradigması, internet üzerindeki milyonlarca bireysel bilgisayarın atıl işlem kapasitesinin birleştirilerek devasa bir sanal süper bilgisayar oluşturulabileceğini kanıtlamıştır. Bu yaklaşımın en bilinen öncüsü olan SETI@home projesi ve ardından geliştirilen BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) ara yazılımı, merkezi olmayan (decentralized) hesaplamanın bilimsel araştırmalarda maliyet-etkin bir çözüm olduğunu literatüre kazandırmıştır (Anderson, 2004*)*.

Gönüllü hesaplamanın kurumsal ağlara (Intranet) uyarlanmış hali olan Masaüstü Grid (Desktop Grid) sistemleri ise, “Fırsatçı Hesaplama (Opportunistic Computing)” veya “Döngü Toplayıcılığı (Cycle Scavenging)” kavramlarını doğurmuştur. Bu yaklaşımda, kaynaklar gönüllülük esasından ziyade, kurumun sahip olduğu ancak mesai saatleri dışında kullanılmayan (non-dedicated) donanımların yönetilmesi esasına dayanır. Kondo ve arkadaşlarının yaptığı ampirik çalışmalar, kurumsal ortamlardaki iş istasyonlarının işlemci kapasitelerinin günün yaklaşık %80-90'lık diliminde tamamen boşta (idle) olduğunu ve bu kaynağın HPC iş yükleri için öngörülebilir bir havuza dönüştürülebileceğini ortaya koymuştur (Kondo ve ark., 2004*)*.

Günümüzde ise Moore Yasası'nın yavaşlaması ve hesaplama yükünün CPU'dan GPU'ya (Grafik İşlem Birimi) kaymasıyla birlikte, Fırsatçı Hesaplama paradigması yeni bir boyut kazanmıştır. Özellikle CUDA ve OpenCL mimarilerinin gelişmesi, standart ofis bilgisayarlarındaki ekran kartlarını birer genel amaçlı hesaplama birimine (GPGPU) dönüştürmüştür. Literatürdeki son çalışmalar, GPU barındıran masaüstü gridlerin (GPU-based Desktop Grids), kayar nokta (floating-point) performansı açısından geleneksel CPU gridlerine göre çok daha yüksek bir “throughput” (iş çıkarma yeteneği) sunduğunu göstermektedir (Desell, ve ark., 2008/2010 ve Viñas ve ark., 2020*)*. Ancak bu yapıların başarısı, heterojen donanım profillerinin ve ağ gecikmelerinin etkin bir iş planlama (scheduling) algoritması ile yönetilmesine bağlıdır. Kayar nokta sorunsalı model halüsinasyonları gerekçesi olarak gösterilmektedir ve bu alandaki güncel çalışmaların da modellerin daha deterministik olmasında belirgin etkisi bulunmaktadır.

2.2 Hidroinformatikte GPU Kullanımı

Hidroinformatik disiplininde, taşkın yayılım modellerinin (Flood Inundation Models) doğruluğu büyük ölçüde kullanılan uzamsal çözünürlüğe (spatial resolution) ve sayısal çözüm yöntemlerinin kararlılığına bağlıdır. Geleneksel olarak Merkezi İşlem Birimi (CPU) üzerinde seri hesaplama yöntemleri kullanılarak çözülen Sığ Su Denklemleri (SWE) veya Navier-Stokes denklemleri, özellikle şehir ölçeğinde yüksek çözünürlüklü simülasyonlarda kabul edilemez çalışma sürelerine yol açmaktadır. Bu darboğaz, son on yılda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) alanında bir paradigma değişimine yol açarak Genel Amaçlı Grafik İşlem Birimi (GPGPU) teknolojilerinin kullanımını standartlaştırmıştır.

GPU mimarisinin sunduğu Tek Talimat Çoklu Veri (SIMD) mimarisi, hidrolik modellerin (grid/mesh) tabanlı yapısıyla mükemmel bir uyum sağlamaktadır. Her bir hesaplama hücresinin (cell) komşu hücrelere göre kütle ve momentum koruma denklemlerinin binlerce çekirdek üzerinde paralel olarak çözülmesi, literatürdeki çalışmalarda CPU tabanlı yaklaşımlara kıyasla 10 ila 100 kat arasında hızlanma sağlamıştır (Kalyanapu ve ark., 2011). Bu öncü çalışmalar, CUDA tabanlı bir taşkın modelinin, eşdeğer bir CPU uygulamasına kıyasla simülasyon süresini 85 kat azalttığını ve böylece “gerçek zamanlı (real-time)” taşkın tahminini mümkün kıldığını göstermiştir.

Bu teknoloji, endüstri standardı yazılımlara da entegre edilmiştir. Örneğin, ABD Mühendisler Birliği (USACE) tarafından geliştirilen ve dünya çapında kamu otoriteleri tarafından (Türkiye'deki Devlet Su İşleri de dahil olmak üzere) yaygın olarak kullanılan HEC-RAS yazılımı, 5.0 sürümüyle 2 boyutlu (2D) akış hesaplamaları için GPU hızlandırma desteği sunmaya başlamıştır. Smith ve Liang'ın yakın tarihli araştırmaları, yüksek performanslı GPU kümeleri kullanılarak, milyonlarca hücreden oluşan bir şehrin tamamını kapsayan taşkın modellerinin sokak ve bina detayında (sub-grid resolution) dakikalar içinde analiz edilebileceğini göstermektedir (Smith ve ark., 2016/2020). Bu nedenle, GPU kullanımı sadece hız yönüyle değil, daha önce hesaplanması imkânsız olan bazı detay seviyelerine erişmeyi de mümkün kılan oldukça stratejik bir araçtır.

GPU'lar ile sağlanan paralel işlem gücü yalnızca "bekleme süresini kısaltan" bir araç değil, modelin fiziksel gerçekliği ele almasını da temelden değiştiren bir kaldıraçtır. CPU tabanlı geleneksel sistemlerde hesaplama maliyeti nedeniyle feda edilen birçok detay, GPU mimarisi sayesinde artık standartlaşmaktadır. Hidrodinamik modellemelerde (özellikle taşkın analizlerinde) GPU kullanımıyla

erişilebilen ve modelin doğruluğunu dramatik şekilde artırır. Söz gelimi metre-altı çözünürlük içeren verilerle ile daha yüksek detay seviyelerinde (daha hassas konumsal çözünürlükle) işlemler gerçekleştirilebilir. Yine paralel işlem gücü sayesinde Deterministik modeller yerine Monte Carlo Simülasyonları gibi stokastik (Ensemble Modelling) kullanımı ve hesaplanması ile raster tabanlı verilerin ve LiDAR verilerinin işlenmesi ve görselleştirilmesinde de avantajlar sağlanabilir.

Karşılaştırma Tablosu: CPU vs. GPU Detay Seviyesi

Özellik	Geleneksel (CPU-Tabanlı)	GPU-Optimize Edilmiş
Hücre Boyutu	5m - 10m (Kaba)	0.1m - 1m (Hassas)
Senaryo Sayısı	1 (Deterministik)	1000+ (Olasılıksal/Ensemble)
Pürüzlülük	Statik / Alan Bazlı	Dinamik / Hücre Bazlı
Drenaj Sistemi	İhmal edilir veya basitleştirilir	Tam entegre (1D/2D Coupled)
Veri Entegrasyonu	Seyrek LiDAR verisi	Yoğun bulut noktası (Point Cloud)

2.3 Veri Egemenliği ve Federasyonlu Öğrenme

Kamu kurumlarında üretilen verilerin (örneğin, kritik altyapı haritaları, vatandaş kimlik bilgileri, hidrolik ölçümler) stratejik niteliği, bu verilerin işlenmesinde "Veri Egemenliği (Data Sovereignty)" ilkesinin sıkı bir şekilde uygulanmasını gerektirmektedir. Geleneksel bulut bilişim (Cloud Computing) modelleri, verilerin merkezi sunucularda toplanmasını gerektirir ve sınır ötesi veri aktarım (cross-border data transfer) kısıtlamaları ve siber güvenlik riskleri nedeniyle kamu sektörü için her zaman uygun bir çözüm sunmazlar (*Irion, 2012*). Bu durum, “Veri Mahremiyeti (Data Privacy)” ile “Yapay Zeka Destekli Analiz” ihtiyacı arasında bir denge (ödünleşim/trade-off) oluşturmaktadır.

McMahan ve arkadaşları tarafından 2017 yılında önerilen Federe Öğrenme (Federated Learning - FL) yaklaşımı, bu ikilemi aşmak için devrim niteliğinde bir çözüm sunmaktadır. Federe Öğrenme, "veriyi modele taşıma" klasik yöntemini tersine çevirerek, bunun yerine "modeli veriye taşıma" ilkesiyle çalışır. Bu mimaride, eğitim verileri asla kaynak cihazdan (örneğin, kuruluş içindeki bir iş istasyonundan) ayrılmaz. Bunun yerine, her uç düğüm (Edge Node), modelin bir kopyasını kendi yerel verileriyle eğitir ve yalnızca öğrenilen matematiksel parametreleri (gradients/weights) merkezi bir sunucuya gönderir (McMahan ve ark., 2017).

Bu çalışmada önerilen masaüstü grid yapısı, Federe Öğrenme prensiplerini Uç Bilişim (Edge Computing) ile birleştirerek hibrit bir mimari sunmaktadır. Kuruluşun intranet ağında dağıtılan GPU'lar, verilerin kaynakta işlendiği güvenli "hesaplama hücreleri" olarak işlev görür. Yang ve diğerlerinin de belirttiği gibi, bu dağıtık mimari yalnızca Türk Veri Koruma Kanunu (KVKK) ve GDPR gibi yasal düzenlemelere tam olarak uymakla kalmaz, aynı zamanda tek bir noktadan gelen siber saldırıların tüm veri setini tehlikeye atmasını önleyen “tasarımdan gelen güvenlik (security by design)” avantajı da sağlar (Yang ve ark., 2019). Dolayısıyla, atıl durumdaki GPU kaynaklarını bu şekilde kullanmak sadece bir hesaplama tercihi değil, aynı zamanda stratejik bir siber savunma yaklaşımıdır.

3 Metodoloji ve Sistem Mimarisi

3.1 Donanım Heterojenliği ve Envanter Analizi

Tek bir tedarik döneminde kurulan homojen süper bilgisayar kümelerinin aksine, kamu kurumlarının BT altyapıları, yıllar süren ihale süreçlerinin sonucu olarak farklı nesillerden, mimarilerden ve kapasitelerden oluşan oldukça heterojen bir yapı sergilemektedir. Bu çalışmada bahsi geçen senaryoda kullanılacak test ortamı, kurumun envanterindeki iş istasyonlarının Tek Duyarlıklıı Kayan Nokta (Single Precision Floating Point - FP32) performansı ve VRAM kapasitelerine göre sınıflandırılmasıyla oluşacağı varsayılmaktadır.

Bu heterojenliğe bağlı olarak dağıtık sistemler literatüründe “Hesaplama Asimetrisi” olarak adlandırılan bir güçlüğe de neden olmaktadır. Aynı hesaplama havuzunda (pool) modern bir NVIDIA RTX serisi karta sahip bir iş istasyonu ile beş yıllık bir Quadro serisi karta sahip bir iş istasyonunun bulunması, iş yükü eşit olarak dağıtılırsa “Straggler (Yavaş Kalan Düğüm)” sorununa yol açar. Hızlı düğümler işlemlerini tamamlayıp boşta kalırken, yavaş düğümler (Stragglers) işlemin tamamlanma süresini (makespan) belirleyerek genel sistem verimliliğini düşürür (Dean & Barroso, 2013).

Bu sorunu en aza indirmek ve envanteri etkili bir şekilde yönetmek için, mevcut GPU kaynakları NVIDIA Compute Capability sürümlerine ve CUDA çekirdek sayısına göre üç hiyerarşik kademeye ayrılmıştır:

1. Tier-1 (Yüksek Performans): Ampere ve daha yüksek mimarilere sahip birimler (örneğin, RTX A Serisi), büyük ölçekli matris çarpımları ve 2B hidrolik modelleme için optimize edilmiştir.

2. Tier-2 (Orta Performans): Pascal/Turing mimarisine sahip birimler (örneğin, Quadro P/T Serisi), daha düşük VRAM kapasitesine sahip ancak çıkarım (inference) işlemleri için yeterlidir.

3. Tier-3 (Giriş Seviyesi): Hesaplama açısından yoğun ön işleme (pre-processing) görevleri için ayrılmış eski nesil kartlar.

Bu sınıflandırma stratejisi, Brodtkorb ve diğerleri tarafından önerilen “Mimariye Duyarlı Planlama (Architecture-Aware Scheduling)” ilkesine dayanmaktadır ve her görevin donanım yeteneklerine en uygun düğüme atanmasını (mapping) sağlar (Brodtkorb ve ark., 2010). Böylece, heterojenlik bir darboğazdan bir avantaja dönüştürülerek, farklı türdeki iş yüklerinin (bellek yoğun vs. işlem yoğun) paralel yürütülmesine olanak tanır. Heterojen yapıdaki, çok büyük *mesh* (ağ) yapısına sahip 2D sel modellerinin düşük VRAM'li (Tier-3) kartlarda bellek yetersizliği (OOM) hatası alma riski yüksek olduğundan bu gibi durumlar için dinamik bir "iş yükü parçalama" için Tile-Based bir mimari ile dinamik alan ayrıştırma yöntemi en güvenli çözüm olacaktır

3.2 Önerilen Ağ Topolojisi ve Orkestrasyonu

Geleneksel Yüksek Performanslı Hesaplama (HPC) kümeleri, düşük gecikmeli özel ağ donanımı (Infiniband, vb.) ile birbirine bağlı özel sunuculardan oluşurken, bu çalışmada önerilen mimari, mevcut kurumsal Ethernet altyapısı (LAN üzerinden TCP/IP) üzerinde çalışan gevşek bağlantılı bir “Sis Bilişim (Fog Computing)” topolojisi sunmaktadır. Sistemin ölçeklenebilirliği ve yönetim kolaylığı için, endüstri standardı konteyner orkestrasyon platformu olan Kubernetes'in hafif versiyonu olan ve uç cihazlar için optimize edilmiş K3s'ye dayalı bir “Master-Worker” hiyerarşisi tasarlanmıştır (Burns ve ark., 2016).

Önerilen topoloji üç ana katmandan oluşmaktadır:

1. Kontrol Düzlemi (Control Plane / Orchestrator): Bu, işletmenin veri merkezinde bulunan ve sistemin beyni olarak görev yapan merkezi sunucudur. İş yüklerinin dağıtımı (scheduling), düğümlerin sağlık durumunun izlenmesi (health checking) ve tamamlanan görevlerin toplanması bu katmanda gerçekleşir.
2. İşçi Düğümler (Worker Nodes): Bunlar, kurumsal personel tarafından kullanılan GPU donanımına sahip iş istasyonlarıdır. Her düğüm, ana işletim sisteminden (Host OS) izole edilmiş, hesaplama görevlerini gerçekleştiren hafif bir aracı yazılımı (Kubelet) çalıştırır.
3. Sanal Ağ Katmanı (Overlay Network): Bu, tüm konteynerlerin (Pod) fiziksel ağ topolojisinden bağımsız olarak doğrudan birbirleriyle iletişim kurmasına olanak tanıyan düz (flat) bir ağ katmanıdır. Bu katman, CNI (Container Network Interface) standartları çerçevesinde yapılandırılmıştır ve farklı alt ağlardaki (Subnet) cihazların verileri şeffaf bir şekilde değiştirmesine olanak tanır.

Workstation’ların "atıl kapasite" olarak bir hesaplama havuzuna dahil edilmesi, maliyet yönüyle etkin bir çözüm olsa dahi "Güvenilmez Ortam" (Untrusted Environment) oluşturacağından Önerdiğimiz üç katmanlı tipolojide (Orchestrator - Worker - Data), bu düğümlerin operasyonel süreçleri aksatmaması ve veri sızıntısına yol açmaması için katı sınırlamalara ve mimari izolasyona ihtiyaç vardır. Erişim yetkileri ve kapsülleme yükü konteynerlaştırma ile Konteyner, ana makinenin dosya sistemine erişememeli, sadece kendisine atanan GPU ve RAM miktarını kullanabilmelidir. Ayrıcalıksız Kullanıcılar (Non-privileged Users) da Worker Agent (Aracı Yazılım), sistemde "root" veya "admin" yetkisiyle değil, sınırlı yetkiye sahip bir servis hesabı üzerinden koşturulmalıdır. Hesaplamalar esnasında da yerel bir veriye ihtiyaç duyuluyorsa, bu erişim "Read-Only" (Sadece Okunur) olarak kısıtlanmalı, sonuçlar ise sadece merkezi depolama birimine (S3, NFS vb.) yazılmalıdır.

Düğüm Sürekliliği ve Operasyonel İstikrar için de Preemption (Öncelik Tanıma) duraklama modundaki kaynak kullanan makine otomatik olarak iş yükünü bırakan working agentlar kullanılması uygun olacaktır. Checkpointing (Adım Kaydı) ile çevrimdışı kalan düğümlerdeki işler işlem genelinde aksama ve kayıpların önüne geçilebilir ve orkestratörün işi aktif başka düğümlere atama yapması sağlanabilir.

Öte taraftan ağ izolasyonu kapsamında "şifrelenmiş verilerin hesaplama trafiği" için ayrı bir sanal yerel ağ (VLAN) da bu kapsamda değerlendirilebilir.

3.2.1 Konteyner tabanlı izolasyon

Dağıtık sistemlerdeki en büyük zorluklardan biri olan "bağımlılık yönetimi", bu çalışmada konteynerleştirme (Docker) teknolojisi kullanılarak aşılmıştır. Taşkın modelleme yazılımları (HEC-RAS, TUFLOW) ve yapay zeka kütüphaneleri (PyTorch, TensorFlow), gerekli tüm sürücüler ve kütüphanelerle birlikte bir imaja paketlenmiştir (encapsulation). Pahl ve Lee'nin belirttiği gibi, bu yöntem yalnızca kurulum karmaşıklığını ortadan kaldırmakla kalmaz, aynı zamanda yürütülen kodun, altta yatan işletim

sistemi sürümünden bağımsız olarak her düğümde aynı sonucu üreteceğini (Reproducibility) de garanti eder (Pahl ve ark., 2015).

3.3 İş yükü planlaması ve kaynak eşleştirme algoritması

Kurumsal masaüstü grid ortamları, kaynakların her an kullanılamaz hale gelebileceği (volatility) ve birincil kullanıcıların (kurumsal personel) sisteme müdahale edebileceği dinamik bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, standart HPC kümelerinde kullanılan "İlk Giren İlk Çıkar" (FIFO) veya basit "Round Robin" algoritmaları bu iş için yetersizdir. Bu nedenle, Thain ve diğerleri tarafından Condor sisteminde tanımlanan “Sınıflandırılmış İlanlar (ClassAds)” mekanizmasından esinlenerek, Donanım Farkındalıklı ve Kullanıcı Öncelikli (Hardware-Aware & User-Centric) bir planlama algoritması geliştirilmiştir (Thain ve ark., 2005).

3.3.1 Nitelik tabanlı statik eşleştirme (Attribute-Based Static Matchmaking)

İlk aşamada kuyruga performansının her iş (Job), gerektirdiği minimum donanım özelliklerini (Örn: Min_VRAM: 8GB, CUDA_Version: >=11.0) beyan eder. Zamanlayıcı, o an çevrimiçi (Online) olan düğümlerin etiketlerini (Labels) tarayarak, yalnızca bu standartlarda karşılayan aday düğüm havuzunu oluşturur. Bu yöntem, gecikme süresi (OOM - Out of Memory) nedeniyle kapasitesinin çalışma süresi hatalarını (runtime errors) en aza indirir.

3.3.2 Fırsatçı önceliklendirme ve tahliye (Opportunistic Preemption and Eviction)

Sistemin temel kaydı, kurum personelinin günlük iş veriminin asla kesintiye uğramamasıdır. İşçi düğümleri (Worker Nodes) üzerinde çalışan izleme ajansı, HID (Human Interface Device- Klavye/Fare) aktivitelerini ve CPU/RAM kullanım eşiklerini anlık olarak takip eder. Birincil kullanıcı etkileşimi algılandığı anda (Gecikme < 500ms), arka planda çalışan GPU hattının kesilmesi durdurulur (Suspend) veya düğümden tamamen tahliye edilir (Evict). Anderson'un devam ettiği gibi, bu "gönüllü vazgeçme" (voluntary yielding) stratejileri, sistem kurumu içinde kabul görme (sosyal kabul) için teknik bir mecburiyettir (Anderson, 2004).

3.3.3 Hata toleransı ve kontrol noktası kaydı (Fault Tolerance via Checkpointing)

Uzun ömürlü taşkın simülasyonlarının, bir parçalarının kapanmasıyla boşa gitmemesi için “Checkpoint/Restart” seçenekleri belirlenmesi yerinde olacaktır. Uygulama durumu (state), belirli aralıklarla (örneğin her 100 yinelemede bir) merkezi depolama birimine (NFS/MinIO) anlık görüntü (snapshot) olarak değişir. Bir düğüm ağdan düştüğünde (Node Failure), orkestratör bu görevi otomatik olarak başka bir uygun düğüm atar ve işlem en sonda kontrol yerinin (kontrol noktası/checkpoint) devam edeceğinden sisteminin güvenilirliğini (reliability) %99,9 oranında artıracağı düşünülmektedir.

4 Tartışma ve Teknik Darboğazlar

4.1. Ağ Gecikmesi (Network Latency)

Yüksek Performanslı Hesaplama (HPC) sistemlerinde, performansın belirleyici faktörü genellikle işlemci hızı değil, işlemciler arasındaki veri aktarım hızıdır. Bu çalışmada kullanılan kurumsal yerel alan ağı (LAN) altyapısı, standart Gigabit Ethernet (1 Gbps) protokolüne dayanmaktadır. Modern süper bilgisayarlarda kullanılan ve düşük gecikme sunan InfiniBand (200+ Gbps) ara bağlantı teknolojilerine kıyasla, bu altyapı dağıtık sistem mimarisi üzerinde önemli bir sınırlama oluşturmaktadır.

Özellikle Büyük Dil Modellerinin (LLM) dağıtık eğitimi gibi "Model Paralelliği" gerektiren senaryolarda, düğümler arasındaki tümden-tüme (all-to-all) iletişim gereksinimi ve parametre senkronizasyonu (gradient updates) sırasında oluşan ağ trafiği, hesaplama süresini geçersiz kılmaktadır. Li ve meslektaşlarının açıkladığı gibi, iletişim darboğazının hesaplama kazancını azalttığı bu durumlarda, Amdahl Yasasına göre sisteme daha fazla GPU eklemek performansı iyileştirmez; Aksine, gecikmeyi (latency penalty) daha da fazla artırır (Li ve ark., 2014).

Ancak, bu çalışmanın odak noktası olan Hidrodinamik Simülasyonlar ve Yapay Zeka Çıkarım süreçleri (Inference), doğası gereği "Son Derece Paralel (Embarrassingly Parallel)" veya "Kaba Taneli (Coarse-Grained)" iş yükleri kategorisine girer. Bu senaryoda:

1. Düşük İletişim Frekansı: Her düğüm (GPU), görevi aldıktan sonra (örneğin, belirli bir coğrafi alan için taşkın verileri), ağ bağlantısına ihtiyaç duymadan dakikalar veya saatler boyunca yerel hesaplama (local computing) yapar.

2. Yüksek Hesaplama Yoğunluğu: Düğümler arası veri aktarımı (I/O) yalnızca sürecin başında ve sonunda gerçekleşir.

Sonuç olarak, önerilen sistemde Hesaplama/İletişim Oranı (CCR) yüksek tutulduğu için, standart Ethernet altyapısının getirdiği gecikme dezavantajı toplam işlem süresi (total makespan) üzerinde marjinal bir etkiye sahiptir ve sistemin verimliliğini %85'in üzerinde tutar (Foster, I., 1995).

4.2 Siber Güvenlik, Veri Gizliliği ve İzolasyon

Kamuya açık bulut sağlayıcılarında kamu verilerinin işlenmesi, çoklu müşteriye sahip (multi-tenant) mimarilerin doğası gereği veri sızıntısı ve yetkisiz erişim risklerini beraberinde getirir. Takabi vd.'nin belirttiği gibi, verilerin kontrolünün üçüncü taraf hizmet sağlayıcılarına devredilmesi, devlet kurumları için kabul edilemez bir "Güven ve Kontrol Kaybı" yaratır (Takabi ve ark., 2010). Bu çalışmada önerilen "Kurumsal Masaüstü Grid" mimarisi, "Tasarım Gereği Güvenlik (Security by Design)" ilkesiyle bu riskleri en aza indirir.

4.2.1 Ağ sementasyonu ve air-gap

Önerilen sistem, dış internetten (veya sıkı güvenlik duvarlarıyla) izole edilmiş kuruluşun intranet ağında çalışır. Bu yapı, siber güvenlik literatüründeki Air-Gap benzer bir koruma sağlayarak, sistemin dış DDoS saldırılarına veya veri hırsızlığı girişimlerine (Attack Surface=Saldırı Yüzeyi) maruz kalma olasılığını neredeyse sıfıra indirir. Veri paketleri (örneğin, hassas baraj doluluk oranları veya askeri haritalar) yerel ağ anahtarlarından (LAN Anahtarları) ayrılmadığı için, ulusal KVKK (Kişisel Veri Koruma Yasası) ve veri egemenliği düzenlemelerine %100 uyum sağlanır.

4.2.2 Konteyner sanal alanı

Dağıtık sistemlerdeki bir diğer tehdit vektörü, iş istasyonlarına zarar veren kötü amaçlı veya hatalı (malicious/buggy code) koddur. Bu risk, konteynerleştirme teknolojisinin sunduğu izolasyon yetenekleriyle azaltılmıştır. Her hesaplama görevi, ana işletim sisteminden (Ana İşletim Sistemi) izole edilmiş ve geçici, salt okunur (read-only) bir dosya sistemine sahip Docker konteynerleri içinde yürütülür. Sultan ve diğerlerinin analizine göre, bu yöntem uygulamanın sistem kaynaklarına doğrudan erişmesini (kernel namespace isolation) engeller ve böylece potansiyel bir güvenlik ihlalinin konteyner içinde kalmasını ve kurumsal ağa yayılmasını (lateral movement) önler (Sultan ve ark., 2019).

Sonuç olarak, mimari, verilerin bulunduğu güvenli limana bilgi işlem gücü getirerek, verileri buluta taşıma risklerini ortadan kaldırarak hibrit bir savunma hattı oluşturur.

4.3 Enerji Verimliliği ve Yeşil Bilişim

Bilgi ve İletişim Teknolojileri (BİT) sektörünün küresel karbon emisyonlarındaki payı %2 ile %4 arasına yükselmiş olup, Yüksek Performanslı Bilgi İşlem (HPC) mimarilerinde enerji verimliliğini bir tercih olmaktan çıkarıp bir tasarım gerekliliğine dönüştürmüştür. Yeni veri merkezi kurulumlarına yönelik geleneksel yaklaşımlar, yalnızca yüksek işletme enerjisi (OpEx) gerektirmekle kalmaz, aynı zamanda donanım üretiminden kaynaklanan önemli "Gömülü Karbon (Embodied Carbon)" maliyetlerine de yol açar.

Gupta ve meslektaşlarının Harvard Üniversitesi ve Facebook ile işbirliği içinde yayınladığı çarpıcı bir analize göre, modern bir işlemcinin yaşam döngüsü boyunca neden olduğu karbon emisyonlarının büyük bir kısmı, kullanım sırasında (elektrik tüketimi) değil, üretim sırasında (imalat) meydana gelmektedir (Gupta ve ark., 2021). Bu bağlamda, kamu envanterindeki mevcut ve atıl GPU'ların kullanılması, yeni donanım satın alma ihtiyacını ortadan kaldırarak projenin toplam karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Ayrıca, önerilen dağıtık mimari, veri merkezleri için en büyük enerji gider kalemi olan Soğutma Maliyetleri açısından avantajlar sağlamaktadır.

● Merkezi Veri Merkezi: Enerjinin önemli bir kısmı (yaklaşık %30-40) sunucuların soğutulmasına harcanmaktadır (Güç Kullanım Etkinliği (PUE) > 1,5).

● Dağıtık Ofis Ağı(Gridi): İş istasyonları zaten iklim kontrollü ofis ortamlarında bulunmaktadır. GPU'nun gece çalışırken ürettiği az miktardaki ısı, geniş ofis alanında dağıtılarak ek endüstriyel soğutma yatırımına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Sistemde kullanılan "Enerjiye Duyarlı Planlama" algoritmaları, yalnızca aktif olarak işlem yapan düğümleri uyanık tutarken, boşta kalan cihazlar Wake-on-LAN (WoL) protokolü kullanılarak derin uyku moduna (S3/S4 Durumu) alınır. Beloglazov tarafından tanımlanan bu dinamik güç yönetimi stratejisi, sistemin FLOPS/Watt (Watt başına işlem gücü) verimliliğini en üst düzeye çıkarır (Beloglazov ve ark., 2011).

Kurumsal ağlarda Wake-on-LAN (WoL) protokolünün en büyük engeli, "Magic Packet" olarak adlandırılan UDP paketlerinin yönlendiriciler (router) ve güvenlik duvarları tarafından varsayılan olarak engellenmesidir. WoL paketlerinin genellikle "Directed Broadcast" (Yönlendirilmiş Yayın) olarak çalışması ve bu yöntemin güvenlik açıklarına (DDoS/Smurf saldırıları gibi) davetiye çıkarmasını buna temel sebep olarak gösterilebilir. Bu durumu aşmak için WoL Proxy / Relay Agent Kullanılması, Subnet Directed Broadcast Yapılandırması, offline cihazların doğrudan fiziksel porta erişimine yönelik Statik ARP Kayıtları (ARP Binding) gibi yöntemler denebilir. Bazı profesyonel iş serisi cihazlarda bu sorunu Donanım Seviyesinde Müdahale (Hardware-Level Management) sağlayan ağ kartı üzerinden yönetim de sağlanabilmektedir.

5. Sonuç ve Politika Önerileri

5.1 Olası Teknik Sonuçlar ve Performans Değerlendirmesi

Bu çalışma, DSI yerel alan ağında (LAN) simüle edilebilecek heterojen bir GPU kümesi üzerinde testler yapılması ve "Fırsatçı Hesaplama" yöntemi kullanılarak atıl kamu kaynaklarının orkestrasyonunun teknik fizibilitesini ve maliyet etkinliğini araştırılması önerilmektedir. Elimizde deneysel bulgular yer almamasına karşın temelde üç ana başlık altında aşağıda bahsi geçen tahmini getirileri sağlayacağı öngörülmektedir:

1 Yüksek Verim (High Throughput): Tek GPU'dan oluşan Merkezi H100 sunucusuna kıyasla 100x Quadro bir Grid kullanılması durumunda, ağ darboğazları nedeniyle tek bir taşkın simülasyonunun gecikmesinde %15-20'lik bir gecikme(latency) gözlemlenecektir. Bununla birlikte, sistemin toplam verimi (throughput), düğüm sayısı arttıkça doğrusal bir artış göstermesi beklenmektedir. Bu, sistemin Gustafson Yasası'na uygun olarak "Zayıf Ölçeklendirme (Weak Scaling)" performansı sergilediğini göstereceği; başka bir deyişle, veri kümesi büyüdükçe ve iş parçacığı sayısı arttıkça sistem verimliliğinin korunacağı düşünülmektedir (*Gustafson ve ark., 1988*). Bu mimari, acil durumlarda binlerce farklı senaryoyu aynı anda çalıştırmak için merkezi sistemlere göre daha esnek bir yapı sunar (Topluluk Tahmini). Bu, "Verimsizliğin Güce Dönüştüğü (High-Throughput Computing)" noktasıdır.

2 Sıfıra Yakın Marjinal Maliyet: Kuruluşun envanterindeki (Sunk Cost) donanımın kullanımını (CapEx ≈ 0) ve operasyon sırasındaki yalnızca marjinal enerji tüketimini dikkate alarak, önerilen sistemin "Birim İşlem Başına Maliyet (Cost-per-FLOPS)" değeri, ticari bulut hizmetlerine (AWS/Azure) kıyasla %90'dan fazla ve yeni kurum içi veri merkezi yatırımına kıyasla %70 daha düşük olabileceği öngörülmektedir. Kamu kaynaklarında 'Hız' (Latency) odaklı değil, 'Verim' (Throughput) odaklı bir mimari değişikliği; milyon dolarlık yeni donanım yatırımı yapmadan, ulusal afet simülasyon kapasitemizi 10 katına çıkarabilir.

3 Hata Toleransı ve Kararlılık: Kullanıcı önceliği (User Preemption) nedeniyle düğüm kayıpları, uygulanan "Kontrol Noktası/Yeniden Başlatma (Checkpoint/Restart)" mekanizmaları sayesinde veri kaybına yol açmayacağı, sistem, %20'ye kadar anlık düğüm kaybı (Churn Rate) ile bile iş akışlarını başarıyla tamamlanacağı ve toplam işlem süresinde yalnızca marjinal bir artışın olabileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak, mimari "Model Eğitimi" gibi iletişim yoğun görevlerde sınırlı performans gösterse de, hedeflenen "Simülasyon" ve "Çıkarım" iş yükleri için endüstri standartlarını karşılayan sürdürülebilir ve güvenli bir çözüm olması muhtemeldir. Kurumsal ihtiyaçlara göre çalışan performans ve verimliliğini olumlu etkileyecek güvenli şekilde LLM'lerin kuruluş içerisinde kullanımına da olanak sağlar.

5.2 Yönetim Önerileri ve Kamu Politikası Entegrasyonu

Bu çalışmada sunulan teknik mimarinin başarısı, yalnızca yazılım algoritmalarının etkinliğine değil, aynı zamanda kamu kurumlarının organizasyonel kültüründe ve tedarik süreçlerinde temel bir paradigma değişimine de bağlıdır. Teknik altyapının sürdürülebilirliği için aşağıdaki yönetim reformları şarttır:

Yeşil Kamu Alımları ve Şartname Standardizasyonu: Mevcut kamu alım süreçleri genellikle "ilk yatırım maliyetine" (satın alma fiyatı) odaklanmaktadır. Ancak, Cheng vd.'nin belirttiği gibi, Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO) yaklaşımı benimsenmeli ve donanım tedarik şartnamelerine "Network Uyumluluğu" kriterleri eklenmelidir (Cheng ve ark., 2018).
Öneri: Gelecekteki iş istasyonu alımlarında; Wake-on-LAN (WoL) desteği, minimum VRAM kapasitesi ve CUDA Hesaplama Yeteneği sürümü, teknik özelliklerde "zorunlu" maddeler haline getirilmelidir. Bu şekilde, satın alınan her cihaz, kutudan çıkar çıkmaz ulusal bilgi işlem ağında potansiyel bir düğüm olacaktır.

"Hesaplama Ortak Alanı" Kültürü: Kamu kurumlarında yaygın olan "birimler arası silo" yaklaşımı, kaynak paylaşımının önündeki en büyük engeldir. Bir departmanın/kurumun bütçesiyle satın alınan donanımın, başka bir departmanın/kurumun gece çalışmaları için kullanılması, idari direnişle karşılaşabilir.
Öneri: OECD'nin "Dijital Hükümet" raporlarında vurgulandığı gibi, donanım sahipliğinin departmanlardan merkezi bir "Kaynak Havuzu" yönetimine devredildiği ve departmanların kullandıkları işlem gücüne bağlı olarak bu havuzdan "Sanal Krediler" kazandığı oyunlaştırılmış bir teşvik mekanizması kurulmalıdır (*OECD, 2019*). Bu sayede kullanım istatistiklerinin de metrik olarak ölçümü ve fiyatlandırma gibi konularda da daha sağlam bir zemin bulmuş olacaktır.

Ulusal Strateji ile Entegrasyon: Bu proje, bağımsız bir BT girişimi olarak kalmamalıdır; Bu, Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayımlanan "Ulusal Yapay Zeka Stratejisi (2021-2025)" belgesinin "Önlem 3.2: Kamu Veri Alanı ve Altyapısının Geliştirilmesi" başlığı altında resmi bir eylem planı olarak entegre edilmelidir.

5.3 Ulusal Strateji Entegrasyonu ve Yol Haritası

Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayınlanan "Ulusal Yapay Zeka Stratejisi (2021-2025)" belgesi, Türkiye'nin küresel yapay zeka endekslerinde ilk 20 ülke arasında yer almasını hedeflemektedir. "Stratejik Öncelik 3: Yapay Zeka Ekosistemi ve Altyapısının Geliştirilmesi" başlığı altında, "Ölçüt 3.2: Kamu Veri Alanı ve Hesaplama Altyapıları" maddesi, kamu kurumlarının verileri ortak bir değer olarak kullanabileceği güvenli altyapıların kurulmasını zorunlu kılmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi, 2021).

Bu çalışma kapsamında önerilen "Dağıtık Kamu Şebekesi Mimarisi", bu stratejik hedefe ulaşmak için tamamlayıcı ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır. Devletin mevcut merkezi süper bilgisayar yatırımlarının (TRUBA) yerini almak yerine, önerilen yapı; Bu merkezlerin "hafif ve orta ölçekli" iş yüklerini (Çıkarım, ETL, Ön Simülasyon) üstlenerek, merkezi kaynakların yalnızca en kritik görevler (LLM Eğitimi, Nükleer Simülasyonlar) için ayrılmasını sağlayan bir "Yük Dengeleyici (Load Balancer)" görevi görür.

Önerilen sistem kamu kurumlarının kendi içerisinde hatta kurumlar ve bakanlıklar arasında katmanlı ve farklı grid yapılarına özelleştirilebilir olduğundan ölçeklenebilir bir mimariye sahiptir. Sistem stratejik kamu kurumlarının verilerinin yerinde işlenmesi ile veri egemenliği perspektifinden ulusal düzeyde bir güvenlik boyutu sağlamasının yanı sıra, kamu kurumlarına hizmet ya da tedarik sağlayıcısı olsun ya da olmasın özel sektörün de ticari sır kapsamında değerlendirilebilecek verilerinin işlenmesine de olanak sağlayabilir. Özetle yalnız G2G değil G2B ve B2B için de genişletilebilir.

Önerilen model DSİ özelinde Mevzuat, teknik şartnameler ve ihale dokümanları, DSİ gibi büyük yatırımcı kuruluşların "hafızasını" oluşturur ve genellikle yapılandırılmamış (unstructured) veriler olarak değerlendirilebilir. RAG (Retrieval-Augmented Generation - Veri Artırımlı Üretim) mimarisi ve Doküman Zekası (Document Intelligence) teknikleriyle GPU kümeleri bu verileri "akıllı ve aranabilir birer varlığa" dönüştürmek için idealdir. Bu sayede Semantik Arama ve Mevzuat Uyumluluğu sağlanabilir, dokümanlar üzerinde vektör tabanlı aramalar, mevzuattaki çelişkiler analiz edilebilir. Akıllı Taslak Oluşturma, Birim Fiyat ve Poz Analizleri, yaklaşık maliyet tahminleri, OCR ve arşivlerin sayısallaştırılması, EBYS (Elektronik Belge Yönetim Sistemi) ile entegre olarak gibi konularda yapay zeka avantajlarından faydalanılabilinir.

Kamu ya da özel sektör, tüm kurum ve kuruluşlar ölçeğinde ise bu yaklaşım farklı kullanım senaryolarına uyarlanabilir.

Tarım ve Orman Bakanlığı (Hassas Tarım): Uydu görüntülerinden (Sentinel/Landsat) bitki sağlığı indeksi (NDVI) analizi, ekili alan tespiti ve rekolte tahmini gibi işlerde GPU'lar, milyonlarca hektar arazinin görüntü işleme sürecini saatler seviyesine indirebilir.

Adalet Bakanlığı'nın dijitalleşme vizyonu (UYAP, SEGBİS vb.) için kritik bir "teknolojik sıçrama" tahtası olabilir. İçtihat tarama, özetleme, dava dilekçe ve sözleşmelerde çelişkili ifadelerden kaynaklı anomalilerin tespiti, duruşma kayıtların Sesten Metne (Speech-to-Text) çevrilmesinde, duygu durum ve ifade analizleri, adli bilişim (Digital Forensics) alanlarında kullanılabilir.

AFAD (Bütünleşik Afet Yönetimi): Taşkın dışındaki afetlerin (heyelan yayılımı, çığ düşme yolları ve deprem sonrası sismik dalga yayılım simülasyonları) yüksek çözünürlüklü modelleri için kullanılabilir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM): Yerel (mikro-ölçekli) hava tahmin modellerinin (WRF gibi) çok daha küçük mesh yapılarında (örneğin 100m çözünürlükte) koşturularak şehir bazlı ani yağış uyarılarının isabet oranının artırılmasına olanak sağlar.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (Hava Kalitesi ve Isı Adası): Şehirlerdeki hava kirliliği dağılım simülasyonları ve binaların yarattığı rüzgar koridorlarının analizi gibi kentsel dönüşüm planlarında "enerji etkin" yerleşim tasarımları için kritiktir.

Belediyeler (Akıllı Şehir): Mevcut güvenlik kameraları üzerinden gerçek zamanlı trafik akış analizi, plaka tanıma ve toplu taşıma optimizasyonu için derin öğrenme modellerinin eğitilmesi gerçekleştirilebilir.

Roberts ve diğerlerinin ulusal yapay zeka stratejilerinin karşılaştırmalı analizinde belirttiği gibi, başarılı bir ulusal ekosistem yalnızca büyük merkezi yatırımlarla değil, aynı zamanda bilgi işlem gücünün tabana dağıtıldığı hibrit modellerle de (bilgi işlem demokratikleşmesi) mümkündür (Roberts ve ark., 2021). Bu bağlamda, kamu envanterindeki atıl GPU'ları ulusal bir havuza dönüştürme projesi, Strateji Belgesinde tanımlanan "Ulusal ve Yerli Teknoloji Girişimi" vizyonuyla mükemmel bir şekilde örtüşmektedir; Türkiye'nin veri egemenliğini korurken bilgi işlem kapasitesini artırmasının en uygun maliyetli yoludur.

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

Anderson, D. P. (2004). BOINC: A system for public-resource computing and storage. Proceedings of the 5th IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing, 4–10. https://doi.org/10.1109/GRID.2004.14

Beloglazov, A., Buyya, R., Lee, Y. C., & Zomaya, A. (2011). A taxonomy and survey of energy-efficient data centers and cloud computing systems. Advances in Computers, 82, 47–111. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385512-1.00003-2

Bernstein, D. (2014). Containers and cloud: From LXC to Docker to Kubernetes. IEEE Cloud Computing, 1(3), 81–84. https://doi.org/10.1109/MCC.2014.51

Brodtkorb, A. R., Dyken, C., Hagen, T. R., Hjelmervik, J. M., & Storaasli, O. O. (2010). State-of-the-art in heterogeneous computing. Scientific Programming, 18(1), 1–33. https://doi.org/10.3233/SPR-2010-0291

Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS river analysis system user's manual (Version 5.0). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Burns, B., Grant, B., Oppenheimer, D., Brewer, E., & Wilkes, J. (2016). Borg, Omega, and Kubernetes. Queue, 14(1), 70–93. https://doi.org/10.1145/2898442.2898444

Cheng, W., Appolloni, A., D'Amato, A., & Zhu, Q. (2018). Green public procurement, missing concepts and future trends: A critical review. Journal of Cleaner Production, 176, 770–784. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.027

Dean, J., & Barroso, L. A. (2013). The tail at scale. Communications of the ACM, 56(2), 74–80. https://doi.org/10.1145/2408776.2408794

Deloitte Insights. (n.d.). Future-ready AI infrastructure: Building the foundation for the next era of computing. https://www.deloitte.com/us/en/insights/topics/digital-transformation/future-ready-ai-infrastructure.html

Desell, T., et al. (2010). An asynchronous Newton method for capturing complex synthetic actors on clusters and volunteer computing grids. Journal of Parallel and Distributed Computing.

Foster, I. (1995). Designing and building parallel programs. Addison-Wesley.

Gupta, U., Kim, Y. G., Lee, S., Tse, J., et al. (2021). Chasing carbon: The elusive environmental footprint of computing. Proceedings of the IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA). https://doi.org/10.1109/HPCA51647.2021.00039

Gustafson, J. L. (1988). Reevaluating Amdahl's law. Communications of the ACM, 31(5), 532–533. https://doi.org/10.1145/42411.42415

Irion, K. (2012). Government cloud computing and the national data sovereignty jurisdiction. Policy & Internet, 4(3–4), 40–71. https://doi.org/10.1002/poi3.10

Kalyanapu, A. J., Burian, S. J., & McPherson, T. N. (2011). Assessment of GPU computational enhancement to a 2D flood forecasting model. Environmental Modelling & Software, 26(8), 1009–1016. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.003

Kondo, D., Taufer, M., Brooks, C. L., Casanova, H., & Chien, A. A. (2004). Characterizing and evaluating desktop grids: An empirical study. Proceedings of the IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). https://doi.org/10.1109/IPDPS.2004.1303139

Li, M., Andersen, D. G., Park, J. W., Smola, A. J., et al. (2014). Scaling distributed machine learning with the parameter server. Proceedings of the 11th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 14), 583–598.

Marinos, C., & Fasli, M. (2011). The impact of heterogeneity on the performance of public resource computing systems. Proceedings of the 11th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. https://doi.org/10.1109/CCGrid.2011.36

McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & y Arcas, B. A. (2017). Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 1273–1282.

Mittal, S., & Vetter, J. S. (2015). A survey of methods for analyzing and improving GPU energy efficiency. ACM Computing Surveys, 47(2), Article 19. https://doi.org/10.1145/2659461

OECD. (2019). The path to becoming a data-driven public sector. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/059814a7-en

Pahl, C., & Lee, B. (2015). Containers and clusters for edge cloud architectures: A technology review. Proceedings of the 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud. https://doi.org/10.1109/FiCloud.2015.35

Roberts, H., Cowls, J., Morley, J., Taddeo, M., Wang, V., & Floridi, L. (2021). The Chinese approach to artificial intelligence: An analysis of policy, ethics, and regulation. AI & Society, 36, 59–77. https://doi.org/10.1007/s00146-020-00992-2

Singla, A., Sukharevsky, A., Hall, B., Yee, L., Chui, M., & Balakrishnan, T. (2025). The state of AI in 2025: Transitioning from pilot to impact. McKinsey & Company (QuantumBlack).

Smith, L. S., Liang, Q., James, P., & Lin, W. (2020). General-purpose graphic processing unit (GPGPU) accelerated 2D flood modelling. Environmental Earth Sciences, 79, Article 15. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8776-6

Sultan, S., Ahmad, I., & Dimitriou, T. (2019). Container security: Issues, challenges, and the road ahead. IEEE Access, 7, 52976–52996. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911732

Takabi, H., Joshi, J. B. D., & Ahn, G. J. (2010). Security and privacy challenges in cloud computing environments. IEEE Security & Privacy, 8(6), 24–31. https://doi.org/10.1109/MSP.2010.186

Thain, D., Tannenbaum, T., & Livny, M. (2005). Distributed computing in practice: The Condor experience. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 17(2–4), 323–356. https://doi.org/10.1002/cpe.938

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı & Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi. (2021). Ulusal yapay zeka stratejisi 2021–2025. Ankara.

The White House. (2025, November). Launching the Genesis Mission: Securing American leadership in artificial intelligence and high-performance computing. https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/11/launching-the-genesis-mission/

Viñas, M., et al. (2020). Deep learning on volunteer computing: A review. Future Generation Computer Systems.

Yang, Q., Liu, Y., Chen, T., & Tong, Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 10(2), Article 12. https://doi.org/10.1145/

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147 p87-106 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p87-106

Araştırma Makalesi / Research Article

Probabilistic Design of River Jetties by Monte Carlo Simulation

Nehir Mahmuzlarının Monte Carlo Simülasyonu ile Olasılıksal Tasarımı

Arif UĞURLU[1]* ,Can Elmar BALAS[2]

[1]*Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Ankara-Türkiye*
[2]*Gazi Üniversitesi, Deniz ve Su Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara, Türkiye*

**Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: arif.ugurlu@uab.gov.tr*

Geliş (Received): 19.12.2025, Düzeltme (Revised): 12.01.2026, Kabul (Accepted): 15.01.2026

ABSTRACT

The design of coastal structures is inherently associated with multiple sources of uncertainty, among which the design wave height constitutes the most significant parameter. When the design wave height, determined through statistical methods, is directly substituted into the Hudson formula, the resulting design is based on a single deterministic value. However, under identical environmental conditions, the design wave height may exhibit considerable variability. Consequently, the adoption of a probabilistic design approach, rather than a purely deterministic one, becomes essential to ensure an adequate level of structural safety. Within the scope of this study, probabilistic design analyses were conducted using the Monte Carlo Simulation (MCS). The Monte Carlo Simulation of the Hudson Limit State Function facilitates the probabilistic design of jetties by explicitly accounting for uncertainties inherent in the governing parameters. The primary advantage of this approach lies in its capability to systematically evaluate uncertainties affecting the structure — particularly variations in the design wave height under design conditions — and to estimate the structural reliability more realistically and robustly. For the probabilistic assessment, a total of 30,000 simulations were performed by assigning appropriate probability distributions to key uncertain parameters, including the design wave height. The results obtained were found to agree with the design standard developed by Det Norske Veritas (DNV) in 1992 for marine structures, which specifies a target reliability level of 10^{-3}. The reliability indices derived from the MCS exceeded this threshold, indicating that the proposed design approach achieves a higher level of structural safety. The findings of this study clearly demonstrate that probabilistic design represents the most reliable and rational solution for designing coastal structures, which are characterized by substantial inherent uncertainties arising from their environmental and operational conditions. In this context, incorporating probabilistic design methodologies into the regulatory frameworks of governing authorities responsible for coastal structure design is crucial. Within the scope of the study, the wind and wave climates of the case study were obtained using the HYDROTAM-3D model.

Keywords: Coastal structures, HYDROTAM-3D, Coastal Engineering, Monte Carlo Simulation, Probabilistic Design.

ÖZ

Kıyı yapılarının tasarımı doğası gereği birden fazla belirsizlik barındırır. Bu belirsizliklerin en bilineni tasarım dalgası yüksekliğidir. İstatistiki yöntemlerle belirlenen tasarım dalgası yüksekliği Hudson formülüne girildiğinde tek bir değer üzerinden tasarım yapma şansı olmaktadır. Ancak tasarım dalgasının tahmini değişkenlik içermektedir. Bu nedenle belirleyici tasarım yerine olasılıksal tasarım yapılması yapı güvenliği açısından bir zaruret olarak ortaya çıkmaktadır. Olasılıksal tasarım için makale kapsamında Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ile çalışmalar yapılmıştır. Hudson Limit Durum Fonksiyonu'nun Monte Carlo Simülasyonu, mahmuzların (jetty) olasılıksal tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Olasılıksal tasarım yaklaşımının temel üstünlüğü, tasarım koşulları altında tasarım dalga yüksekliğindeki değişimler başta olmak üzere, yapıyı etkileyen belirsizliklerin değerlendirilmesine ve güvenirlik düzeyinin daha gerçekçi bir biçimde belirlenmesine imkân tanımasıdır. Olasılıksal tasarım için belirsizliklere (tasarım dalgası, su seviyesi değişimi vs.) atanan dağılımlar altında 30.000 simülasyon yapılmış ve Det Norske Veritas'ın, 1992 yılında deniz yapıları

için geliştirdiği tasarım standardına uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bu standartta, hedef güvenilirlik düzeyi 10^{-3} olarak tanımlanmıştır. MCS sonucu elde edilen değerler 10^{-3} sınırından daha yüksek güvenirlikte sonuçlar vermiştir. Tasarım koşulları gereği bünyelerinde yüksek belirsizlikler barındıran kıyı yapılarının tasarımı için olasılıksal tasarımın en güvenilir çözüm olduğu makale kapsamında elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Bu duruma bağlı olarak kıyı yapıları tasarımlarının yasal haklarına sahip düzenleyici kurumların mevzuatlarına olasılıksal tasarımın eklenmesi büyük önem arz etmektedir. Makale kapsamında yapılan önek çalışmada bölgenin rüzgar ve dalga iklimleri HYDROTAM-3D ile elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kıyı Yapıları, HYDROTAM-3D, Kıyı Mühendisliği, Monte Carlo Simülasyonu, Olasılıksal Tasarım.

1 Introduction

The study area encompasses the coastal region of the Mediterranean Sea, located in Antalya Province, as shown in Figures 1 and 2. The bathymetry of the project area and the model grid system used in the modeling procedure are presented in Figure 33.



Figure 1. Geographic location of the study area (Google Earth, 2026)



Figure 2. Location of study area (Google Earth, 2026)

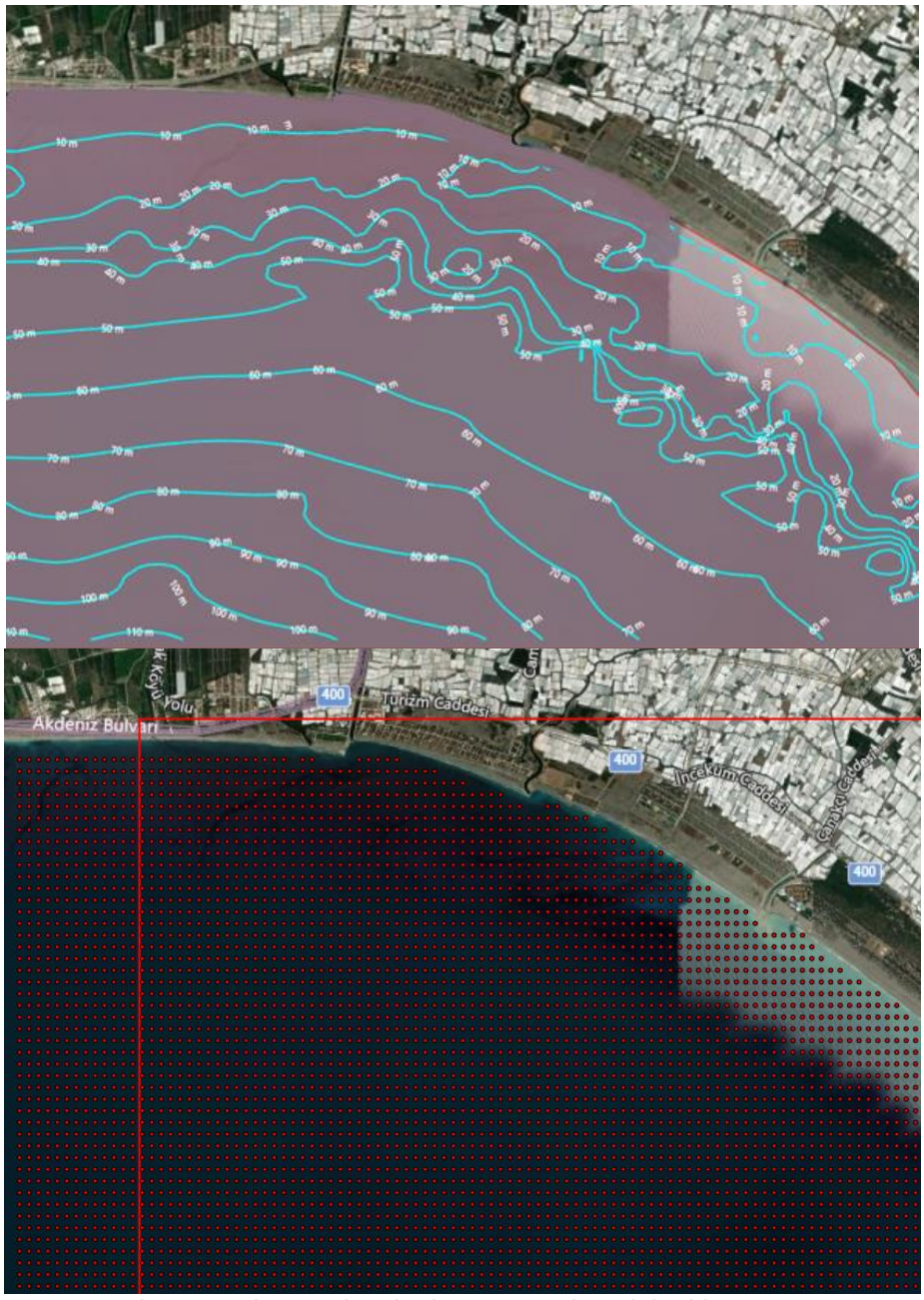


Figure 3. Akmaz River bathymetry and model grid system

HYDROTAM-3D (2026) is a three-dimensional hydrodynamic modeling framework that is deployed to represent coastal and nearshore processes under a wide range of environmental forcings. By numerically resolving the governing mass and momentum conservation relationships in three dimensions, the model enables scenario-based evaluation of the hydrodynamic response to variable boundary conditions (e.g., wind and wave forcing, water-level fluctuations, and circulation patterns). In this sense, HYDROTAM-3D (2026) provides a physics-based basis for forecasting the implications of environmental variability and for propagating forcing-related uncertainties into the design-relevant response parameters used in coastal engineering applications (Balas and Özhan, 2003).

Recent studies have increasingly leveraged Monte Carlo Simulation (MCS) to formalize uncertainty in coastal design by treating key inputs as random variables and repeatedly sampling from their probabilistic descriptions to obtain outcome distributions. Uğurlu and Balas (2024) used MCS to quantify the probability of different system responses in processes that cannot be deterministically predicted due to the inherent randomness of environmental loading and material/structural parameters; their findings were reported to be consistent with the reliability concepts and acceptance criteria referenced in Det Norske Veritas (1992). Building on this direction, Uğurlu et al. (2024) proposed a hybrid design model intended to support jetty design under probabilistic conditions, to improve robustness relative to purely

deterministic approaches by explicitly incorporating future uncertainty sources associated with global-warming-driven changes (Uğurlu et al., 2024). In the present article, that hybrid framework is applied as a case study to a river jetty located in the Mediterranean Sea region of Türkiye, thereby enabling a direct comparison of probabilistic and deterministic design outcomes for a representative coastal structure.

Complementary evidence for the value of risk-informed approaches is provided by Balas et al. (2012, 2025) and Durap et al. (2023), who emphasize that risk-based design models can explicitly account for future climate and environmental-driven uncertainties (e.g., sea-level rise trajectories and evolving forcing characteristics) to better support long-term infrastructure sustainability. In their analysis, a lifetime failure probability on the order of 10^{-3} was reported, implying that, when evaluated against the adopted design standards, the structure remains within an acceptable reliability range even under the considered risk parameters (Balas et al., 2025; Balas, 2023). Collectively, these studies indicate that, although research activity on probabilistic coastal design has increased in recent years, the overall body of literature remains comparatively limited. Accordingly, this study is positioned to help narrow this gap by providing a systematic contribution to probabilistic design practice and by demonstrating a structured methodology that links physics-based modeling, uncertainty propagation, and reliability-oriented performance metrics.

2 Material and Methods

2.1 Wind Climate

To determine the wind climate of the project area, hourly wind data recorded at the Finike Meteorological Station, obtained from the Turkish State Meteorological Service, covering the period from 1970 to 2024, were analyzed by HYDROTAM-3D (2026). HYDROTAM-3D determined the frequency of wind occurrences by direction and constructed annual wind rose diagram. Figure 4 demonstrates an analysis of 54 years of hourly wind data from the ECMWF (2016) Operational Archive 0.1 which indicates that wind speeds of 4 m/s and above predominantly blow from the sea, within the southerly (S) to south–southwesterly (SSW) directional sector, while secondarily they blow from land, mainly from the north–northwesterly (NNW) direction. Long-term wind statistics for SW, SSW, and WSW directions are also given in Figure 5, Figure 6 and Figure 7. Monthly average and extreme wind speed values are given in Figure 8. The monthly average wind speed value is 3 m/s for the area of interest, according to Figure 88.

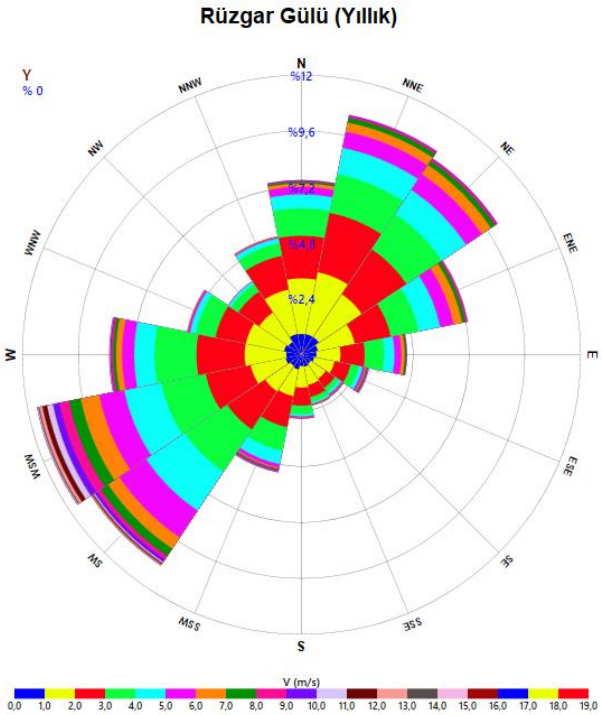


Figure 4. Annual wind rose based on Finike Meteorological Station data from 1970 to 2024 (HYDROTAM-3D, 2026).

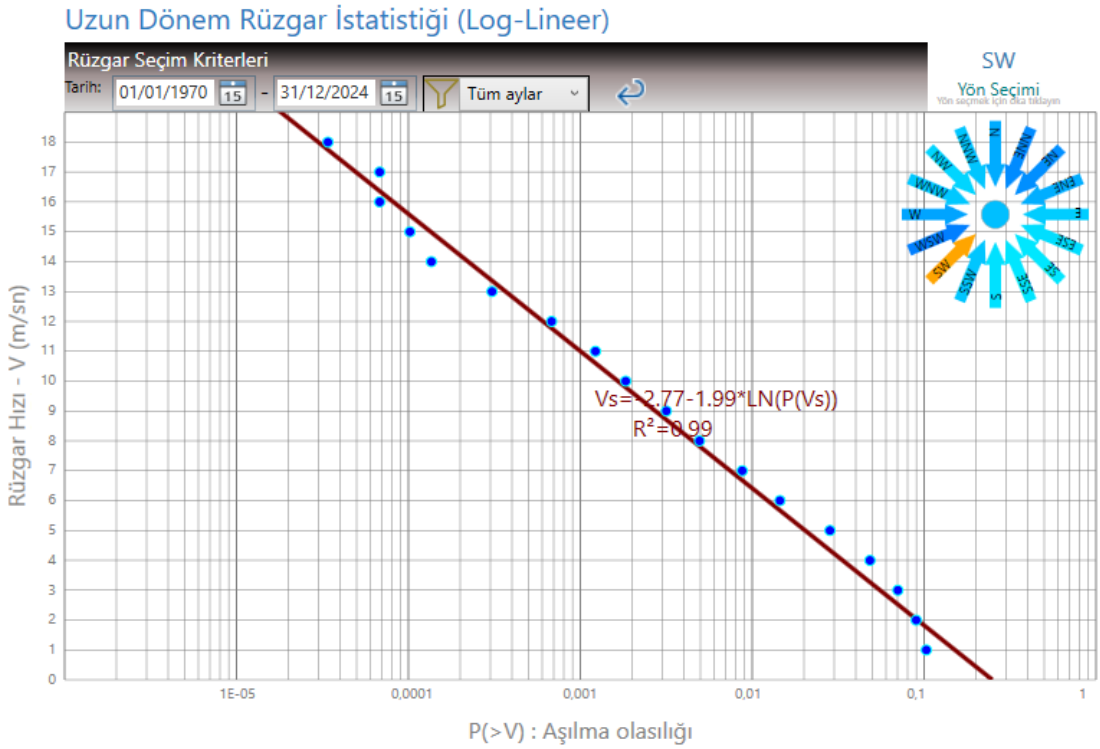


Figure 5. Long-term wind statistics based on Finike Meteorological Station data from 1970 to 2024 for the Southwest (SW) direction (HYDROTAM-3D, 2026).

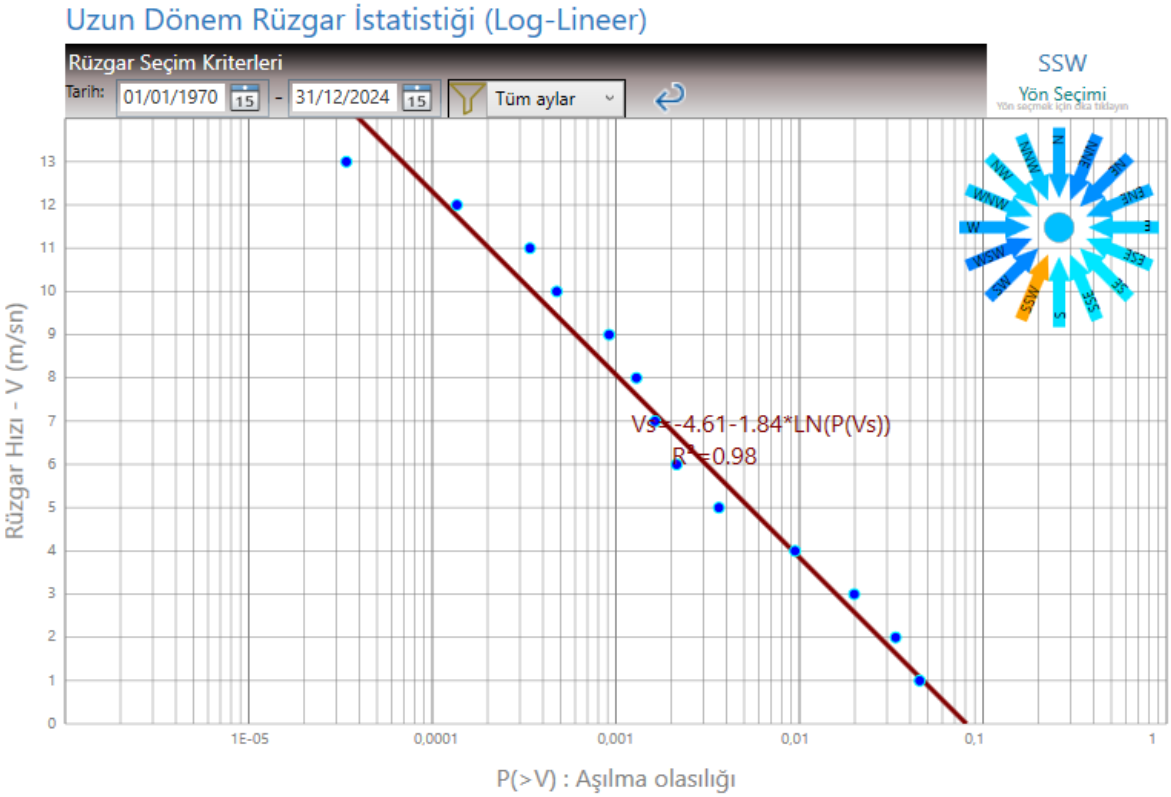


Figure 6. Long-term wind statistics based on Finike Meteorological Station data from 1970 to 2024 for the Southsouthwest (SSW) direction (HYDROTAM-3D, 2026).

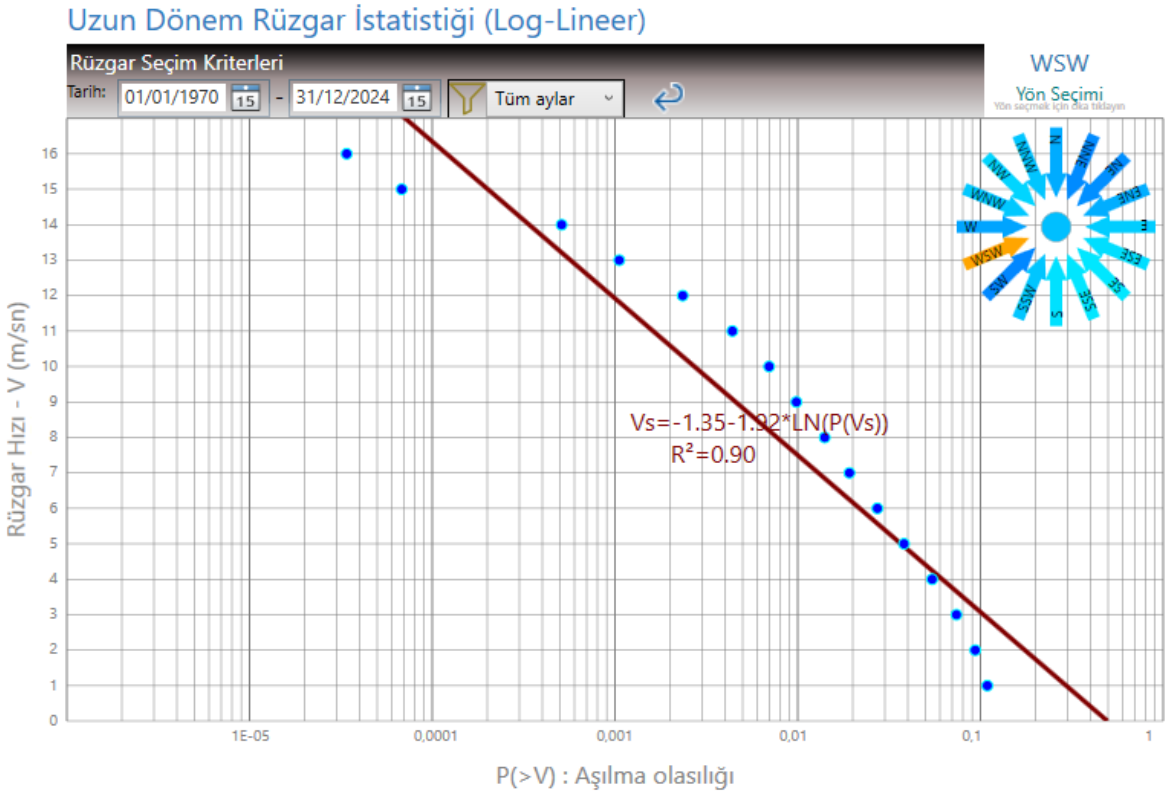


Figure 7. Long-term wind statistics based on Finike Meteorological Station data from 1970 to 2024 for the Westsouthwest (WSW) direction (HYDROTAM-3D, 2026).

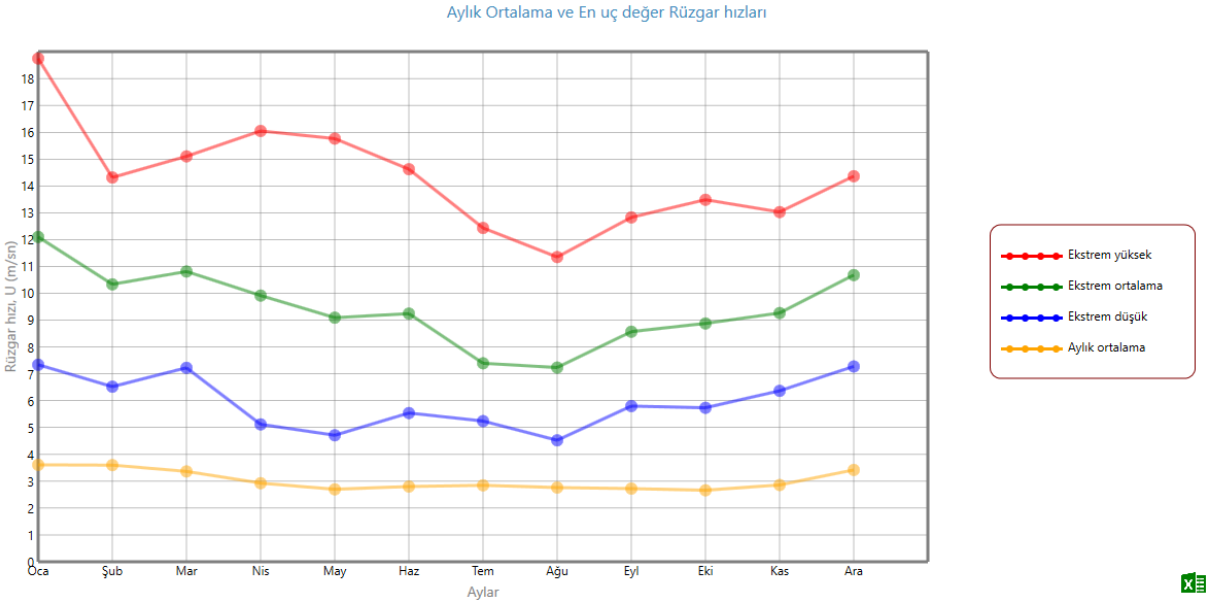


Figure 8. Monthly average and maximum wind speed values

2.2 Wave Climate

HYDROTAM-3D (2026) is also utilized to obtain the wave climate of the project area. The fetch distances necessary to obtain the wave climate were determined using HYDROTAM-3D (2026) and are presented in Figure 9 and Table 1. Given the project area's location within the East-Southeast (ESE) to West-Northwest (WNW) directional interval, it has the highest potential for wave development in terms of fetch distances.

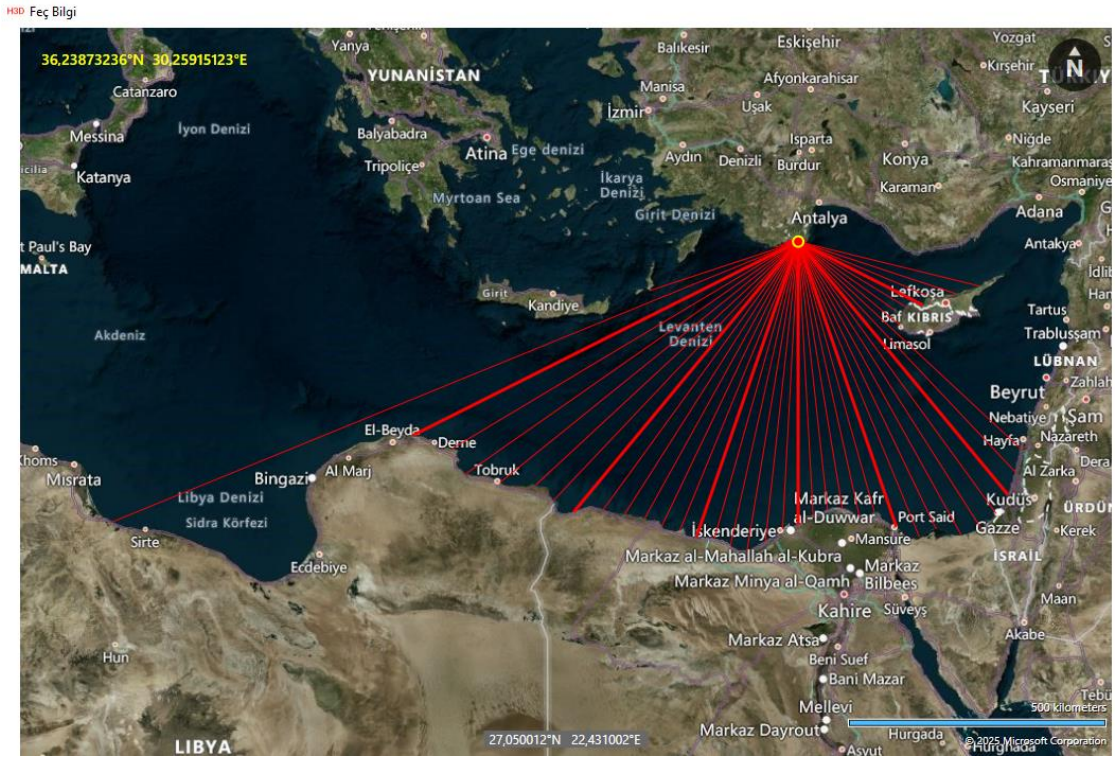


Figure 9. Fetch lengths by direction (HYDROTAM-3D, 2026)

Table 1. Fetch lengths (km) (HYDROTAM-3D, 2026)

Direction	Effective Fetch (m)
N	8519.79
NNE	8583.22
NE	8753.97
ENE	10576.98
E	60276.64
ESE	269577.1
SE	573662.8
SSE	578860.1
S	550058
SSW	602370.6
SW	663162.9
WSW	698157.7
W	22314.93
WNW	11182.86
NW	10607.73
NNW	8986.49

Within the scope of this paper, the long-term wave statistics of the project area have been examined using HYDROTAM-3D (2026). The monthly distribution of average and extreme wave heights for the project area is studied and presented in Figure 10. The monthly average wave height for the marine area studied within the scope of this research is approximately 1m. For the marine area of the project, the East-southeast (ESE) and West-northwest (WNW) directional intervals have the greatest potential to produce waves with the most impact. Long-term wave statistics for this directional interval are presented in

-

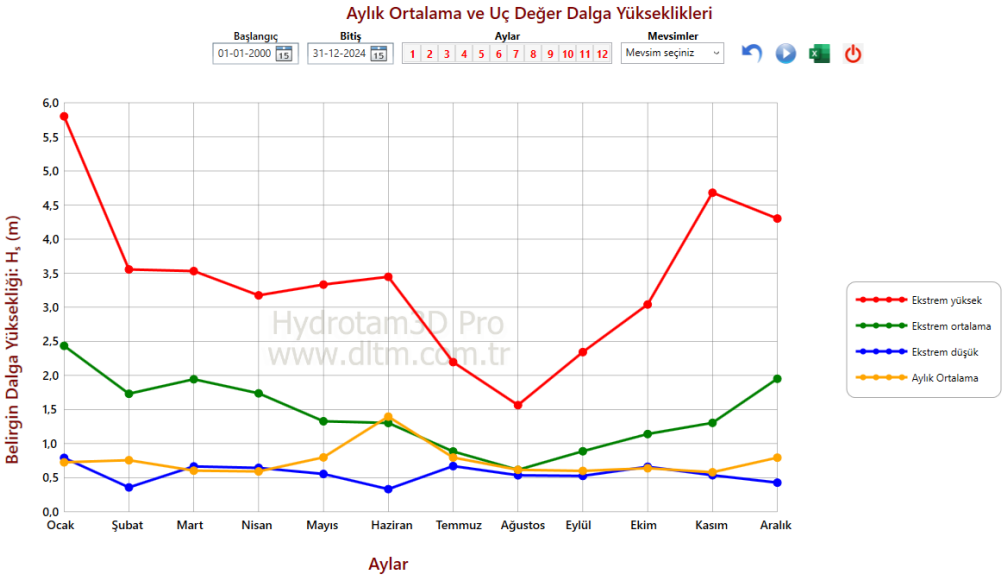


Figure 20. Monthly distribution of average and extreme wave heights

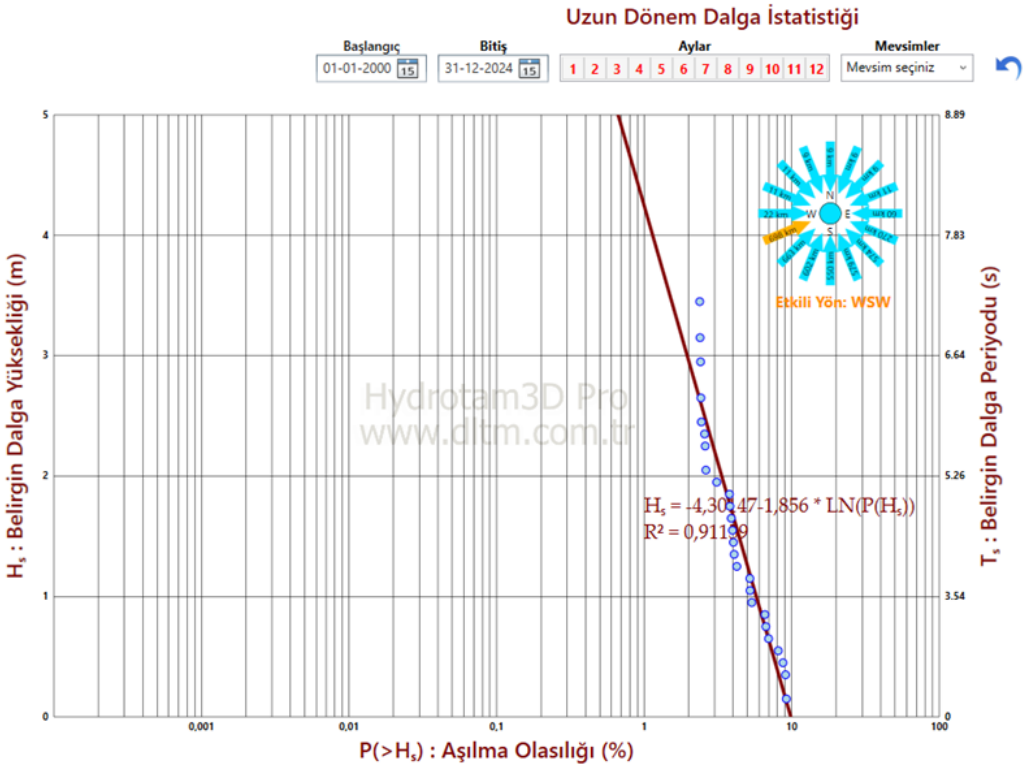


Figure 31. Long-term wave statistics for the West-southwest direction (WSW)

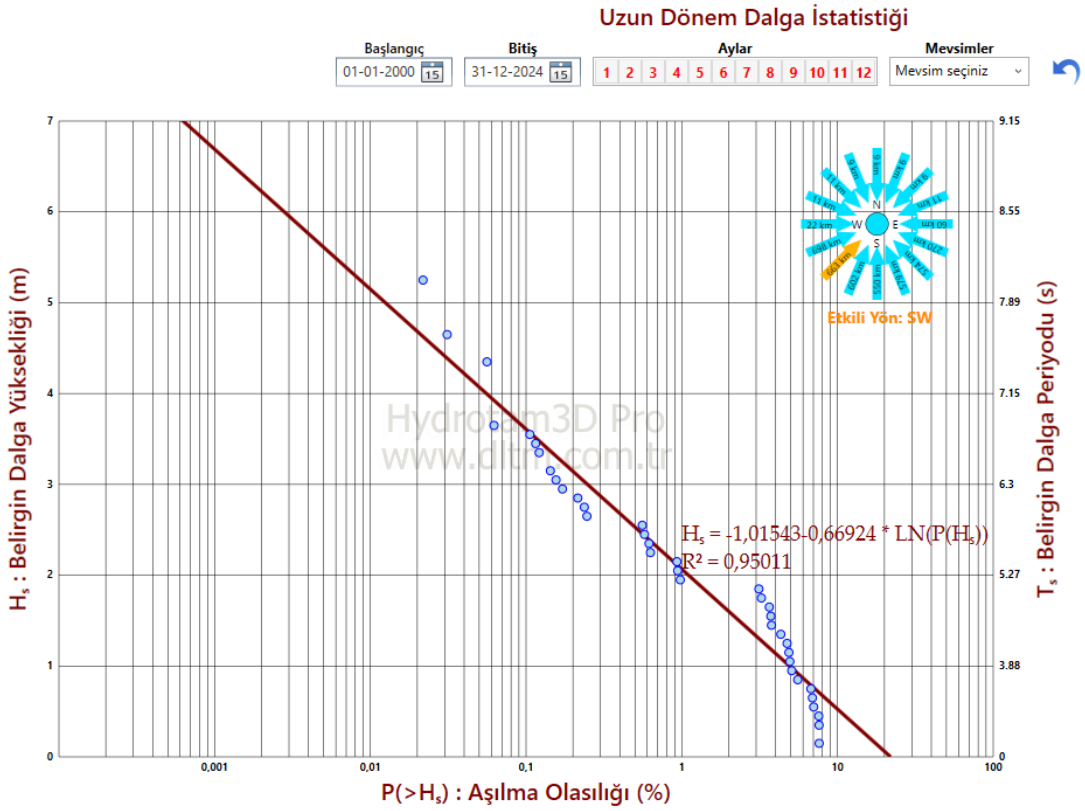


Figure 12. Long-term wave statistics for Southwest direction (SW)

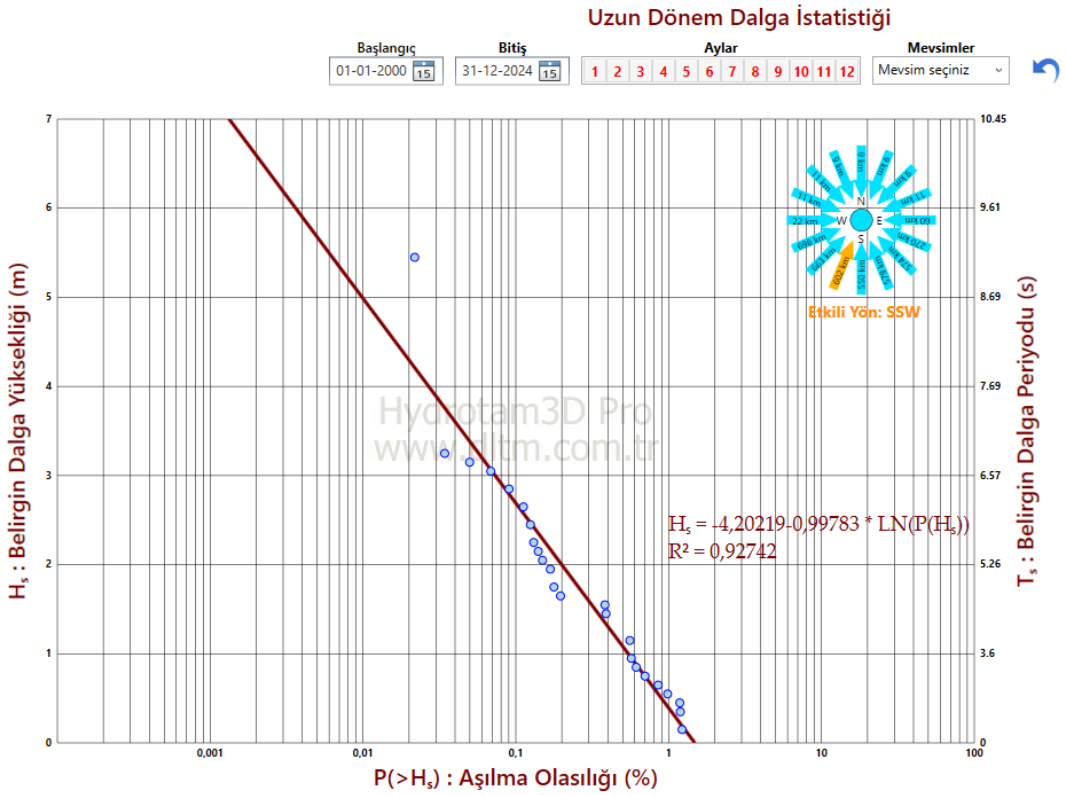


Figure 13. Long-term wave statistics for the South-southwest direction (SSW)

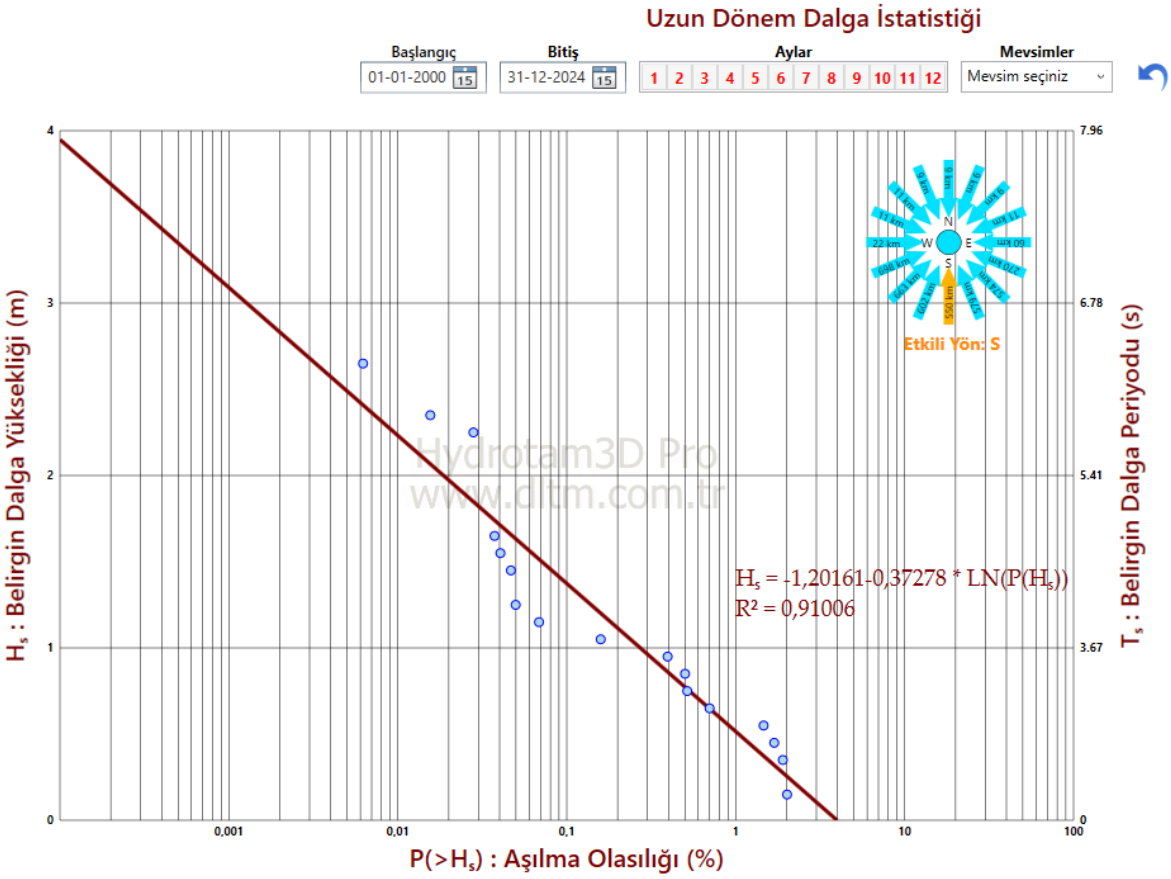


Figure 14. Long-term wave statistics for the South direction (S)

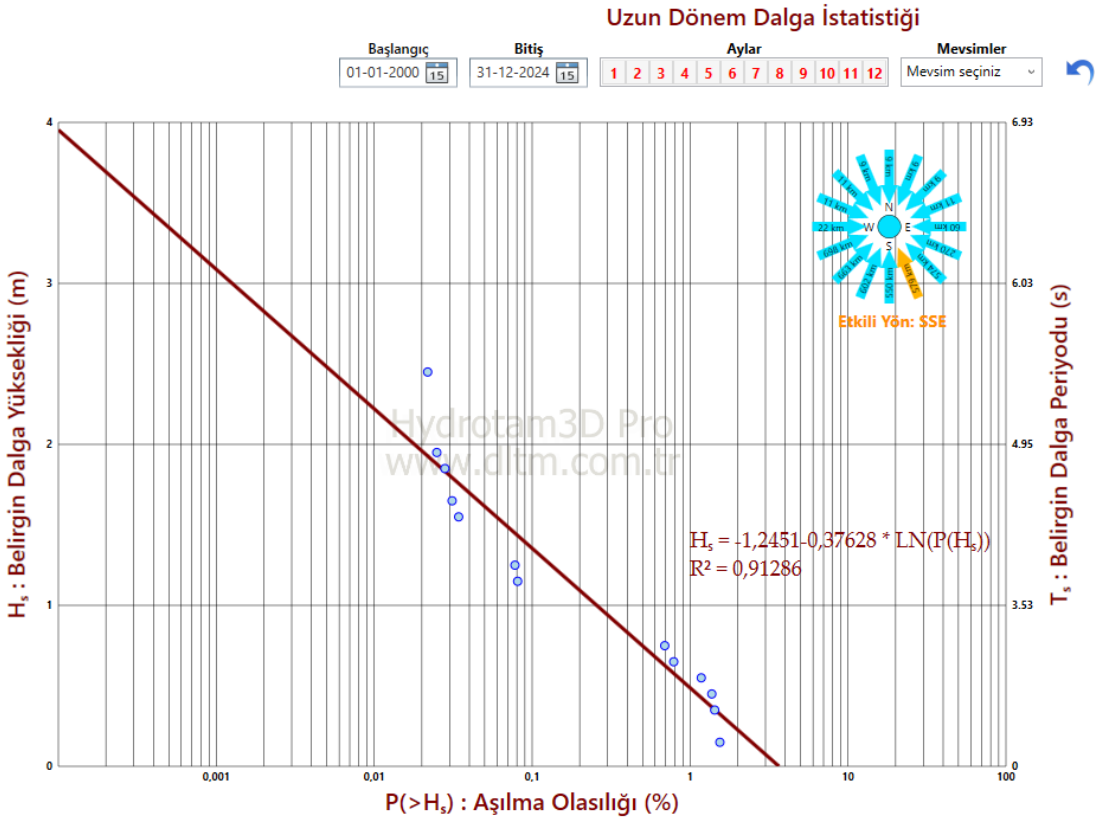


Figure 4. Long-term wave statistics for the South-southeast direction (SSE)

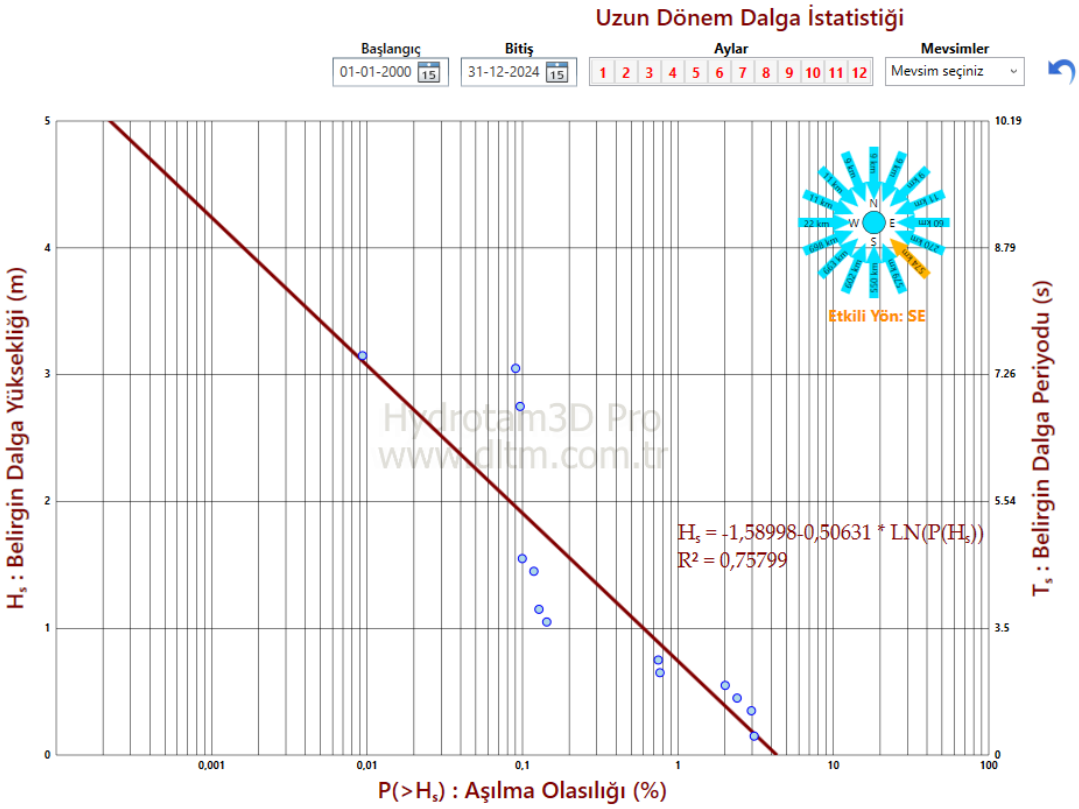
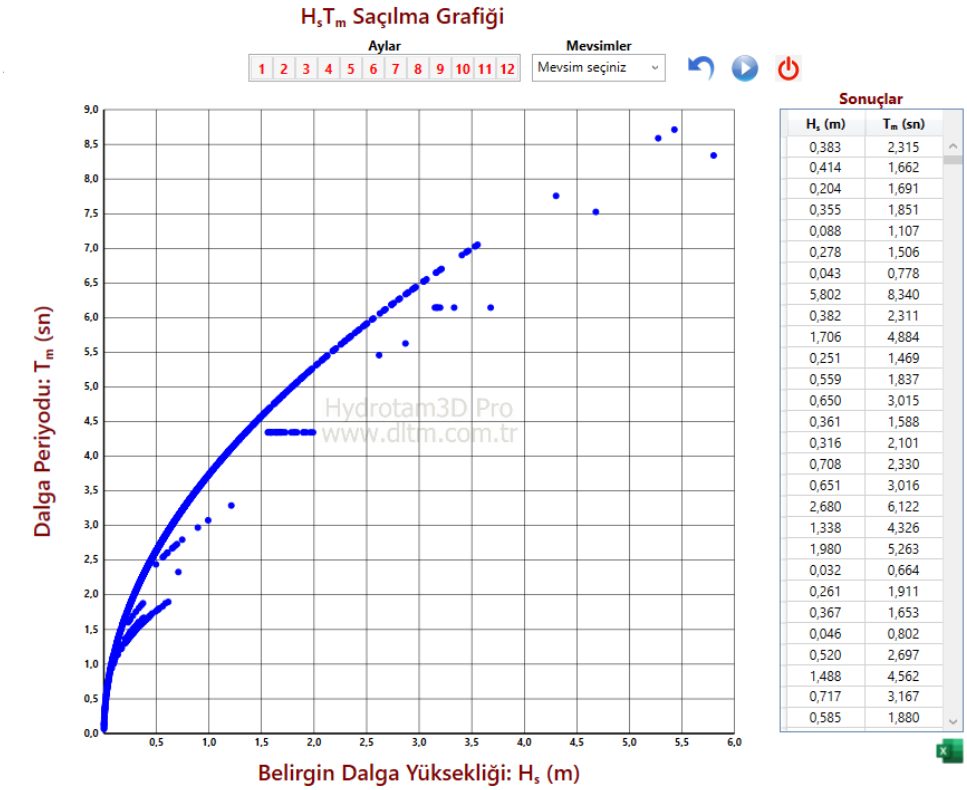


Figure 16. Long-term wave statistics for the Southeast direction (SE)

The long-term wave statistics, illustrating the relationship between significant offshore wave height (Hs) and wave period (T), are presented in Figure 17. The annual wave rose is shown in Figure 18.



H_s (m)	T_m (sn)
0,383	2,315
0,414	1,662
0,204	1,691
0,355	1,851
0,088	1,107
0,278	1,506
0,043	0,778
5,802	8,340
0,382	2,311
1,706	4,884
0,251	1,469
0,559	1,837
0,650	3,015
0,361	1,588
0,316	2,101
0,708	2,330
0,651	3,016
2,680	6,122
1,338	4,326
1,980	5,263
0,032	0,664
0,261	1,911
0,367	1,653
0,046	0,802
0,520	2,697
1,488	4,562
0,717	3,167
0,585	1,880

Figure 17. Graph of H_s-T relation

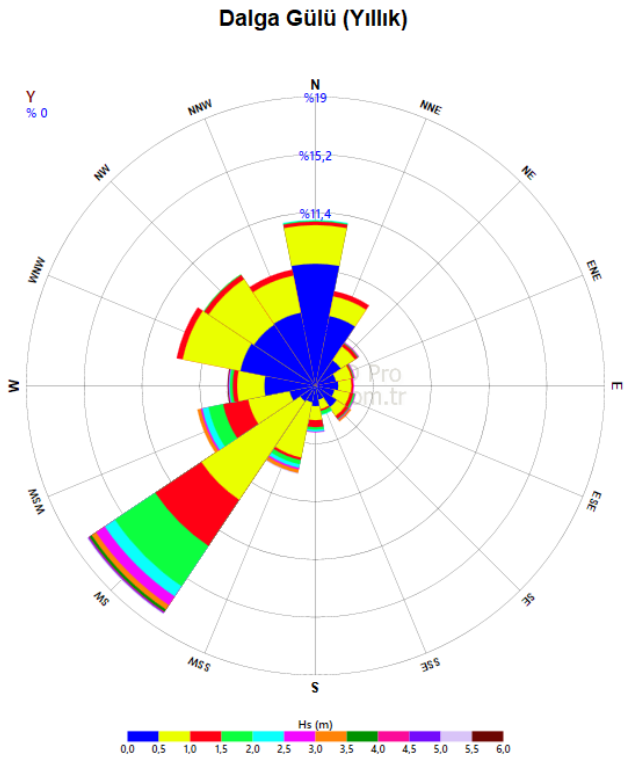


Figure 18. Wave rose (HYDROTAM-3D, 2026)

Extreme wave statistics studies were also conducted by using HYDROTAM-3D, and the design wave values are presented in Figure and summarized in Table 2 (HYDROTAM-3D, 2026).

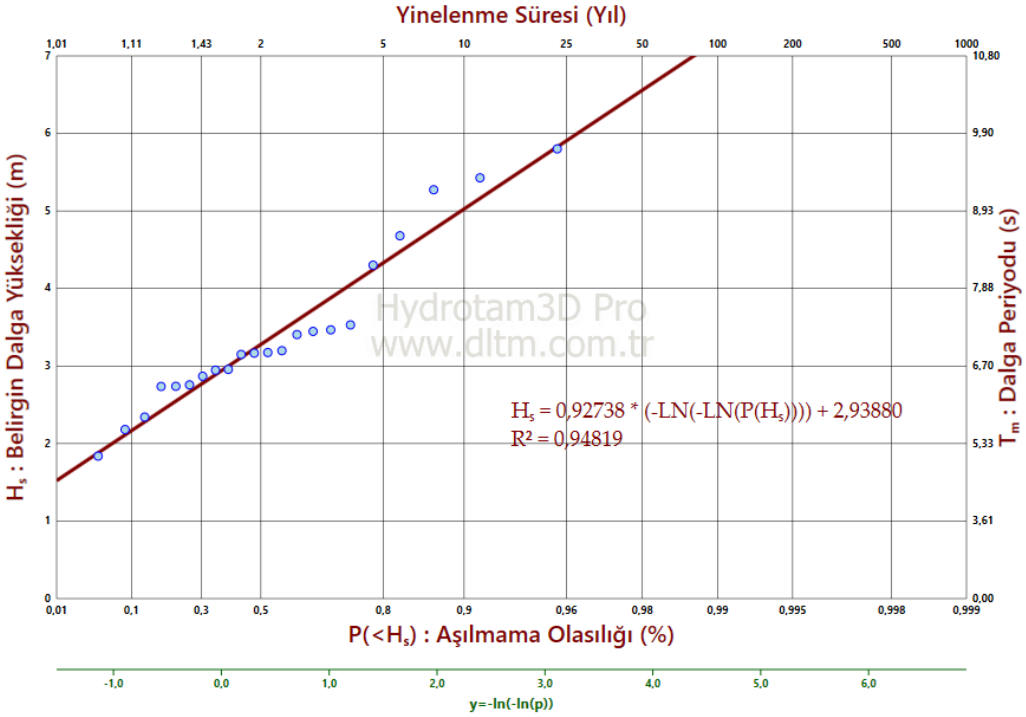


Figure 19. Extreme Wave Statistics (Gumble Distribution)

Table 2: Extreme wave values with respect to return periods

Return Period	5 Years		10 Years		25 Years		50 Years		100 Years	
	H_s (m)	T_m (sn)	H_s (m)	T_m (sn)	H_s (m)	T_m (sn)	H_s (m)	T_m (sn)	H_s (m)	T_m (sn)
ESE	1,441 ± 0,080	4.431	1,852 ± 0,112	5.104	2,371 ± 0,159	5.866	2,756 ± 0,196	6.385	3,138 ± 0,233	6.869
SE	1,658 ± 0,139	4.796	2,213 ± 0,195	5.643	2,914 ± 0,278	6.589	3,435 ± 0,342	7.228	3,951 ± 0,407	7.822
SSE	1,633 ± 0,065	4.754	2,130 ± 0,092	5.522	2,758 ± 0,131	6.388	3,224 ± 0,162	6.975	3,686 ± 0,193	7.522
S	1,802 ± 0,074	5.026	2,326 ± 0,105	5.803	2,988 ± 0,149	6.683	3,479 ± 0,183	7.281	3,967 ± 0,218	7.840
SSW	3,010 ± 0,164	6.711	3,883 ± 0,231	7.746	4,986 ± 0,328	8.917	5,804 ± 0,404	9.715	6,616 ± 0,480	10.458
SW	3,735 ± 0,057	7.578	4,410 ± 0,079	8.321	5,262 ± 0,113	9.192	5,894 ± 0,138	9.799	6,522 ± 0,165	10.374
WSW	2,658 ± 0,103	6.256	3,151 ± 0,145	6.886	3,774 ± 0,205	7.623	4,237 ± 0,252	8.136	4,696 ± 0,300	8.621

2.3 Depth of Closure

The closure depth was investigated to determine the distance from the outlet of the river jetty to the coastline. The closure depth is a theoretical depth along the beach profile at which sediment transport does not occur, depending on the wave height and period. Two equations, as presented by Birkemeier (1985) and Hallermeier (1981), are used to investigate the closure depth. Both equations (Equations 1 and 2) use $H_{\frac{12h}{y}}$ the significant wave height with a 12-hour annual exceedance probability.

Hallermeier closure depth equation (Hallermeier, 1981)

$$DoC = 2.28 * H_{\frac{12h}{y}} - 68.5\left(\frac{H^2_{\frac{12h}{y}}}{g*T^2_{\frac{12h}{y}}}\right) \quad (1)$$

Birkemeier closure depth equation (Birkemeier, 1985)

$$DoC = 1.75 * H_{\frac{12h}{y}} - 57.9\left(\frac{H^2_{\frac{12h}{y}}}{g*T^2_{\frac{12h}{y}}}\right) \quad (2)$$

To achieve the most efficient result, the South-southeast direction was chosen, as shown in Figure 15. The wave height and period values are 1.24 m and 3.92 s, respectively, for the SSE direction. Following the calculations, the depths of closure were obtained as 2.13 and 1.60 m from the Hallermeier and Birkemeier formulae, respectively. To provide a conservative solution for the morphology of the coastline, 2.00 m is accepted as the ultimate depth of the structure. The layout of the structure, which was composed according to the depth of closure, is given in Figure. In the next step, the structural design will be conducted.



Figure 20. Layout of structure

2.4 Wave Transformation

The HYDROTAM-3D (2026) numerical modeling system was employed to quantify nearshore wave conditions and derive the governing design wave parameters through its dedicated wave transformation module (Numanoğlu Genç et al., 2013). This module resolves the progressive modification of offshore wave characteristics as they propagate toward the project site by accounting for key coastal transformation mechanisms (e.g., refraction driven by spatially varying bathymetry, shoaling effects associated with depth reduction, and energy dissipation processes where applicable). The HYDROTAM-3D (2026) framework has been calibrated and implemented across a wide portfolio of coastal engineering applications in Türkiye, and its predictive skill has been demonstrated to be robust for engineering decision-making, thereby supporting the reliability of the model outputs used herein (Balas et al., 2011; Balas and Balas, 2025). Based on the site-specific transformation analysis, the design significant wave height, H_d, was extracted from the model results and adopted as $H_d = 1.58$ m is the governing wave condition for subsequent dimensioning of the armor system, as shown in Figure 21, which is an output of the HYDROTAM-3D wave transformation module (HYDROTAM-3D, 2026).

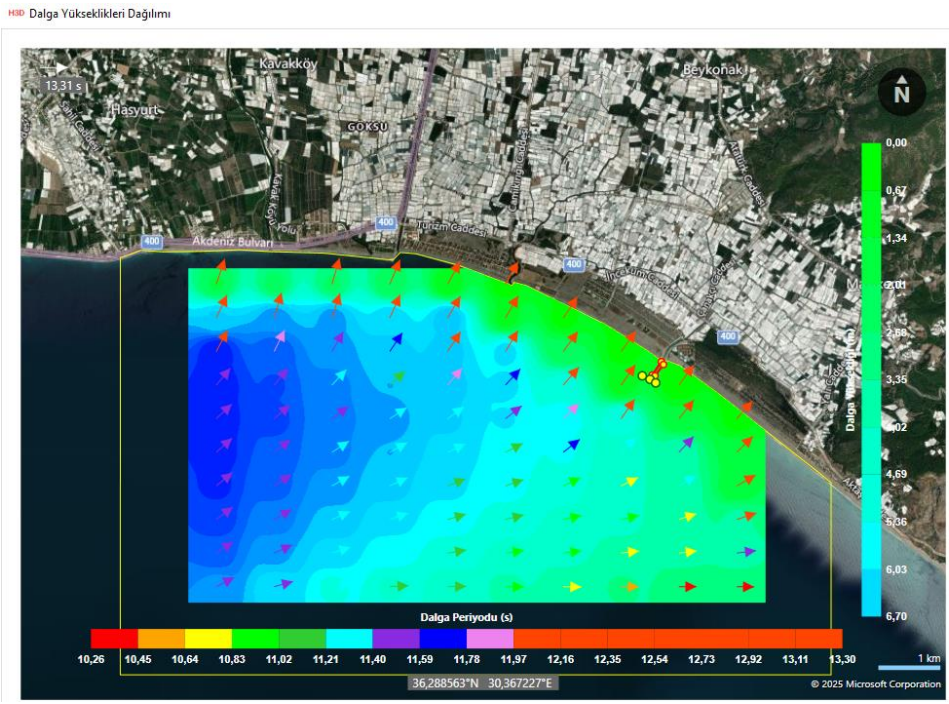


Figure 21 Wave transformation model output of HYDROTAM-3D (2026) for the coastal area.

2.5 Structural Design by Deterministic Approach

The rock category used for the armor unit is determined by the Hudson formula (1959), with the aid of the design wave height obtained from HYDROTAM-3D (2026), which has a value of 1.58 m. The Hudson equation is given in Equation (3):

$$W_{50} = \frac{\gamma s * {H_d}^3 * tan\alpha}{(Sr-1)^3 * K_D} \quad (3)$$

W_{50}: Nominal armor weight (tons)
γ_s: Unit weight of rock = 2.65 t/m³
γ_w: Unit weight of seawater = 1.035 t/m³
tan α: Slope of the structure = ½
H_d: Design significant wave height at the toe of the structure = 1.58 m
$K_{D,\ breaking}$: Stability coefficient of Hudson for wave breaking condition = 1.1
Sr: Specific weight of armor unit: $\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 =$1.56
Dn_{50}: Nominal median armor diameter = $\sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\gamma_s}}$ (m)

Following the calculations, W_{50} is determined to be 1.25 t, which will be used for the armor unit. Using the deterministic method for coastal structures yields an exact solution, as shown above. Hence, the design of coastal structures involves uncertainties, such as the design wave height and changes in water levels. Deterministic design cannot foresee these uncertainties. Therefore, in the next title, probabilistic design will be handled, and the results will be compared.

2.6 Structural Design by Probabilistic Approach

To complement conventional deterministic sizing and to explicitly represent epistemic and aleatory uncertainties inherent to coastal forcing and material properties, a probabilistic design framework was also implemented using Monte Carlo simulation. In coastal structure design, uncertainty in the environmental loading—most notably wave height—constitutes a primary contributor to variability in stability demand and, consequently, in predicted performance and failure probability. Accordingly, this study performs a probabilistic stability assessment for the jetty to be constructed at the outlet of the

Akmaz River. It systematically compares the resulting design implications with those obtained from a deterministic approach. The Hudson equation is adopted as the governing limit-state relationship linking hydrodynamic demand to armor-unit resistance, and the associated input quantities are treated as random variables characterized by probability distributions reflecting their physical variability and measurement/model uncertainty (Table 3). A total of 30,000 Monte Carlo realizations were generated to propagate these uncertainties through the limit-state function, yielding a statistically stable estimate of the response distribution and the corresponding probability-based design metrics.

Table 3. The variations of design parameters and probability distributions modeled in MC

Variable	Definition	Minimum	Average	Maximum	Standard deviation	Distribution type	Distribution
W_{50}	Median Armor Weight (tons)	0.50	1.25	3.0	0.27	Simulated (Figure 5)	
H_d	Design Wave Height	1.28	1.58	1.88	0.10	Normal	
γ_s	Unit weight of Armor	2.50	2.65	2.80	0.05	Normal	
γ_w	Unit Weight of water	1.02	1.035	1.05	0.01	Normal	

The Monte Carlo outcomes obtained from the Hudson-based limit state function for the characteristic armor unit weight, W_{50}, were interpreted in terms of lifetime performance over a 50-year design horizon. As illustrated in Figure 22, the simulation results indicate that there is no exceedance of the defined failure criterion within the specified service life. Consistent with this observation, the estimated lifetime probability of failure for the coastal structure is effectively zero under the adopted probabilistic framework, even when the full suite of environmental forcing factors and scenario-based risk parameters (including climate-change-driven modifications and sea-level variability) is incorporated into the analysis.

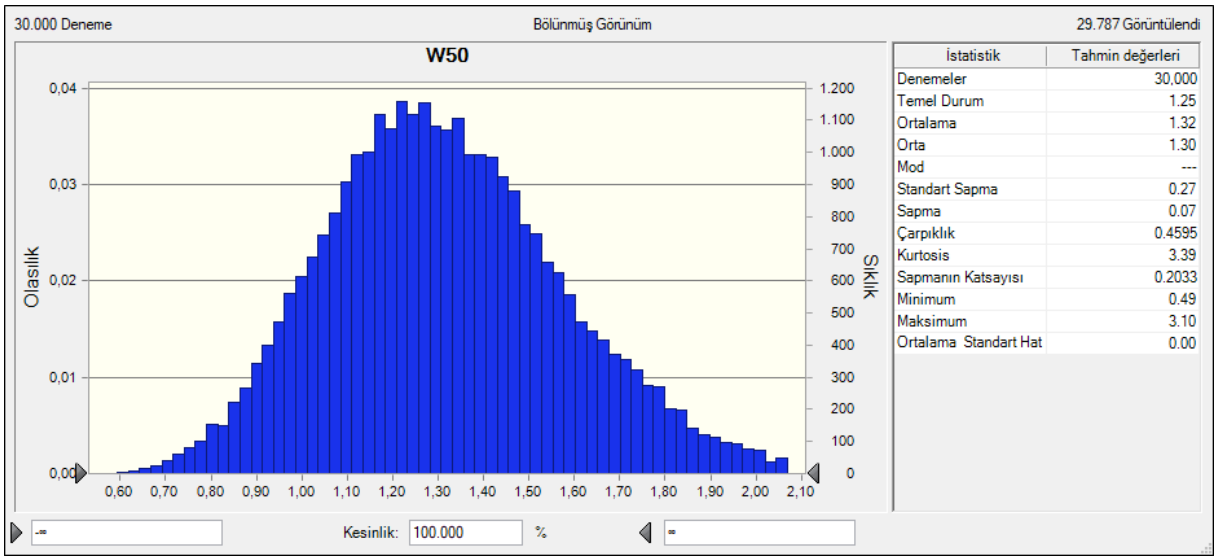


Figure 52. Hudson limit state function (W_{50}) of the structure failure in its lifetime

Upon completion of the Monte Carlo simulations, a sensitivity analysis was performed to determine which stochastic input parameters exert the strongest control on the response of interest and, by extension, on the probabilistic stability of the structure (Figure 23). This diagnostic step quantifies the relative influence of each random design variable on the variability of the limit-state outcome, thereby

revealing the dominant sources of uncertainty embedded in the reliability assessment. As demonstrated in Figure 23, the design wave height, H_d exhibits the largest contribution to the stability prediction within the MCS framework, indicating that uncertainty in wave loading governs the dispersion of the computed stability response more than the remaining input parameters. In this context, the sensitivity analysis serves to decompose the Monte Carlo results into parameter-wise contributions, enabling an objective ranking of the random variables and providing a physically interpretable basis for prioritizing improved characterization (e.g., data acquisition, hindcast refinement, or scenario definition) of the most influential design inputs.

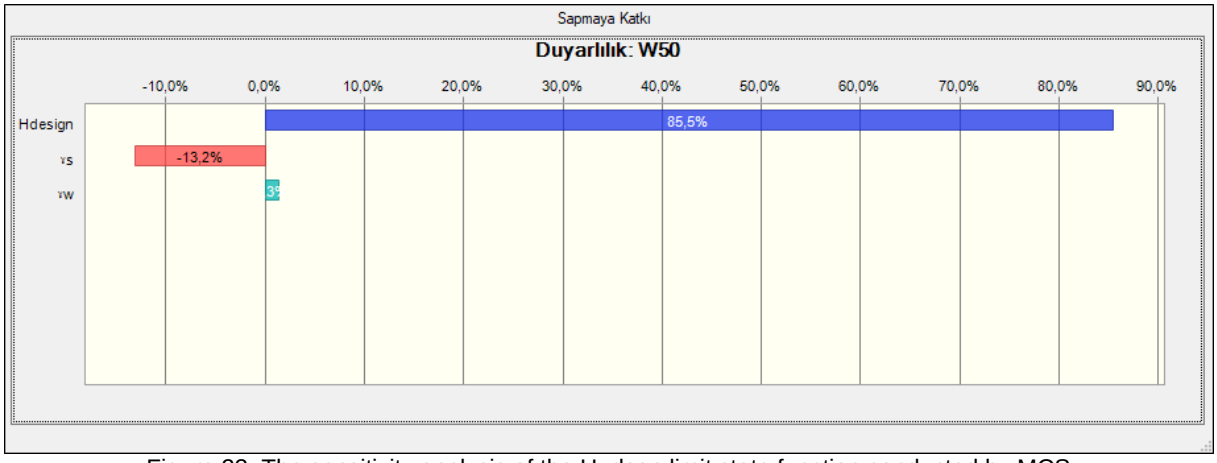


Figure 23. The sensitivity analysis of the Hudson limit state function conducted by MCS

A central objective of this study is to quantify the statistical dependence between the governing design variables and to interpret how such dependence propagates into the stability response of the coastal structure. To this end, the scatter plots presented in Figure 24 provide a graphical assessment of the direction and strength of association between the limit-state response (i.e., the stability indicator derived from the Hudson-based formulation) and each stochastic input parameter. The observed point-cloud patterns indicate whether the structural stability increases or decreases with the corresponding variable, thereby revealing positive or negative correlations and offering insight into the dominant drivers of variability within the probabilistic framework.

Among the investigated parameters, the design significant wave height, H_d, exhibits the strongest correlation with the limit state function, with a maximum correlation coefficient of $\rho = 0.9167$. This high positive correlation demonstrates that the stability response is highly sensitive to fluctuations in wave loading and that even modest deviations or uncertainties in H_d can produce disproportionately large changes in the computed safety margin. In contrast, the unit weight of seawater, γ_w, displays only a weak-to-moderate influence on stability ($\rho = 0.1145$), implying that realistic variability in seawater density contributes relatively little to the overall dispersion of the limit-state outcome compared with wave-height uncertainty. The unit weight of the rock armor, γ_r, is negatively correlated with the stability metric ($\rho = -0.3596$), indicating an inverse relationship between this parameter and the evaluated limit-state response under the adopted sign convention; in practical terms, this reflects that changes in armor material properties alter the balance between hydrodynamic demand and resisting weight, thereby shifting the stability margin in the opposite direction to increases in γ_r as represented in the analysis.

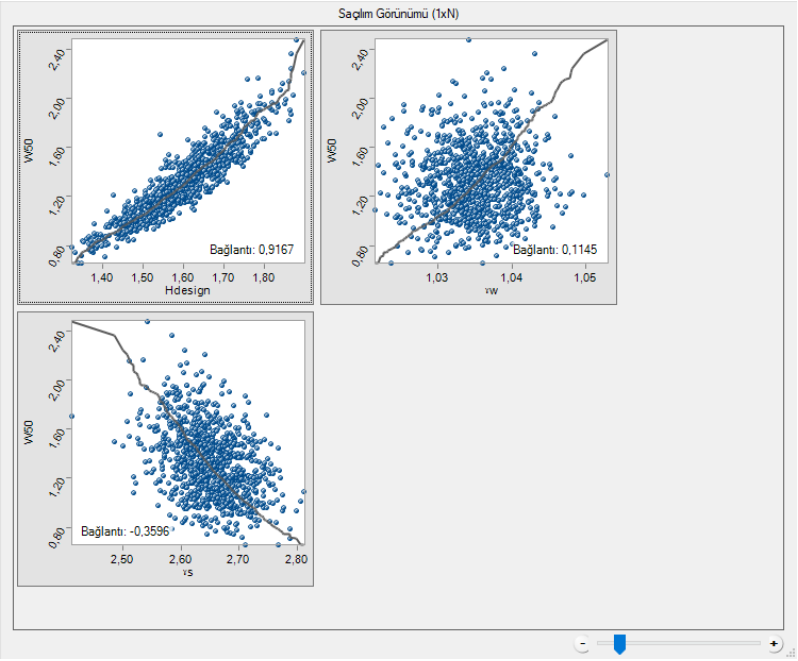


Figure 24. Scatter diagrams of design parameters.

As shown in Figure 22, the median value of the armor unit is 1.32 t, which is very close to the value of 1.25 t obtained from the Hudson formula. These two values can be safely used in the 0.4-2 t rock class. However, the maximum value obtained from the probabilistic design is 3.1 t, which is significantly higher than the 1.25 t. 3.1 t can be ultimately safe for design. However, probabilistic design can predict this value through 30,000 simulations to achieve the optimal design results. Deterministic design and probabilistic design should be conducted simultaneously.

3 Discussion

The principal distinction between deterministic and probabilistic design lies in how uncertainty is represented and propagated into the final sizing decision. Within the scope of this study, this methodological divergence is explicitly examined, and the design outcomes obtained from both approaches are compared and evaluated. In the deterministic approach, the design inputs are typically represented by single nominal or conservative values, and the stability check yields a unique armor stone weight to be adopted for construction. While this procedure is straightforward and consistent with conventional practice, it does not explicitly quantify the variability associated with environmental loading, material properties, and modeling assumptions, nor does it provide a probabilistic measure of performance over the service life.

By contrast, the probabilistic design framework treats the key design variables as random quantities described by probability distributions and evaluates structural stability through repeated sampling. In this study, 30,000 Monte Carlo realizations are employed to propagate the uncertainty in the governing parameters through the limit-state formulation, resulting in a distribution of feasible armor weights and associated reliability metrics, rather than a single deterministic value. This distribution-based output is particularly valuable for risk-informed decision-making because it enables the designer to evaluate not only an expected or representative design value, but also the likelihood of adverse outcomes under plausible combinations of conditions. Given these advantages, probabilistic design approaches warrant stronger representation in coastal design guidance and manuals, especially for structures exposed to nonstationary forcing linked to climate variability and change.

For future work, integrating probabilistic design with artificial intelligence techniques may provide additional capabilities to characterize, learn from, and mitigate uncertainty. For example, data-driven models could support improved estimation of input distributions, surrogate modeling to accelerate reliability analyses, and sensitivity/importance ranking under high-dimensional parameter spaces, ultimately enabling more efficient and transparent uncertainty quantification in coastal engineering design.

Building on the Monte Carlo–based probabilistic jetty design framework described in this paper, the artificial neural networks (ANN) (Hapoğlu et al., 2025) can be adapted as a predictive module to learn the nonlinear mapping between uncertain environmental inputs (design wave height and HYDROTAM-

3D–derived wind–wave parameters) and Hudson limit-state function, thereby enabling real-time decision support within a probabilistic coastal design workflow.

4 Conclusions

Using the Probabilistic design Approach for river jetties introduced in this study, the jetty system was dimensioned and optimized in a reliability-based framework that explicitly propagates uncertainty in environmental forcing and design parameters. Within this approach, the configuration and sizing of the jetty were not defined by a single deterministic combination of inputs; rather, the governing parameters were represented as stochastic variables, and the structural response was evaluated over a large ensemble of realizations. The resulting optimum jetty layout and design geometry for the Akmaz River application are summarized in Figure, which reflects a solution that satisfies stability requirements while maintaining compatibility with local coastal processes.

A key morphodynamic control in the proposed procedure is the closure depth, which represents the theoretical depth along the active beach profile beyond which net sediment transport is negligible over the relevant temporal scale. Because closure depth is a function of wave climate (e.g., wave height and period) and sediment characteristics (notably grain size and mobility), it provides an engineering proxy for the seaward limit of meaningful profile change. Consequently, it constitutes a critical criterion for selecting the offshore extent and toe elevation of coastal structures to minimize adverse impacts on shoreline evolution and nearshore morphology. In this study, the hydraulic structure was therefore designed with explicit reference to the closure depth estimate, and the corresponding final layout arrangement is presented in Figure.

To quantify design reliability under uncertain forcing, Monte Carlo Simulation (MCS) was implemented to model the probability distribution of outcomes for a system influenced by multiple random variables. As summarized in Figure 5 and Table , 30,000 simulations were performed using randomly generated samples drawn from the prescribed probability distributions of the input parameters, and the resulting responses were evaluated through the adopted limit-state formulation. The MCS results yielded an estimated lifetime failure probability of approximately zero for the coastal structure over the considered service life, indicating that—within the assumptions and distributional representations adopted—the jetty design remains reliable even when accounting for scenario-based risk factors such as sea-level rise and other climate-change-related variations, provided that the applicable design standards and acceptance criteria are satisfied.

Acknowledgments

The authors would like to thank DLTM Software Technologies at Gazi University Technopark for providing the HYDROTAM-3D model and database that support the findings of this study.

Authors' Contributions

Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing—Original Draft: A.U.; Writing—Review & Editing, Supervision, Visualization: C.E.B.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Open Access and Copyright: All articles published in the DSİ Technical Bulletin 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).

References

Balas, E. A. (2023). A hybrid Monte Carlo simulation risk model for oil exploration projects. Marine Pollution Bulletin, 194, 115270. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115270

Balas, E. A., & Balas, C. E. (2025). Maritime risk assessment: A cutting-edge hybrid model integrating automated machine learning and deep learning with hydrodynamic and Monte Carlo simulations. Journal of Marine Science and Engineering, 13(5), 939. https://doi.org/10.3390/jmse13050939

Balas, E. A., Uğurlu, A., & Balas, C. E. (2025). A hybrid probabilistic design model of riverine jetties incorporating three-dimensional numerical simulations of transport phenomena in the context of emerging climate change. Journal of Coastal Research, 113(SI), 220-224. https://doi.org/10.2112/JCR-SI113-044.1

Balas, L., & Özhan, E. (2003). A Baroclinic Three-Dimensional Numerical Model Applied to Coastal Lagoons (pp.205–212). https://doi.org/10.1007/3-540-44862-423

Balas, L., İnan, A., & Yılmaz, E. (2011). Modelling of sediment transport of Akyaka Beach. Journal of Coastal Research, 460–463. http://www.jstor.org/stable/26482214

Balas, L., Numanoğlu Genç A., Inan, A. (2012). HYDROTAM: 3D Model for Hydrodynamic and Transport Processes in Coastal Waters in 6th International Congress on Environmental Modelling and Software; International Congress on Environmental Modelling and Software: Leipzig; 2012.

Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 111(3), 598–602.

Det Norske Veritas. (1992, July). Structural reliability analysis of marine structures (DNV Classification Note No. 30.6). Det Norske Veritas.

Durap, A., Balas, C. E., Çokgör, Ş., & Balas, E. A. (2023). An integrated Bayesian risk model for coastal flow slides using 3-D hydrodynamic transport and Monte Carlo simulation. Journal of Marine Science and Engineering, 11(5), 943. https://doi.org/10.3390/jmse11050943

ECMWF (2016). IFS Documentation CY41R2 - Part III: Dynamics and Numerical Procedures. In IFS Documentation CY41R2; https://doi.org/10.21957/83wouv80

Google Earth (2026). Google Earth map of Akmaz River outlet, Antalya, Türkiye. Retrieved January 9, 2026, from https://earth.google.com/web/

Hallermeier, R. J. (1981). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. Coastal Engineering, 4(3), 253–277.

Hapoğlu, H., Balas, E. A., & Altuntaş, S. (2025). Artificial neural network discrete-time biomass controller for a continuous stirred tank reactor. Journal of Computational Science, 91, 102688. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2025.102688

Hudson, R. Y. (1959). Laboratory Investigations of Rubble Mound Breakwaters, J. Waterways & Harbors Division, ASCE, Vol 85, No WW3, Paper No 2171, pp 93-121

HYDROTAM-3D (2026). HYDROTAM-3D, Three-Dimensional Hydrodynamic Transport and Water Quality Model, 2025, Available online: http://www.hydrotam.com (Accessed on January 9, 2026).

Numanoğlu Genç A., İnan, A., Yılmaz, N., & Balas, L. (2013). Modeling of erosion at Göksu coasts. Journal of Coastal Research, 65 (Special Issue 2), 2155–2160. https://doi.org/10.2112/SI65-364.1

Uğurlu, A., & Balas, C. E. (2024). Integrative probabilistic Design of river jetties by 3D numerical models of transport phenomena: The case study of Kabakoz River jetties. Marine Science and Technology Bulletin, 13(2), 151-167. https://doi.org/10.33714/masteb.1414048

Uğurlu, A., Balas, E. A., Balas, C. E., & Akbaş, S. O. (2024). Unleashing the Potential of a Hybrid 3D Hydrodynamic Monte Carlo Risk Model for Maritime Structures' Design in the Imminent Climate Change Era. Journal of Marine Science and Engineering, 12(6), 931. https://doi.org/10.3390/jmse12060931

DSI Teknik Bülteni, Ocak 2026, Sayı:147 p107-118 / Technical Bulletin of DSI, January 2026, Issue: 147, p107-118

Derleme / Review

İslam İşbirliği Teşkilatının Su Yönetimi Alanındaki Faaliyetleri ve Türkiye'nin İşbirliği Fırsatları

The Activities of the Organisation of Islamic Cooperation in the Field of Water Management and Türkiye's Cooperation Opportunities

Özlem ŞENOL[1], Ahmet ŞEREN [1] *, Özlem İRİTAŞ [1]

[1]DSİ Genel Müdürlüğü Dış İlişkiler Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

*Sorumlu yazar/ Coressponding Author: e-posta: aseren@dsi.gov.tr

Geliş (Received): 16.12.2025, Düzeltme (Revised): 07.01.2026, Kabul (Accepted): 13.01.2026

ÖZ

Su hayati öneminin yanı sıra her türlü üretim için vazgeçilmez bir girdi durumundadır. Dünya Kaynaklar Enstitüsünün (WRI) projeksiyonuna göre dünya nüfusunun %31'inin 2050 yılına kadar yüksek- aşırı yüksek su stresi ile karşı karşıya kalması beklenmektedir. Dolayısıyla suyun etkin yönetimi konusu birçok uluslararası kuruluşun öncelikli konusu haline gelmiştir. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi konusunda, üye ülkelerinin üçte biri kurak ve yarı kurak bölgelerde bulunan, İslam dünyasında, ekonomik, sosyal ve siyasi iş birliğini güçlendirmek amacıyla 1969 yılında kurulan İslam İşbirliği Teşkilatının (İİT) gündeminde de öncelikli bir yere sahiptir. İİT çatısı altında yürütülen su faaliyetleri, üye ülkeler arasında bilgi ve deneyim paylaşımının teşvik edilmesi, ortak sorunlara yönelik dayanışma ruhunu güçlendirilmesi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sunulması açısından büyük önem arz etmektedir. Su kaynakları üzerindeki baskının giderek arttığı günümüzde, İİT bünyesinde geliştirilecek çok taraflı iş birlikleri, ortak sorunlara çözüm üretme kapasitesini artıracaktır. Türkiye, sahip olduğu teknik altyapı, kurumsal deneyim ve su yönetimi konusundaki kapsamlı mevzuat çerçevesiyle, İİT üyesi ülkeler için örnek teşkil etmektedir. Özellikle entegre su kaynakları yönetimi, su verimliliği uygulamaları, kuraklık ve taşkın yönetimi gibi alanlarda Türkiye'nin sahip olduğu tecrübe, üye ülkelerle paylaşılmaya hazır önemli bir potansiyeli oluşturmaktadır. İİT'nin su alanında sürdürdüğü faaliyetlerin derlendiği bu çalışmada, Türk kamu ve özel sektörünün su teknolojileri alanındaki üretim ve uygulama kapasitesinin, İİT üyesi ülkelerle gerçekleştirilecek iş birliği yoluyla somut projelere dönüşmesi açısından stratejik bir imkân yaratacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İİT, iş birliği, sürdürülebilir su yönetimi

ABSTRACT

Water is essential not only for sustaining life but also as a critical input in all forms of production. According to the World Resources Institute (WRI), by 2050, 31% of the global population will face high to extremely high-water stress, underscoring the urgency of effective water management. The Organization of Islamic Cooperation (OIC), established in 1969 to enhance economic, social, and political cooperation among member states—many of which are in arid and semi-arid regions—prioritizes sustainable water resource management on its agenda. OIC's water-related initiatives foster knowledge sharing, promote solidarity in addressing common challenges, and contribute to the Sustainable Development Goals. Strengthening multilateral cooperation under the OIC umbrella is increasingly vital as pressure on water resources intensifies. Türkiye stands out as a model among OIC countries, offering advanced technical capacity, institutional expertise, and a comprehensive legal framework in water management. Its experience in integrated water resources management, water efficiency, and disaster risk reduction is highly relevant to regional needs. This study, which compiles the activities carried out by the OIC in the field of water, assesses that the production and application capacity of the Turkish public and private sector in the field of water technologies will create a strategic opportunity for the transformation of collaborations into concrete projects.

Keywords: OIC, cooperation, sustainable water management

1 Giriş

İnsan toplulukları, tarihin en eski devirlerinden itibaren yerleşim merkezi olarak doğal su kaynaklarının yakınlarını tercih etmişlerdir. Su hayati öneminin yanı sıra her türlü üretim için vazgeçilmez bir girdi durumundadır. Son yıllarda küresel ısınmanın etkisiyle, yağışlardaki azalmaya bağlı olarak kuraklıklar yaşanmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, Covid-19 salgın sürecinde suyun ne denli önemli olduğu bir kez daha anlaşılmıştır. Gelinen noktada, tarıma ve suya bağlı gıda güvenliği ve arzı insanlığın en önemli konusu haline gelmiştir (Şeren ve Yıldırım, 2024).

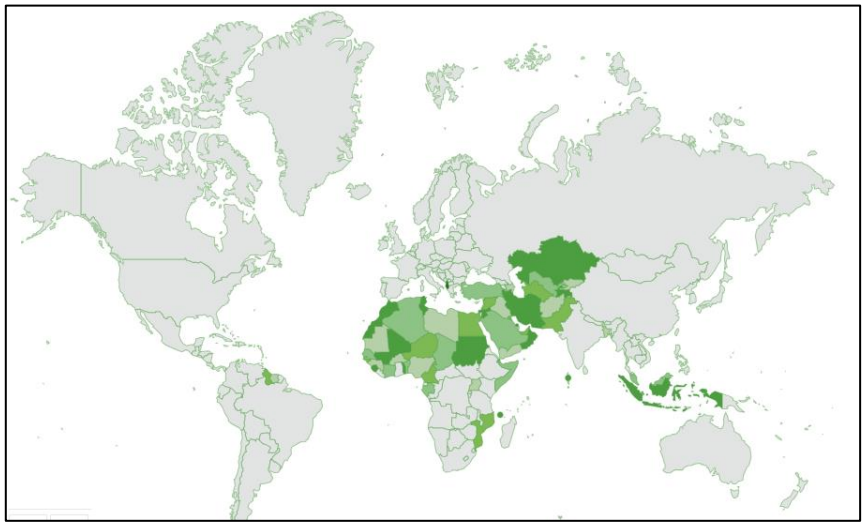
Birleşmiş Milletlerin (BM) 2024 Yılı Dünya Su Kalkınma Raporunda yer alan verilere göre 2,2 milyar insanın güvenli bir şekilde içme suyuna erişimi yoktur. Tarımın geçim kaynağı olduğu düşük gelirli ülkelerde işlerin yaklaşık %80'i suya bağımlıdır ve tatlı suyun %72'si tarım tarafından kullanılmaktadır. 2002-2021 yılları arasında seller nedeniyle 832 milyar ABD doları tutarında ekonomik kayıp yaşanmış ve 1,4 milyar insan kuraklıktan etkilenmiştir. Ayrıca 1970-2000 yılları arasında küresel göçte %10'luk bir artış su açığıyla ilişkilendirilmiştir (United Nations, 2024)

Yine BM tarafından yapılan çalışmalarından elde edilen verilere göre; dünyada tarım, içme-kullanma ve sanayi amacıyla kullanılan suyun mevcut suya oranı olarak ifade edilen küresel su stresi 2020'de yönetilebilir düzeydeyken, 2022 yılından itibaren 2,4 milyar insanın aşırı su stresine maruz kalan bölgelerde yaşamaktadır. Dünya Kaynaklar Enstitüsünün (WRI), 2100 yılına kadar 2,8 ila 4,6 santigrat derece arasında sıcaklık artışını esas alan projeksiyonuna göre analiz edilen 164 ülke ve bölgeden 51'inin (dünya nüfusunun %31'i) 2050 yılına kadar yüksek- aşırı yüksek su stresi ile karşı karşıya kalması beklenmektedir (Armstrong, 2024).

Dünyada nüfus artışına paralel olarak gelişen sanayi ve tarımsal faaliyetler için kullanılan su miktarı artmaktadır. Aynı zamanda aşırı su kullanımı ve artan kirlilik nedeniyle su kaynaklı sorunlar artarak çoğalmaktadır. Bu durum su kaynaklarının ekonomik, çevresel ve sosyal faydaları içerecek şekilde bütünleşik yönetiminin önemini bir kat daha arttırmaktadır. Ülkelerin su kaynakları potansiyelleri incelendiğinde ise dünyadaki su kaynakları dağılımı ülkeler bazında çok büyük farklılıklar göstermektedir. Dolayısıyla suyun etkin yönetimi konusu siyasi, ekonomik, güvenlik, entegrasyon vb. amaçlarla kurulan uluslararası kuruluşların ana gündemlerine taşınmıştır.

İslam İşbirliği Teşkilatı (İİT), İslam dünyasında ekonomik, sosyal ve siyasi işbirliğini güçlendirmeyi hedefleyen uluslararası bir kuruluştur. İİT, işgal altındaki Kudüs'te bulunan Mescid-i Aksa'nın yakılması olayının ardından, 22-25 Eylül 1969 tarihlerinde Rabat-Fas'ta ilk kez düzenlenen İslam Zirve Konferansı'nda alınan kararla, İslam Konferansı Örgütü (İKÖ) adıyla kurulmuştur (Organisation of Islamic Cooperation [OIC], 2025a).

13-14 Temmuz 2011 tarihinde Kazakistan Astana'da düzenlenen İKÖ 38. Dışişleri Bakanları Toplantısı'nda İKÖ adı İslam İşbirliği Teşkilatı (İİT) olarak değiştirilmiştir. Genel Merkezi Cidde-Suudi Arabistan'da bulunan kuruluşa 57 ülke üyedir. İİT, Birleşmiş Milletlerden sonra en fazla üyeye sahip uluslararası kuruluştur. Teşkilatın en üst düzeyde karar alma organı İslam Zirvesi'dir. Toplantıları her üç yılda bir, Devlet ve Hükümet Başkanları seviyesinde düzenlenmektedir.



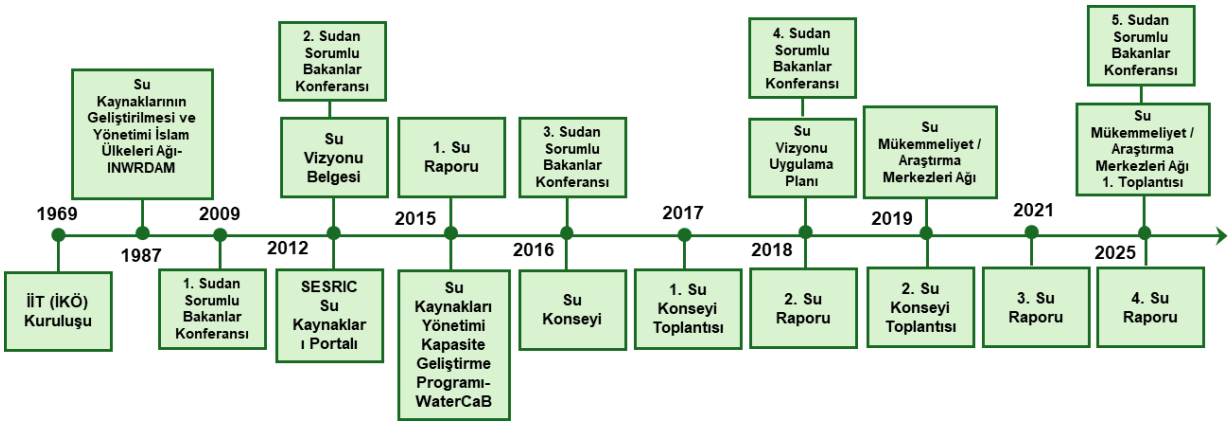
Şekil 1. İİT Üyesi Ülkelerin Dünya Haritası Üzerinde Gösterimi (The Islamic Centre for Development of Trade [ICDT], 2025)

İİT, büyüklük açısından dünyanın en saygın uluslararası örgütler arasındadır. Fakat, 50 yılı aşkın bir geçmişe sahip olmakla birlikte, üye ülkeler arasında beklenen iş birliğinin gerçekleştirilememesi ve sahip olduğu potansiyeli harekete geçirememekle eleştirilmektedir (Sey, 2020). İİT yapısı, amaçları ve bünyesinde kurulan organlar itibariyle diğer uluslararası örgütler ile benzerlik göstermekle birlikte alınan kararların uygulanamayışı nedeniyle istenen düzeyde bir başarı ortaya koyamamaktadır. Bu sorunun en önemli nedenleri arasında üye devletler arasında tarihsel süreçte çeşitli anlaşmazlıklarının var oluşu, birbirinden çok farklı siyasi ve ekonomik sisteme sahip olmaları, güvenliklerini sağlamak için bölge dışı ittifaklarla hareket etmeleri olarak sıralanmaktadır. Bu nedenlere bağlı olarak İİT'nin gerek güvenlik sorunlarının çözümünde ve gerekse teşkilat sözleşmesinde yer alan pek çok evrensel ilkeyi hayata geçirmekte başarısız olduğu değerlendirilmektedir (Birdişli ve Atawula, 2019).

Ülkemiz, İslam âlemini tek çatı altında toplayan yegâne siyasi platform olan İİT'nin gerçek potansiyelini ortaya koyması yönündeki çabalarını aktif olarak sürdürmektedir. Bu kapsamda ülkemiz İİT'nin iki alt kuruluşu (İslam Ülkeleri İstatistik, Ekonomik ve Sosyal Araştırma ve Eğitim Merkezi - SESRIC, İslam Tarih, Sanat ve Kültür Araştırma Merkezi - IRCICA); bir Daimi Komite (İslam İşbirliği Teşkilatı Ekonomik ve Ticari İşbirliği Daimi Komitesi - İSEDAK) ile dört bağlı kuruluşu (İslam İşbirliği Gençlik Forumu - İİGF), İslam İşbirliği Teşkilatı Yayıncılık Düzenleyici Otoriteleri Forumu - IBRAF), İslam Ülkeleri Müşavirler Federasyonu - FCIC ve İslam Ülkeleri Standartlar ve Metroloji Enstitüsü - SMIIC) ve bir uzmanlık kuruluşunun temsilciliğine (İslam Kalkınma Bankası - İsDB Türkiye Ofisi) ev sahipliği yapmaktadır (T.C. Dışişleri Bakanlığı, 2025).

2 İslam İşbirliği Teşkilatının Su Yönetimi Politikaları

İlk kurulduğunda siyasi bir teşkilat olarak göze çarpan İİT'nin, ilerleyen dönemde küreselleşmenin etkisi ile küresel konuların değerlendirilmeye başladığı görülmektedir. 1980'li yıllarla başlayan ekonomik işbirliğinden sonra 1984 yılında gerçekleştirilen zirvede sanayi, tarım, sağlık, bilim ve teknoloji, ulaşım ve enerji alanları da İİT kapsamında işbirliği yapılacak alanlara dahil edilmiştir. 1987 yılında düzenlenen 5. İslam Zirvesi'nde üyeler arasında kurulması planlanan ağlardan birisi su kaynaklarıdır (Ateş, 2015). Daha sonraki yıllarda su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, üye ülkeler arasındaki dayanışmayı artırmak amacıyla birçok alanda faaliyet gösteren İİT'nin gündeminde öncelikli bir yere sahip olmuştur. İİT'nin su kaynaklarıyla ilgili önemli faaliyetlerin kronolojik sıralaması aşağıdaki gösterilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. İslam İşbirliği Teşkilatının Suyla İlgili Önemli Faaliyetleri

İİT'nin su kaynakları yönetimi konusundaki ilk adımı 1987'de kurulan Su Kaynaklarının Geliştirilmesi ve Yönetimi İslam Ülkeleri Ağıdır (INWRDAM). Bu ağ, Bilim ve Teknoloji İşbirliği Daimi Kurulu (COMSTECH) rehberliğinde faaliyet gösteren Ürdün merkezli özerk bir kuruluştur. Kuruluş, politika geliştirme, uygulamalı araştırma ve bölgesel diyaloglar aracılığıyla sürdürülebilir su yönetimini ilerleten proaktif bir "Düşün ve Yap Kuruluşu" olarak işlev görmektedir. Pilot programlar, toplum katılımı, politika savunuculuğu ve kapasite geliştirme girişimleri aracılığıyla çözümler uygulamaktadır. Sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etme vizyonu ve entegre kaynak yönetimini destekleme misyonuyla uyumlu olan INWRDAM, Ortadoğu ve Kuzey Afrika (MENA) Bölgesinde Su-Enerji-Gıda-Ekosistem Bağıntısı (WEFE Nexus) girişimine de öncülük etmektedir.

INWRDAM çalışmalarını dört ana başlık altında yürütmektedir. Bunlar:

• Temiz suya güvenli ve eşit erişimi sağlamaya odaklanarak bunu temel bir insan hakkı ve halk sağlığının temel taşı olarak kabul eden İçme Suyu ve İnsan Refahı,

• Suyun ekonomik büyümenin itici gücü olarak rolünü vurgulayan, sürdürülebilir uygulamaları teşvik ederken tarımı, endüstriyi ve geçim kaynaklarını destekleyen Ekonomik Faaliyetler ve Kalkınma,

• Sağlıklı ekosistemlerin uzun vadeli su güvenliği için olmazsa olmaz olduğunu anlayarak, doğal dengeyi koruma, su kaynaklarını koruma ve biyolojik çeşitliliği korumada ekosistemlerin hayati rolü,

• Dayanıklılık ve uyum stratejileri geliştirerek seller, kuraklıklar ve diğer suyla ilgili riskler de dahil olmak üzere iklim değişikliğinin oluşturduğu büyüyen zorlukları ele alan "Suyla İlgili Tehlikeler ve İklim Değişikliği"dir (The Inter-Islamic Network on Water Resources Development and Management [INWRDAM], 2025).

Değişen dünyada su sorunlarına farklı bir çerçeveden yaklaşması amacıyla gerçekleştirilen İİT -o zamanki adıyla İslam Konferansı Örgütü (İKÖ)- Birinci Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansı, suyun öneminin altını çizmek, su sorunlarının çözümü çalışmalarına destek olmak ve ülkemizin su sektöründe sahip olduğu tecrübelerin paylaşılması maksadıyla 16–22 Mart 2009 tarihlerinde İstanbul'da düzenlenen 5. Dünya Su Forumu marjında gerçekleştirilmiştir. Toplantıda, ülkelerin karşı karşıya kaldığı su sorunlarının çözümü için somut öneriler içeren "Su Vizyonu Belgesi" hazırlanması ve "Su Konseyi" kurulması konularında mutabakat sağlanmıştır.

İİT bünyesinde, "Su Vizyonu" belgesinin hazırlanması için bir "Uzmanlar Grubu" oluşturulmuştur. Grubun ilk toplantısı, 25-26 Mayıs 2010 tarihlerinde Dubai-Birleşik Arap Emirlikleri'nde, ikinci toplantısı 13-14 Temmuz 2011 tarihinde Astana-Kazakistan'da düzenlenen 38. Dışişleri Bakanları Toplantısı sırasında gerçekleştirilmiştir. Toplantılarda söz konusu belgenin yapısı ve içeriği tartışılarak, ülkeler arasında "güven arttırıcı" mekanizmaları geliştirmesi hususunda görüş birliğine varılmıştır. Ayrıca belgenin üye ülkelerin görüşüne sunularak nihai hale getirilmesi ve akabinde Ülkemizin ev sahipliğinde gerçekleştirilecek bir toplantıda gözden geçirilerek Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansında onaylanması kararlaştırılmıştır.

Bu kapsamda 12-14 Ocak 2012 tarihlerinde İstanbul'da, dönemin Orman ve Su İşleri Bakanlığının ev sahipliğinde, 27 ülkeden temsilcilerin katılımının yanı sıra ve İİT kuruluşlarından Bilim ve Teknoloji İşbirliği Daimi Kurulu (COMSTECH), İslam Eğitim, Bilim ve Kültür Organizasyonu (ICESCO), SESRIC ve IsDB'den yetkililerin yer aldığı 45 kişilik bir katılımla "Kıdemli Memurlar Toplantısı" gerçekleştirilerek belgeye ilişkin nihai görüşler toplanmıştır.

Akabinde 5-6 Mart 2012 tarihleri arasında Türkiye Ulusal Temas Noktası olan Türkiye Su Enstitüsü'nün koordinasyonunda, İstanbul'da İİT İkinci Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansı düzenlenmiştir. "Su Güvenli bir Gelecek için Birlikte Çalışmak" temasıyla düzenlenen Konferansa 14 ülke Bakan, 3 ülke Bakan Yardımcısı, 3 ülke Büyükelçilik ve diğer ülkelerden de farklı seviyelerde 66 katılımcı olmak üzere toplam 86 kişilik geniş bir katılım sağlanarak Su Vizyonu Belgesi "Karar" metni onaylanmıştır. Bu bağlamda ülkemiz 5. Dünya Su Forumu sırasında başlattığı "İİT Su Vizyonu Belgesi" girişiminde aktif ve etkin rol üstlenmiştir.

2.1 İİT Su Vizyon Belgesi

"İİT Su Vizyonu"; üye ülkeleri arasında iş birliği sağlayarak, ana faaliyetlerde gelişmiş su güvenliği konusunu harekete geçirmeyi hedefleyen güçlü bir çağrıdır. Üye ülkelerde gelişmiş su güvenliğinin tesisi ve ülkeler arasında güven arttırıcı mekanizmaların geliştirilmesi amacıyla, içme suyundan sulamaya, hidro-enerjiden atıksuya su ile ilgili pek çok konuda iş birliği yapılmasını öngörmektedir. Vizyon, üye ülkelerin farklı deneyimlerinin paylaşıldığı ve neyin işe yarayıp neyin yaramadığından çıkarılan derslerle şekillenmiş, su bakımından güvenli bir gelecek sağlamak için eşsiz bir ortak çalışma imkânı sağlamaktadır.

Su kıtlığı, kurak ve yarı kurak bölgelerde bulunan İİT üyesi ülkelerin üçte birinde ciddi bir endişe kaynağı oluşturmaktadır. İİT ülkelerinin yıllık ortalama yağış miktarı 500 mm'den azdır. Diğer taraftan ani yağışlar ve suyun fazlalığı sebebiyle sel ve toprak kayması gibi zorluklarla karşı karşıya kalan ülkeler de bulunmaktadır. Bu tür zorlukların iklim değişikliği nedeniyle daha da kötüleşmesi beklenmektedir. Bu nedenle sınır ötesi su konularının çözümü de dahil olmak üzere suyla ilgili konularda İİT bünyesinde iş birliğinin hacmini artırmak için çabalar sarf edilmektedir. Bu çerçevede Su Vizyon Belgesi (SVB), İİT üyesi ülkeler arasında suyun yönetimi ve yıkıcı etkilerinin azaltılması hususlarında zorlukların aşılması için ortak bir vizyon belirleme hedefine odaklanmıştır (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2012).

Yedi başlık altında toplanan dokümanın 1. bölümünde su vizyonu ile ilgili bilgilendirme, 2. bölümünde su güvenliği ile ilgili karşılaşılan zorluklar karşısında İİT'nin rolü üzerinde değerlendirme, 3. bölümünde mevcut durum ile gelecekteki durum ve İİT üyesi ülkelerde su güvenliği konusunda yaşanan sıkıntılar,

4. bölümünde SVB'nin amacı, program ve eylem planları, 5. bölümünde sorumluluklar, düzenlemeler ve ilgili teamüller konusunda kurumsal düzenlemeler, 6. bölümünde geleceğe yönelik yapılabilecek çalışmalar, 7. bölümünde ise sonuçlar ve genel değerlendirmeler yer almaktadır (Ateş, 2015).

Su Vizyonu karar metninde, belgenin su alanında iş birliği için bir çerçeve çizen doküman olarak kabul edilmesi, bilgi ve deneyim paylaşımı, araştırma alanında ortak çalışmalar yapılması, su konusunda İİT bilgi merkezleri vasıtasıyla politik ve yönetimsel destek sağlanması, kapasite geliştirme, iş ve hizmet sağlanması, özel forumlar ve konferansların organize edilmesi hususları yer almaktadır.

Su Vizyonunda İİT ülkelerinin, farklı coğrafi ve iklimsel özelliklere sahip olsa da ortak inançları ve geçmişleri sayesinde su güvenliği için iş birliği yapma fırsatına sahip olduğu vurgulanarak "su güvenliği için birlikte çalışma" temel ilke olarak benimsenmektedir. Bu doğrultuda üç temel hedef belirlenmiştir:

1. Bilgi Paylaşımı ve Kapasite Geliştirme: İİT ülkelerindeki su bilimleri, politika ve yönetim alanlarında mükemmeliyet -araştırma- merkezleri arasında iş birliği sağlanması.

2. Su Sorunlarına Çözüm Üretme: Üye ülkeler arasında deneyim paylaşımı artırılacak ve somut projeler geliştirilmesi.

3. Su Güvenliği Konusunu Ulusal ve Uluslararası Gündeme Taşıma: İİT liderlerinin su güvenliği konusunda politika geliştirmelerinin teşvik edilmesi.

Su vizyonunun uygulanması için mükemmeliyet-araştırma- merkezleri arasında akademik değişim programları, ortak araştırmalar ve personel değişim programları, çevrimiçi bilgi paylaşım platformları oluşturularak bilgi ve deneyim paylaşımı yapılması; su yönetimi, su tasarrufu, sulama teknikleri gibi alanlarda işbirliği çalışmaları, pilot bölgelerde uygulamalar gerçekleştirilmesi; kapasite geliştirme amacıyla eğitim programları ve kadınların su yönetimine katılımını artıracak projeler yapılması; su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı konusunda halkı bilinçlendirmeye yönelik kampanyalar düzenlenmesi, okullarda su bilinci eğitimleri ile genç nesillerin farkındalığının artırılması; su projelerine finansman sağlamak amacıyla kamu-özel sektör ortaklıklarının geliştirilmesi, fon kaynaklarının artırılması, İslami finans araçları ve bağış modelleriyle projelerin sürdürülebilirliğinin sağlanması; su konulu zirveler düzenlenerek üye ülkelerin işbirliği artırılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda bölgesel toplantılar ve teknik çalıştaylar ile su yönetimi konusunda uluslararası iş birliği teşvik edilecektir (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2012).

2.2 İİT Su Konseyi

"Vizyondan Eyleme" ana teması altında 17-19 Mayıs 2016 tarihlerinde İstanbul'da gerçekleştirilen İİT Üçüncü Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansında, kabul edilen "İİT Su Vizyonu" belgesinin hayata geçirilmesine, İİT bünyesinde "Su Konseyi" kurulması ve İİT Su Vizyonu Uygulama Planı kapsamında kaynak dağıtım mekanizması oluşturulmasına yönelik kararlar alınmıştır (Türkiye Su Enstitüsü [SUEN], 2025).

Su Konseyi'nin amaçları; İİT Su Vizyonu çerçevesinde belirlenen faaliyetleri teşvik etmek, üye ülkeler arasında kapasite geliştirme ve deneyim paylaşımını sağlamak, finansal mekanizmalar oluşturmak ve iş birliğini artırmak, BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda su güvenliğini sağlamak, teknik iş birliği, araştırma, eğitim ve politika geliştirme süreçlerine destek olmak ve İİT üye ülkelerinin suyla ilgili zorlukları aşmalarına yardımcı olmak olarak tanımlanmıştır. Konseyin, İİT Tüzüğü'ne uygun olarak çalışması ve yılda en az bir kez toplanması öngörülmektedir.

Konsey; mevcut, önceki ve bir sonraki Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansı ev sahibi ülke temsilcileri, İİT Zirve Konferansı Başkanı, Afrika, Arap ve Asya gruplarından üçer üye ülke temsilcisi olmak üzere toplam 9 ülke temsilcisi, İİT Genel Merkezi'nin bulunduğu ülke temsilcisi ve İİT Genel Sekreteri veya temsilcisi olmak üzere toplam 15 kişiden oluşmaktadır. İİT'ye bağlı ilgili kuruluşlar ve uluslararası organizasyonlar gözlemci olarak, Su Konseyi'nin gerekli gördüğü diğer kuruluşlar da davetli olarak Konsey'e katılabilmektedir. Kararlar oy birliği ile alınarak Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansı'na sunulmaktadır.

Su Konseyi Bürosunda; Sudan Sorumlu Bakanları Konferansı Başkanı (mevcut ev sahibi ülke), iki başkan yardımcısı, raportör ve önceki büronun başkanı doğal üye olarak görev yapmaktadır. İİT Genel Sekreterliği, Su Konseyi'nin sekreteryasını yürütmektedir.

İİT Birinci Su Konseyi Toplantısı, 16 Kasım 2017 tarihinde yine ülkemizin ev sahipliğinde, İstanbul'da gerçekleştirilmiştir. Toplantıya Azerbaycan, Bangladeş, Gine, Irak, İran, Nijerya, Mısır, Suudi Arabistan, Türkiye, Tunus, Uganda dahil olmak üzere 11 ülkeden katılım sağlanmıştır. Toplantıya İİT Genel Sekreterliği ile gözlemci olarak COMSTECH, ISESCO, SESRIC, IDB, INWARDAM ve ICBA kuruluşlarının temsilcileri de yer almıştır. Toplantıda Su Vizyonunun uygulanmasına yönelik mekanizması Su Konseyi'nin değerlendirmesine açılmıştır. Su ile ilgili projelere fon sağlamak amacıyla

İİT Su Bakanları Konferansı ve İİT Su Konseyi altında “Kaynak Dağıtım Grubu”nun kurulması öngörülmüştür.

İİT Su Vizyonu Uygulama Planı 14-16 Ekim 2018 tarihleri arasında, Mısır’ın başkenti Kahire’de düzenlenen İİT Dördüncü Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansında onaylanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. İİT Dördüncü Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansı Kaynak Dağıtım Mekanizması (Organisation of Islamic Cooperation, 2025b)

Söz konusu uygulama planında, kapasite geliştirmenin çeşitli yolları ve birçok farklı beceri geliştirme alanları mevcuttur. Üye ülkelerin kapasite boşluklarını değerlendirmek için SESRIC, Türkiye Su Enstitüsü (SUEN) ile birlikte üye ülkelerle paylaşılan bir anket hazırlamıştır. Bu süreç sonunda SESRIC ayrıca üye ülkelerdeki insan kaynaklarının kapasitelerini geliştirme amacıyla Su Kaynakları Yönetimi Kapasite Geliştirme Programı'nı (Water-CaB) geliştirmiştir (Türkiye Su Enstitüsü [SUEN], 2025).

21-22 Ekim 2019 tarihlerinde Kahire-Mısır’da gerçekleştirilen İİT İkinci Su Konseyi Toplantısı sonucunda; İslam Kalkınma Bankası'nı (İKB), bir sonraki Sudan Sorumlu Bakanlar Toplantısından önce, İİT ülkelerindeki “Su Sektörü Kaynak Merkezleri için Haritalama Programı” projesini tamamlamaya teşvik ettiği, kıdemli yetkililer ve Bakanlarla İİT Su Sektörü Politikası ve Strateji Uygulama Planını paylaştığı, bu tür raporların hazırlanması ve İİT kurumları ve diğer uzmanlaşmış uluslararası/bölgesel kuruluşlar arasında yayımlanmasının üye ülkeler için değerli olacağı kabul edilmiştir. Ayrıca, İİT Genel Sekreterliğinin, Su Vizyonunun uygulanmasında tüm aktörlerin ilerlemesini teşvik etmek, tüm paydaşları içeren savunuculuk ve kamuoyu bilinçlendirme atölyeleri düzenlemek için üye ülkeler, İİT kurumları ve diğer bölgesel ve uluslararası örgütler arasında bilgi paylaşımı yoluyla koordinasyon sağlayacağı vurgulanmıştır.

2.3 SESRIC Su Kaynakları Portalı

SESRIC, Mayıs 1977'de Trablus'ta düzenlenen 8. İslam Dışişleri Bakanları Konferansı'nda alınan karar ile İİT’nin -o zamanki adıyla İKÖ’nün- bir alt organı olarak kurulmuştur. Merkez, 1 Haziran 1978'de Ankara'da faaliyetlerine başlamıştır. SESRIC’in üç temel görevi bulunmaktadır. Bunlar üye ülkelere ilişkin sosyo-ekonomik istatistik ve bilgileri bir araya getirmek, işlemek ve yaymak ve bu ülkelerin kullanımına sunmak, üye ülkelerdeki ekonomik ve sosyal gelişmeleri incelemek ve değerlendirmek, aralarındaki iş birliğini başlatacak ve artıracak öneriler üretmeye yardımcı olmak ve üye ülkelerin ihtiyaçlarına ve İİT’nin genel amaçlarına uygun seçilmiş alanlarda eğitim programları düzenlemektir.

2012 yılında gerçekleştirilen İİT İkinci Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansında, üye ülkelerin ihtiyaçlarının eğitim, kapasite geliştirme, deneyim, uzmanlık ve teknik yardım açısından teklifleriyle eşleştirilmesini kolaylaştırmak için su kaynakları hakkında bir web portalının kurulması ve bu bilgilerin eğitim faaliyetlerini organize etmede ve uygulamada kullanması tavsiyesi üzerine, SESRIC tarafından bir su kaynakları portalı kurulmuştur (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2025a). “https://oicwater.sesric.org” adresinde hizmet veren portalda; su alanındaki güncel gelişmeler ve etkinlikler, İİT ülkeleri arasında su yönetimi ile ilgili imzalanan anlaşmalar ve düzenlemeler, İİT ülkelerindeki su yönetimi politikaları, İİT İstatistik Veri Tabanındaki (OICStat) Su İstatistikleri ve Su Göstergelerinde Ülke Profilleri, su yönetimi, iklim değişikliği, yenilenebilir su kaynakları gibi konularda rapor ve akademik çalışmalar yer almaktadır.

2.4 Su Kaynakları Yönetimi Kapasite Geliştirme Programı (Water-CaB)

Su alanı, İİT- 2025 Eylem Programı kapsamında üye ülkeler tarafından ortak eylem için belirlenen önemli iş birliği alanlarından biridir. 2012 yılında Türkiye'de düzenlenen İkinci Sudan Sorumlu Bakanlar İslam Konferansı, SESRIC'ten su kaynakları portalı geliştirmesinin yanında bu bilgileri eğitim faaliyetlerini organize etmede ve uygulamada kullanmak için uzmanlığını kullanmasını talep etmiştir.

Bu bağlamda İİT üyesi devletlerde insan kaynaklarının su alanındaki kapasitelerini artırma amacıyla Su Kaynakları Yönetimi Kapasite Geliştirme Programını (Water-CaB) 2015 yılında geliştirilmiştir. https://www.sesric.org/cbp-water.php adresinde hizmet veren program, üye ülkeler arasında bilgi alışverişini, deneyim paylaşımını ve en iyi uygulamaları kolaylaştırmada aktif bir rol oynamayı ve böylece İİT Su Vizyonunun uygulanmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2015a).

2.5 İİT Su Raporları

İİT Su Raporu, SESRIC tarafından, her iki yılda bir düzenlenen Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansı'na sunulmak üzere düzenli olarak hazırlanmaktadır. Rapor, üye ülkelerinin su alanında karşı karşıya olduğu mevcut durum, zorluklar ve riskler ve risklerin iş birliği fırsatlarına nasıl dönüştürüleceği konusunda nesnel bilgiler ve analizler sunmaktadır. Rapor ayrıca İİT ülkelerinin suyla ilgili ihtiyaçlarını ve önceliklerini belirlemekte ve İİT Su Vizyonunun uygulanmasının mevcut durumunu değerlendirmektedir. Şimdiye kadar 2015, 2018, 2021 ve en son 2025 yılında dört adet su raporu yayımlanmıştır.

2.5.1 İİT Su Raporu 2015

Raporda; İİT ülkelerinin gelişmiş içme suyu kaynaklarına erişimi sağlama olanakları, diğer ülke gruplarının gerisinde kaldığı vurgulanmıştır. İİT üye ülkelerindeki su bulunabilirliği, artan su talebini yönetme yolları, su kıtlığıyla başa çıkma yolları, su kullanımı ve gıda üretiminin dengelenmesinin zorlukları, su ve sanitasyon hizmetlerine erişim, İİT Su Vizyonunun uygulanmasının değerlendirilmesi ve suyla ilgili zorluklarla başa çıkmak için politika önerileri yedi bölümde ele alınmıştır (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2015).

Raporun vurguladığı bir diğer önemli nokta da İİT ülkelerinde kullanılmayan atıksu arıtma potansiyeli ve atık suyun yeniden kullanılması konusudur. İİT su raporunun haklı olarak tartıştığı bir diğer nokta da nüfus artışının su talebi konusunda ortaya çıkardığı büyük zorluktur. İİT üyesi ülkelerin nüfus trendi dünyadaki diğer ülke gruplarıyla bir tezat teşkil etmektedir (Sümer, 2016).

2.5.2 İİT Su Raporu 2018

“Risklerin Diyalog ve İşbirliğine Dönüştürülmesi” teması ile hazırlanan rapor, İİT üye ülkelerindeki mevcut durum ve üye ülkelerde su ile ilgili konularda yaşanan problemleri değerlendirmektedir.

Raporda; geçtiğimiz son 5 yıl içinde İİT üye ülkelerindeki toplam su oranının yenilenebilir su kaynaklarına oranının sadece %13,3 olduğu, üye ülkelerin dünya nüfusunun %23,6’sını barındırdığı göz önünde tutulduğunda, İİT coğrafyasının yetersiz yenilenebilir su kaynakları nedeniyle ortaya çıkan olumsuzluklardan etkileneceğinin altı çizilmektedir. İİT üyesi olmayan ülkelere kıyasla üye ülkelerin yenilenebilir su kaynakları açısından çok daha fazla baskı altında olduğu, özellikle Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesindeki üye ülkelerin (%79,6) bu baskının en yoğun olarak gözlemlendiği bölgeler olduğu ifade edilmektedir. Buna karşın üye ülkelerde su verimliliğinin oldukça düşük olduğunun altı çizilmektedir. İİT ülkelerindeki su talebinin gelişmiş veya üye olmayan gelişmekte olan ülkelere kıyasla çok daha yüksek olduğunu ortaya koyan rapor, geçen 15 sene içinde İİT ülkelerindeki suyun %80’inin tarım sektörü için kullanıldığını ve bunun gıda üretiminde kullanılan su kaynakları ile ilgili büyük bir dengesizliğe işaret ettiğini belirtmektedir. Ayrıca içme suyu ve sanitasyon hizmetlerine erişim açısından üye ülkelerdeki kentsel ve kırsal bölgeler arasında ciddi bir eşitsizliğin olduğu da tespit edilmektedir. Mevcut su kaynakları üzerindeki baskının yanı sıra, İİT ülkelerinde tatlı su kaynakları nedeniyle devletlerarası ve ülke içi 176 adet çatışma yaşandığını ve bunun bir sonucu olarak su güvenliğinin İİT’nin önemli bir gündem maddesi haline geldiğini, su kaynakları ile ilgili konulardan kaynaklanan risklerin işbirliği fırsatlarına dönüştürülebileceğini belirtmektedir. Diğer taraftan 15 İİT üye ülkesinin İİT Su Vizyonunun uygulamasında sağladıkları başarı ve karşılaştıkları zorlukları verileri analiz edildiği tematik bölümünde, ülkelerin su ile ilgili konulardaki gereksinimleri ve önceliklerini incelenmekte ve su güvenliğinin sağlanması konusunda stratejiler geliştirilmektedir (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2018).

2.5.3 İİT Su Raporu 2021

"Sürdürülebilir Su Yönetimine Doğru" teması ile hazırlanan rapor, birçok İİT üyesi ülkedeki su sektörünün kötü durumda olduğunu, su sıkıntısı yaşayan 29 ülke olduğunu ve bunlardan 18'inin kritik seviyede olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, İİT üyesi ülkelerde içme suyu ve sanitasyon konusunda önemli ilerlemeler kaydedildiği, temel içme suyuna erişimi olan nüfusun oranının 2010'da %80,8 iken 2017'de %84,6'ya yükseldiği, temel sanitasyona erişimi olan nüfusun oranının 2010'da %58,3 iken 2017'de %64,2'ye yükseldiği ortaya konmuştur. Ayrıca, özellikle kırsal ve düşük gelirli bölgelerde evrensel anlamda su, sanitasyon ve hijyen (WASH) hizmetlerini sağlamak için hala tutarlı çabalara ihtiyaç olduğunun altı çizilmektedir. İİT ülkelerindeki su kaynaklarının değişen iklimden güçlü bir şekilde etkileneceği, İİT ülkelerindeki su sektörünün dünya ortalamasına kıyasla daha savunmasız ve iklim değişikliğinin etkileriyle başa çıkmaya daha az hazır olduğunu belirtilmiştir. Bunun İİT ülkelerinin iklim değişikliğine uyum çabalarına yatırım yönlendirmek için yeterli ekonomik, yönetişim ve sosyal kapasitelerden hala yoksun olduğunu gösterdiği ifade edilmiştir. Raporda; tarım ve su sektörü arasındaki önemli bağlantı vurgulanarak İİT ülkelerindeki tarım arazilerinin dünyadaki toplam tarım arazilerinin dörtte birini oluşturması nedeniyle gıdaya olan talebin artmasının, üye ülkelerdeki su sektörü için önemli sonuçlar doğurduğu vurgulanmaktadır. İİT ülkelerindeki tarımsal su kullanımının, tüm kullanımın %86,6'sını oluşturduğunun altı çizilmiştir. Bununla birlikte, sulama için donatılmış alan, İİT bölgesinde %5,9 ile İİT dışındaki gelişmekte olan ülkelere (%8,2) ve dünya ortalamasına (%6,8) göre düşük seviyede olduğu belirtilmektedir. Rapor ayrıca su ve enerji arasında yaygın olarak 'su-enerji bağı' olarak adlandırılan ilişkiyi ortaya koymaktadır. Rapor, İİT Su Vizyonu doğrultusunda İİT üye ülkelerinin nüfusları için daha su güvenli bir ortam elde etme çabalarına katkıda bulunmak amacıyla özellikle daha sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarının benimsenmesi, geleneksel olmayan suların gücünden yararlanılması ve su kullanım verimliliğinin iyileştirilmesi yoluyla İİT içi iş birliğinin artırılması gibi bazı politika önerileri ortaya koymaktadır (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2021).

2.5.4 İİT Su Raporu 2025

22-24 Ekim 2025 tarihlerinde Cidde-Suudi Arabistan'da düzenlenen İİT Beşinci Su İşlerinden Sorumlu Bakanlar Konferansında "Sürdürülebilir Gıda Güvenliği için Su Kaynaklarının Optimize Edilmesi" temalı son su raporunun tanıtımı gerçekleştirilmiştir.

Raporda, İİT ülkelerinde su kaynakları, yönetim uygulamaları ve bunların gıda güvenliğiyle olan kritik bağlantılarına dair kapsamlı analiz yer almaktadır. İİT ülkelerinin artan su kıtlığı, yükselen talep ve iklim değişikliğinin tarımsal üretim ve gıda sistemleri üzerindeki etkileriyle nasıl başa çıktığını değerlendirmek için güncel veriler ve araştırmalardan yararlanılmıştır. Raporda, İİT ülkelerinin dünya yenilenebilir su kaynaklarının %13,3'ünü oluşturduğunu, ancak kişi başına düşen su miktarının (yıllık 3.575 m^3) küresel ortalamanın neredeyse yarısı kadar olduğunu ortaya koymaktadır. Tatlı su kaynaklarının %85,6'sının tarıma ayrılmasıyla birlikte, su kıtlığı gıda güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma için belirleyici bir kısıtlama haline geldiği vurgulanmaktadır. Ayrıca raporda su kaynakları üzerindeki baskılara rağmen, İİT ülkelerinde temel içme suyuna erişimin 2010'da %80,2'den 2022'de %87,0'e yükseldiği; temel sanitasyona erişimin %58,4'ten %70,1'e çıktığı; tarımda su kullanım verimliliğinin de 2015 ile 2022 yılları arasında metreküp başına 0,34 ABD dolarından 0,42 ABD dolarına mütevazı bir artış göstererek, verimlilik ve su yönetimindeki kademeli iyileşmeyi yansıttığı belirtilmektedir. Ancak raporda yer alan bulgular ile halen süregelen kırılganlıkların altı çizilmeye devam etmektedir. Bu kapsamda İİT ülkelerinde yaklaşık 263 milyon insan yetersiz beslendiği ve bu nüfusun dünyada toplam yetersiz beslenen nüfusun %36,4'ünü oluşturduğu ifade edilmektedir. İİT ülkelerindeki tarım arazilerinin, dünyada toplamın yaklaşık dörtte birini oluşturduğu, ancak tarım sektöründe suyun verimli kullanılamaması sebebiyle (özellikle sulanan arazilerde %85,5 oranında yüzey sulaması yapılması) sürdürülebilir verimliliğin sınırlı olduğu bildirilmektedir. Raporda, su kıtlığı, verimsiz sulama ve iklim kaynaklı değişkenliğin gıda güvenliğine yönelik en acil tehditler arasında yer aldığı vurgulanmaktadır. 2050 yılına kadar, nüfus artışı, kentleşme ve genişleyen ekonomik faaliyetler nedeniyle su talebinin önemli ölçüde artmasının beklendiği; bu sebeple entegre su kaynakları yönetimine geçiş, tuzdan arındırma ve atık suyun yeniden kullanımı gibi geleneksel olmayan su kaynaklarına yatırım yapılması ve modern sulama tekniklerinin benimsenmesini gerektiği vurgulanmaktadır. Bu itibarla İİT üyesi 45 ülkede, katılımcı su yönetimine ilişkin yasal çerçevenin oluşturulduğu Kuveyt, Katar, Suudi Arabistan ve Türkiye gibi ülkelerde Entegre Su Kaynakları Yönetimi'nde (IWRM) yüksek uygulama seviyesine ulaşıldığı, bu gelişmelerin İİT bölgesinde sürdürülebilir su yönetimine yönelik artan farkındalığı ve kurumsal ilerlemeyi gösterdiği ifade edilmektedir. Rapor, gelecek nesiller için su ve gıda güvenliğinin sağlanması amacıyla İİT bünyesinde iş birliğinin güçlendirilmesine yönelik güçlü bir çağrıyla sona

ermektedir. Su, tarım ve iklim sektörleri arasında politika entegrasyonunun güçlendirilmesi, sağlam veri altyapısı ve yenilikçi yaklaşımlarla desteklendiğinde; su güvenliğinin sağlanması, dayanıklılığın artırılması ve İİT üyesi ülkelerde sürdürülebilir gıda sistemlerinin güvence altına alınması yolunda kritik bir adım olarak öne çıkmaktadır (The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries [SESRIC], 2025b).

2.6 İİT Su Mükemmeliyet-Araştırma Merkezleri Ağı

"Su Mükemmeliyet-Araştırma Merkezleri Ağı" oluşturulması girişimi, Ekim 2018'de Kahire-Mısır'da düzenlenen İİT Dördüncü Sudan Sorumlu Bakanlar Konferansında kabul edilen Karar ve 2019 yılında gerçekleştirilen 2. İİT Su Konseyi toplantısı önerileri kapsamında başlatılmıştır. Söz konusu girişim, İİT üyesi ülkeler arasında su güvenliği konusunda araştırma, bilgi paylaşımı ve koordineli eylemler güçlendirmeye yönelik önemli bir adım sayılmaktadır.

Su kaynakları yönetiminin tüm üye ülkeler için hayati olması nedeniyle Su Mükemmeliyet-Araştırma Merkezleri arasında ağ oluşturmanın, üye ülkeler arasında ortak araştırma, bilgi ve deneyim paylaşımının kolaylaştırılması ve güçlendirilmesi için önemli bir girişim olacağı, bu kapsamda, entegre su kaynakları yönetimi konusunda ortak araştırma için istişare ve işbirliği yapmaya yönelik olarak düzenlenecek toplantıların, su sorunlarını belirleme ve çözüm önerme noktasında bir temel teşkil edeceği öngörülmektedir. Uygulama mekanizması olarak; Merkezlerin araştırmalarını ve en iyi uygulamalarını ortak bir platform üzerinde paylaşmak için SESRIC tarafından eğitim, kapasite geliştirme, deneyim paylaşımı, uzmanlık ve teknik destek alanlarında üye ülkelerin birbiriyle örtüşen ihtiyaçlarını kolaylaştırmak için kurulan su kaynakları ile ilgili internet portalını kullanması beklenmektedir.

İİT Üye Ülkelerinde Su Mükemmeliyet-Araştırma Merkezleri Ağı Birinci Toplantısı, araya giren COVİD salgını vb. nedenlerden ötürü 24-25 Şubat 2025 tarihleri arasında İslamabad-Pakistan'da COMSTECH Sekreterliği'nde gerçekleştirilmiştir. Toplantı, Hisar Vakfı, SESRIC ve INWRDAM iş birliğiyle ortaklaşa düzenlenmiştir. Su Mükemmeliyet-Araştırma Merkezleri Ağının sekreterlik görevini INWRDAM yapması öngörülmektedir. Sekreterliğin, Su Mükemmeliyet/Araştırma Merkezleri arasında iş birliğini teşvik etmek için bir eylem planı geliştirmesi; karşılıklı olarak kararlaştırılan projelerin uygulanması için hedefleri, faaliyetleri, temel performans göstergelerini ve zaman çizelgesini ortaya koyması beklenmektedir. Ayrıca, İİT Su Vizyonunun uygulanmasında tüm aktörlerin ilerlemesini teşvik etmek ve yaymak için üye ülkeler, İİT kurumları ve diğer bölgesel ve uluslararası kuruluşlar arasında koordinasyon sağlayacak ve ayrıca tüm paydaşları içeren savunuculuk ve kamuoyu bilinçlendirme atölyeleri düzenleyecektir.

3 Türkiye'nin İİT Üye Ülkeleriyle İş Birliği Fırsatları

Ülkemizin su alanındaki girişimleri, İslam İşbirliği Teşkilatı (İİT) nezdinde takdirle karşılanmakta ve Türkiye bu alanda model ülke olarak anılmaktadır. Bu kapsamda, sahip olduğumuz teknik bilgi birikimi ve ileri teknolojilerin Türk özel sektörü aracılığıyla İİT üyesi ülkelere aktarılması yönünde talepler gelmektedir. Bu kapsamda İİT üyesi ülkelerle su alanında geliştirilebilecek iş birliği fırsatları, aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir:

- Kapasite Geliştirme Programları: Türkiye, su yönetimi alanındaki teknik bilgi birikimini üye ülkelerle paylaşarak kapasite geliştirme faaliyetlerine katkı sunabilir.
- Ortak Araştırma ve Geliştirme Projeleri: Su verimliliği, iklim değişikliğine uyum, tarımsal sulama sistemlerinin modernizasyonu gibi konularda ortak projeler geliştirilebilir.
- Eğitim ve Uzman Değişimi: Teknik personel ve akademisyenlerin karşılıklı değişimi, uzmanlık alanlarında bilgi birikiminin artmasını sağlayacaktır.
- Politika Diyaloğu ve Danışmanlık: Türkiye, su yönetimi politikalarının geliştirilmesi konusunda üye ülkelere danışmanlık hizmeti sunabilir.

İİT üyesi ülkelerle ile iş birliği yapılabilecek özel alanlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye'nin İİT Üyesi Ülkelerle ile İş Birliği Yapabileceği Özel Alanlar

Ülkeler	İŞ BİRLİĞİ ALANLARI													
	Taşkın	Kuraklık	Çölleşme ve erozyon	İklim Değişikliği	Depolama Tesisleri	Yeraltı suyu	İçmesuyu ve sanitasyon	Suyun etkin kullanımı	Alternatif su kaynakları	Su kalitesi ve kirlilik	Sınır aşan sular	Entegre Su Yönetimi	Sedimentas - yon	HES İnşaatı
Afganistan		✓		✓		✓			✓	✓	✓			
Azerbaycan		✓		✓					✓	✓	✓	✓		
Bahreyn		✓				✓		✓	✓	✓				
Birleşik Arap Em.		✓				✓		✓	✓	✓				
Bangladeş	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	
Burkina Faso				✓			✓	✓	✓	✓				
Cezayir		✓		✓					✓					
Çad				✓			✓							
Endonezya	✓	✓		✓	✓			✓		✓				
Fas					✓			✓				✓		
Fildişi Sahili				✓		✓	✓			✓				
Filistin		✓				✓	✓		✓	✓	✓	✓		
Guena														✓
Gambiya						✓	✓					✓		
Irak			✓								✓			
İran		✓					✓					✓		
Kamerun							✓			✓				
Katar		✓		✓					✓	✓		✓		
Kuveyt		✓				✓		✓	✓	✓				
Mali	✓	✓				✓	✓	✓	✓			✓		
Malezya	✓								✓	✓		✓	✓	
Mısır	✓	✓		✓				✓			✓			
Nijer				✓		✓				✓		✓		
Pakistan	✓			✓		✓		✓	✓	✓	✓			
Senegal							✓	✓				✓		
Somali		✓		✓		✓	✓		✓	✓		✓		
Sudan		✓					✓				✓	✓		✓
Suudi Arabistan		✓	✓			✓		✓	✓	✓				
Tunus	✓					✓				✓				
Umman		✓				✓		✓	✓	✓				
Ürdün		✓		✓		✓			✓					

4 Sonuç ve Değerlendirme

Coğrafi dağılımı, teşkilat yapısı ve üye sayısı bakımından göz ardı edilemeyecek bir uluslararası kuruluş olan İİT, sosyal, kültürel, kısmen ekonomik ve teknik konularda başarılı projeler yürütüyor olmakla birlikte bazı hayati öneme sahip konularda beklenilen sonuçları elde edemediği görülmektedir.

İİT çatısı altında yürütülen su faaliyetleri, üye ülkeler arasında bilgi ve deneyim paylaşımını teşvik etmesi, ortak sorunlara yönelik dayanışma ruhunu güçlendirmesi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sunması açısından büyük önem arz etmektedir. Su kaynaklarının giderek artan baskı altında olduğu günümüzde, İİT bünyesinde geliştirilecek çok taraflı iş birlikleri, ortak sorunlara ortak çözümler üretme kapasitesini artıracaktır.

Türkiye, sahip olduğu teknik altyapı, kurumsal deneyim ve su yönetimi konusundaki kapsamlı mevzuat çerçevesiyle, İİT üyesi ülkeler arasında lider ülke konumundadır. Özellikle entegre su kaynakları yönetimi, su verimliliği uygulamaları, kuraklık ve taşkın yönetimi gibi alanlarda Türkiye'nin kazandığı tecrübeler, üye ülkelerle paylaşılmaya hazır önemli bir potansiyel durumundadır. Ayrıca, Türk kamu özel sektörünün su teknolojileri alanındaki üretim ve uygulama kapasitesi, iş birliklerinin somut projelere dönüşmesi açısından stratejik bir öneme sahiptir.

Bu doğrultuda, Türkiye'nin İİT ile ilişkilerinde su alanını öncelikli iş birliği konularından biri olarak ele alması faydalı olacaktır. Kapasite geliştirme, ortak projeler, eğitim programları ve danışmanlık hizmetleri gibi araçlar kullanılarak hem ikili hem de çok taraflı düzeyde yapısal ve sürdürülebilir iş birlikleri geliştirilebilir. Bu çabalar, yalnızca teknik alanla sınırlı kalmayıp, diplomatik ve ekonomik etkileşimi de güçlendirecek; Türkiye'nin bölgesel ve küresel ölçekteki görünürlüğüne katkı sağlayacaktır.

Önümüzdeki süreçte Türkiye'nin, İİT'nin ilgili birimleriyle koordinasyonunu artırarak, su alanında kurumsal mekanizmaların güçlendirilmesine ve ortak platformların etkinliğinin artırılmasına öncülüğe devam etmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda, İİT bünyesinde suya ilişkin kalıcı bir iş birliği çerçevesi oluşturulması, teknik forumların düzenli hale getirilmesi ve bilgi paylaşımının sistematikleştirilmesi gibi adımlar, uzun vadeli etkiler yaratacaktır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin İİT ile su alanında daha kapsamlı, bütüncül ve sürdürülebilir bir iş birliği perspektifi geliştirmesi, hem ülkemizin kalkınma diplomasisi vizyonuna katkı sağlayacak hem de İslam dünyasında su kaynaklarının etkin ve adil yönetimine yönelik somut kazanımlar elde edilmesine imkân tanıyacaktır.

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

Armstrong, M. (2024). *Where water stress will be highest by 2050*. Statista. https://www.statista.com/chart/26140/water-stress-projections-global/

Ateş, A. (2015). *Su konusunda faaliyet gösteren uluslararası kuruluşlar özelinde İslam İşbirliği Teşkilatı (İİT) örneği* (Uzmanlık tezi). Orman ve Su İşleri Bakanlığı.

Birdişli, F., Atawula, M. (2019). İslam İşbirliği Teşkilatı (İİT)'nin önemi ve bölgesel güvenlik sorunlarının çözümünde işlevsizliğinin nedenleri. *The Journal of Turk-Islam World Social Studies*, 6(20), 77–101. https://doi.org/10.16989/TIDSAD.1668

Organisation of Islamic Cooperation. (2025a). *History*. https://new.oic-oci.org/SitePages/LandingpageEN.aspx?lan=en.

Organisation of Islamic Cooperation. (2025b). *Implementation plan for OIC water vision*. https://new.oic-oci.org/sitepages/ConferenceDetailsCatgWiseEN.aspx?Item=38

Sey, N. (2020). İslam İşbirliği Teşkilatı üzerine bir değerlendirme: Ekonomik sorunlar ve fırsatlar. *İslam Ekonomisi ve Finansı Dergisi*, 6(1), 55–74.

Sümer, V. (2016). *İslam dünyasında su: Gittikçe derinleşen zorlukların eşlik ettiği karışık bir panorama*. ORSAM. https://orsam.org.tr/yayinlar/islam-dunyasinda-su-gittikce-derinlesen-zorluklarin-eslik-ettigi-karisik-bir-panorama/

Şeren, A., Yıldırım, M. U. (2024). Activities on the efficient use of water in agriculture in Türkiye under climate change. In Ö. Çetin (Ed.), *Agriculture and water management under climate change* (SpringerBriefs in Earth System Sciences). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74307-8_6

T.C. Dışişleri Bakanlığı. (2025). *İslam İşbirliği Teşkilatı (İİT)*. https://www.mfa.gov.tr/islam-isbirligi-teskilati.tr.mfa

The Inter-Islamic Network on Water Resources Development and Management. (2025). *About INWRDAM*. https://inwrdam.net/about

The Islamic Centre for Development of Trade. (2025). *The 57 OIC member states map*. https://icdt-cidc.org/member-states-map/

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries]. (2012). *OIC water vision: Working together for a water-secure future*. https://www.sesric.org/files/oic-water-vision/oic-water-vision.pdf

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries. (2015a). *Water resources management capacity building programme (Water-CaB)*. https://www.sesric.org/cbp-water.php

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries. (2015b). *OIC water report 2015.* https://sesricdiag.blob.core.windows.net/sesric-site-blob/files/article/520.pdf

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries. (2018). *OIC water report 2018.* https://sesricdiag.blob.core.windows.net/sesric-site-blob/files/article/616.pdf

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries. (2021). *OIC water report 2021. https://sesricdiag.blob.core.windows.net/sesric-site-blob/files/article/778.pdf*

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries. (2025a). *OIC portal on water resources*. https://www.sesric.org/oic-water-vision.php

The Statistical, Economic and Social Research and Training Centre for Islamic Countries. (2025b). *OIC water report 2025.* https://sesricdiag.blob.core.windows.net/sesric-site-blob/files/article/895.pdf

Türkiye Su Enstitüsü. (2025). *Organizasyonlar*. https://www.suen.gov.tr/Suen/page.aspx?pg=organizasyonlar

United Nations. (2024). *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. UNESCO, Paris.

DSİ Destek Hizmetleri Dairesi Bşk.
Basın ve Foto-Film Servisi
Ankara-2026