

# YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

Editör: Doç.Dr. İbrahim İskender SOYASLAN

yaz  
yayınları

# **Yer Bilimleri ve Mühendisliği Alanında Akademik Tartışmalar**

**Editör**

Doç.Dr. İbrahim İskender SOYASLAN

**yaz**  
yayınları

2026

**Yer Bilimleri ve Mühendisliği Alanında  
Akademik Tartışmalar**

Editör: Doç.Dr. İbrahim İskender SOYASLAN

---

**© YAZ Yayınları**

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

---

E\_ISBN 978-625-8996-72-2

Haziran 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

[www.yazyayinlari.com](http://www.yazyayinlari.com)

[yazyayinlari@gmail.com](mailto:yazyayinlari@gmail.com)

## İÇİNDEKİLER

- Hidrojeolojide GRACE Veri İşleme İş Akışı ve Uygulama Metodolojisi.....1**  
*İbrahim İskender SOYASLAN*
- Hidrojeolojide Veri Odaklı Yaklaşım: Makine Öğrenimi ve Uygulama Alanları.....17**  
*İbrahim İskender SOYASLAN*
- Nadir Toprak Elementleri ve Jeolojik Oluşumları.....34**  
*Hüseyin SENDİR*

*"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."*

# **HİDROJEOLOJİDE GRACE VERİ İŞLEME İŞ AKIŞI VE UYGULAMA METODOLOJİSİ**

**İ. İskender SOYASLAN<sup>1</sup>**

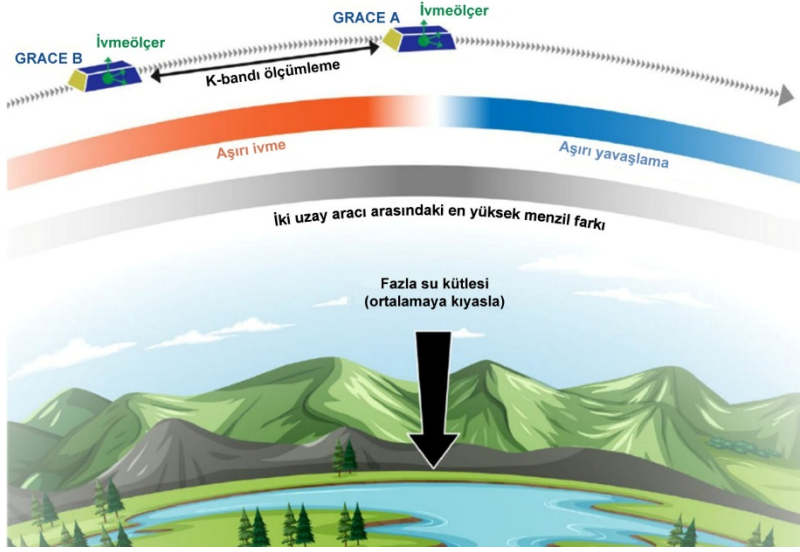
## **1. INTRODUCTION**

GRACE kelimesi Yerçekimi Geri Kazanımı ve İklim Deneyi'nin İngilizce açılımı olan Gravity Recovery and Climate Experiment kelimelerinin baş harflerinin kısaltmasından oluşmaktadır. GRACE uydusu ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration-NASA-) ile Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt-DLR) ortaklığıyla Mart 2002'de fırlatılmıştır (Jiang, ve diğerleri, 2014; Tapley, Bettadpur, Watkins, & Reigber, 2004). GRACE uydusunun temel amacı, yeryüzünün yerçekimi alanındaki zamansal ve konumsal değişimleri izlemektir (Ramillien, Famiglietti, & Wahr, 2008). Geleneksel uzaktan algılama uydularının aksine, GRACE misyonu veri toplamak için elektromanyetik dalgalar kullanmayan benzersiz bir projedir (Besson, 2018; Khorrami & Gündüz, 2025). Uydu, yeryüzünden yaklaşık 500 km yükseklikte ve birbirlerinden yaklaşık 220 km mesafede aynı yörüngeyi paylaşan ikiz uydulardan oluşmaktadır (Jiang, ve diğerleri, 2014; Khorrami & Gündüz, 2025). Uyduların altındaki kütle yerçekimini etkilediğinde, öndeki uydu ivmelenerek arkadaki uydu ile arasındaki mesafenin mikrometre düzeyinde değişmesine neden olur (Besson, 2018). Bu kütlelere örnek olarak büyük boyutlardaki yeraltı suyu rezervleri veya dağlar verilebilir

---

<sup>1</sup> Doç. Dr. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-5282-8094.

(Şekil 1). Bu mesafe değişimleri, K-bandı mikrodalga menzil (KBR) sistemi ile 1 mikron hassasiyetinde ölçülerek yeryüzündeki kütle değişimleri hesaplanır (Jiang, ve diğerleri, 2014; Mohamad, Ahmad, & Din, 2020).



**Şekil 1. GRACE uydularının çalışma prensibi (Khorrani & Gündüz, 2025)**

GRACE uyduları Haziran 2017'de görevlerini tamamlamasından sonra, Mayıs 2018'de GRACE-Follow On (GRACE-FO) görevi başlatılmıştır (Wang & Zhang, 2024; Khorrani & Gündüz, 2025). GRACE-FO uyduları, önceki GRACE uydusunun kullandığı mikrodalga sistemine ek olarak Lazer Menzil İnterferometresi (Laser Range Interferometre-LRI) ile donatılmıştır. Bu donanımı sayesinde ölçüm hassasiyetini mikrodalga dalga boyuna kıyasla çok daha yüksek bir seviyeye taşıyarak gravimetrik farklılıkların nanometre (80 nm) seviyesinde saptanabilmesine olanak tanımıştır (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020). Uydular ayrıca yörünge ve yönelim tespiti için GPS alıcıları, yıldız kameraları ve kütleçekimsel olmayan

ivmeleri ölçmek için hassas ivmeölçerler barındırmaktadır (Jiang, ve diğerleri, 2014; Khorrami & Gündüz, 2025; Besson, 2018).

## **2. HİDROJEOLOJİDE GRACE VERİLERİNİN ÖNEMİ**

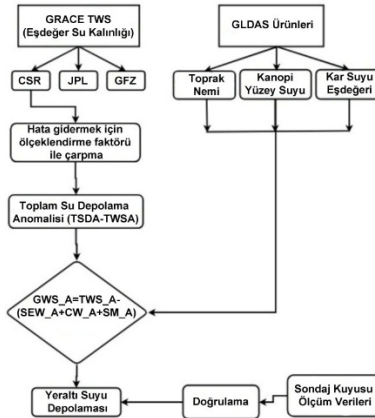
Yeraltı suyu izleme ve hidrolojik değerlendirmelerde geleneksel yöntemler genellikle kuyu ölçümlerine veya modellemeye dayanmaktadır (Jiang, ve diğerleri, 2014). Ancak bu yaklaşımlar maliyetli, zaman alıcı ve geniş alanlara ölçeklendirilmesi oldukça zordur (Huang, ve diğerleri, 2012; Besson, 2018). GRACE, karasal hidroloji için yepyeni bir ufuk açarak, Karasal Su Depolaması (Terrestrial Water Storage - TWS) adı verilen; yüzey suları, toprak nemi, yeraltı suyu, kar ve buzul kütlelerinin dikey olarak entegre edilmiş toplamını büyük havza ölçeklerinde doğrudan ölçme imkanı sunmuştur (Becker, Llovel, Cazenave, Guntner, & Cretaux, 2010; Besson, 2018; Khorrami & Gündüz, 2025).

Hidrojeolojik açıdan GRACE'in en büyük önemi, TWS verilerinden yola çıkılarak Yeraltı Suyu Depolama (Groundwater Storage - GWS) değişimlerinin türetilmesidir (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020). Karasal Su Depolaması ( $\Delta TWS$ ), yeraltı suyu ( $\Delta GW$ ), toprak nemi ( $\Delta SM$ ), yüzey suyu ( $\Delta SW$ ) ve kar su eşdeğerinin ( $\Delta SWE$ ) toplamından oluşur (Shukla, Maurya, & Dwivedi, 2021). Formülasyon gereği, GRACE'den elde edilen TWS anomalisinden, Global Land Data Assimilation System (GLDAS) gibi hidrolojik model çıktılarından sağlanan toprak nemi, kar su eşdeğeri ve yüzey suyu gibi bileşenler çıkarıldığında, doğrudan yeraltı suyu deposundaki net değişim (GWS anomalisi) elde edilebilmektedir (Leblanc, Tregoning, Ramillien, Tweed, & Fakes, 2009; Besson, 2018; Aggarwal & Nidup, 2025). Bu yaklaşım, Hindistan, Orta Doğu ve Amerika Birleşik Devletleri gibi yeraltı suyunun aşırı çekildiği bölgelerde insan kaynaklı

tükenmenin ve kuraklık etkilerinin net bir şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır (Castle, ve diğerleri, 2014; Khorrami & Gündüz, 2025).

### 3. GRACE VERİ İŞLEME İŞ AKIŞI VE METODOLOJİSİ

GRACE ham verilerinin bilimsel analize uygun hale getirilmesi, çeşitli veri işleme seviyelerinden (Science Data System - SDS) oluşan yapılandırılmış bir iş akışı gerektirir (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020). DLR'de toplanan Seviye-0 (L0) ham telemetri verileri, Seviye-1 (L1) aşamasında zaman etiketlemesi ve enstrümantal düzeltmelerden geçerek KBR menzil oranları ve ivme değerlerine dönüştürülür (Sheard, ve diğerleri, 2012). Ardından Seviye-2 (L2) aşamasında, bu veriler atmosfer ve okyanus modelleri ile birleştirilerek yerçekimi potansiyeli alan modelleri üretilir; nihayetinde Seviye-3 (L3) aşamasında ise okyanus, atmosfer ve katı yerküre gelgit etkilerinin giderildiği global ızgara (grid) formatında aylık TWS anomali (TWSA) haritaları oluşturulur (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020). GRACE veri işleme metodolojisi iş akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. GRACE veri işleme metodolojisi akış şeması

Literatürde GRACE hidroloji verileri için temelde iki farklı çözüm (metodoloji) mevcuttur: Küresel Harmonikler (Spherical Harmonics - SH) ve Kütle Yoğunlaşması (Mass Concentrations - Mascon) (Khorrami & Gündüz, 2025).

### **3.1. Küresel Harmonik (SH) Çözümler**

Bu yaklaşımda yerkürenin yerçekimi alanı, 120 veya daha düşük dereceli harmonik katsayılarla ifade edilir (Save, Bettadpur, & Tapley, 2016). Ancak bu veriler işlenirken kuzey-güney yönlü çizgilenme hataları (striping) oluşur (Shukla, Maurya, & Dwivedi, 2021). Bu çizgilenmeleri ve kısa dalga boylu gürültüleri gidermek için Gauss tipi filtreleme veya de-striping (çizgilenme giderme) algoritmaları kullanılır (Jiang, ve diğerleri, 2014)(Khorrami & Gündüz, 2025). Filtreleme işlemi gerçek jeofiziksel sinyallerin (örneğin yeraltı suyu değişimlerinin) de genliğinin düşmesine yol açtığı için, hidrolojik modellerden (örneğin CLSM) elde edilen "ölçekleme faktörleri" (scaling factors) kullanılarak kaybedilen sinyaller veriye geri kazandırılır (Khorrami & Gündüz, 2025).

### **3.2. Mascon Çözümleri**

Daha modern olan Mascon yönteminde yerçekimi alanı, bölgesel bloklar halinde doğrudan kütle değişimleri olarak hesaplanır (Save, Bettadpur, & Tapley, 2016). Bu yöntem, SH çözümlerine kıyasla ağır filtreleme gerektirmez ve daha yüksek bir sinyal-gürültü oranı sağlar (Khorrami & Gündüz, 2025). Mascon çözümlerinde, karadan okyanusa sinyal sızıntılarını (leakage) önlemek amacıyla Kıyı Şeridi Çözünürlük İyileştirme (CRI) gibi algoritmalar ile ölçekleme faktörleri bir arada kullanılır (Wiese, Landerer, & Watkins, 2016).

Kullanıcıların bu karmaşık Seviye-2 Küresel Harmonik verilerini kolayca işleyip hidrolojik zaman serilerine çevirebilmeleri için GRAMAT (GRACE Matlab Toolbox) gibi araçlar da geliştirilmiştir. Bu tür yazılımlar kullanılarak harmonik

katsayıların derece-1 ve derece-2 değişimleri düzenlenir, Gauss filtreleme uygulanır ve istenen alana ait kütle varyasyon serileri türetilir (Shukla, Maurya, & Dwivedi, 2021).

#### **4. KÜRESEL HARMONİK (KH) VE MASCON ÇÖZÜMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI**

Küresel Harmonik (SH) ve Mascon (Kütle Yoğunlaşması) çözümleri, GRACE uydularından elde edilen yerçekimi verilerini işleyip Karasal Su Depolaması (TWS) anomalilerini hesaplamada kullanılan iki farklı Seviye-2 (Level-2) veri işleme yaklaşımıdır (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020; Gemitzi, Koutsias, & Lakshmi, 2021). Aralarındaki temel farklar şunlardır:

##### **4.1. Matematiksel Temsil ve Hesaplama**

Küresel Harmonik (SH) çözümleri, yerkürenin yerçekimi alanını ve jeoid formunu matematiksel olarak ifade etmek için genellikle 120 veya daha düşük dereceli harmonik katsayılar dizisi (küresel harmonik açılım) kullanır (Jiang, ve diğerleri, 2014). Mascon yönteminde ise, yeryüzü ayrık bölgesel bloklara (mascon) bölünür ve yerçekimi gözlemleri doğrudan bu bloklar içindeki kütle değişimlerini tahmin etmek için tersine çevrilir (Khorrami & Gündüz, 2025).

##### **4.2. Hata Profili ve Filtreleme İhtiyacı**

SH çözümlerinin en büyük dezavantajı, verilerde doğası gereği oluşan kuzey-güney yönlü çizgilenme (striping) hatalarıdır. Bu hataları gidermek için uygulanan "de-striping" algoritmaları ve uzamsal filtreler, gerçek jeofiziksel kütle sinyallerinin %50 ila %70 oranında zayıflamasına neden olur (Khorrami & Gündüz, 2025). Mascon yöntemi ise geleneksel SH yöntemine göre daha az sinyal işleme gerektirir, daha yüksek bir sinyal-gürültü oranına (signal-to-noise ratio) sahiptir ve sinyaller daha az hata barındırır (Besson, 2018).

### **4.3. Sinyal Geri Kazanımı ve Sızıntı (Leakage) Hataları**

SH yönteminde filtreleme nedeniyle zayıflayan genlikleri (kaybolan sinyalleri) geri kazanmak için arazi yüzey modellerinden (örneğin CLSM) türetilen ölçekleme faktörlerine (scaling factors) zorunlu bir bağımlılık vardır,. Mascon çözümleri ise kendi içinde daha yüksek bir çözünürlük sağlasa da özellikle kara ve okyanus sınırlarında sızıntı (leakage) hatalarına oldukça yatkındır. Mascon yönteminde bu kıyı sızıntılarını önlemek ve doğruluğu artırmak için Kıyı Şeridi Çözünürlük İyileştirme (CRI) gibi özel filtreler kullanılır (Khorrami & Gündüz, 2025).

### **4.4. Mekansal Çözünürlük ve Kullanım Kolaylığı**

Mascon çözümleri, verilerin ön işlemden geçmiş ve doğrudan kullanıma hazır halde sunulmasını sağlar (Khorrami & Gündüz, 2025). Çözünürlük açısından değerlendirildiğinde, standart 60 derecelik kesilmeli SH çözümleri yaklaşık 330 km'lik bir mekansal çözünürlük sağlarken; Mascon çözümleri yaklaşık 200 km civarında daha detaylı ve iyileştirilmiş bir mekansal çözünürlük sunar (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020).

Sonuç olarak, bu iki yöntem doğaları ve işleme adımları bakımından birbirinden oldukça farklı olsalar da, uygun hata giderme ve ölçekleme işlemleri yapıldıktan sonra ürettikleri TWS anomali çıktıları birbirine oldukça benzerdir.

## **5. UYGULAMA METODOLOJİSİ VE SINIRLAMALARI**

GRACE verileri; kuraklık ve taşkın olaylarının (örneğin Su Depolama Açığı İndeksi - WSDI) izlenmesinde, evapotranspirasyonun (ET) tahmin edilmesinde, buzul kütle dengelerinin analizinde ve hidrolojik modellerin kalibrasyonunda yoğun olarak kullanılmaktadır (Khorrami & Gündüz, 2025).

Buna karşın, bu teknolojinin uygulamalarını kısıtlayan en temel zorluk kaba mekansal çözünürlüktür. GRACE uydularının fiziki ayak izi yaklaşık 200.000 ile 300.000 kilometrekarelik büyük havza alanlarını kapsadığı için yerel ölçekteki su değişimlerinin tespiti zorlaşmaktadır (Besson, 2018; Khorrami & Gündüz, 2025). Bu kısıtlamayı aşmak için, uzaktan algılanan yüksek çözünürlüklü verilerin (örneğin 0.1° çözünürlüklü GPM IMERG yağış verileri) yardımıyla istatistiksel ve dinamik mekansal ölçek indirgeme teknikleri uygulanmaktadır (Gemitzi, Koutsias, & Lakshmi, 2021). Doğrusal regresyon veya yapay zeka temelli istatistiksel mekansal indirgeme yöntemleri kullanılarak GRACE verileri 1 derecelik çözünürlüklerden 0.1° gibi çok daha detaylı ölçeklere başarıyla indirgenebilmekte ve hidrolojik modellere daha uygun hale getirilebilmektedir (Khorrami & Gündüz, 2025).

GRACE kullanımında karşılaşılan bir diğer büyük sorun, uydu pillerinin zayıflaması sonucu özellikle 2011-2018 yılları arasında ortaya çıkan veri boşlukları ve GRACE ile GRACE-FO arasında oluşan 11 aylık kesinti dönemidir (Wang & Zhang, 2024). Literatürde, eksik hidrolojik zaman serilerini tamamlamak için; İklimsel modeller (ERA5, GLDAS), Çok Değişkenli Tekil Spektrum Analizi (MSSA) gibi zaman serisi ayrıştırma metotları ve son dönemde sıcaklık, yağış ve buharlaşma gibi meteorolojik değişkenleri girdi olarak alan Makine Öğrenmesi ile Derin Öğrenme (Deep Learning - Transformer, CNN) algoritmaları başarıyla kullanılmakta ve veri boşlukları yüksek doğrulukla doldurulmaktadır (Gyawali, Ahmed, Murgulet, & Wiese, 2022). Özellikle Transformer tabanlı derin öğrenme modelleri, uzun hidrolojik zaman serilerindeki yerel bağlamı (öz-dikkat mekanizması ile) kavrayarak kurak bölgelerdeki TWS tahmin performansında büyük bir ilerleme sağlamıştır (Wang & Zhang, 2024). Sonuç olarak GRACE verisi, hidrolojik modellemeler ve yardımcı yapay zeka araçlarıyla entegre edildiğinde, kısıtlı yerölçüm verisine sahip bölgelerde yeraltı suyu kaynaklarının

sürdürülebilir yönetimi adına paha biçilmez bir metodolojik çerçeve sunmaktadır (Aggarwal & Nidup, 2025).

## **6. GRACE VERİSİNİ MEKANSAL ÖLÇEĞE İNGİRGEME YÖNTEMLERİ**

GRACE verilerini kaba çözünürlükten yerel ölçeklere (yüksek çözünürlüğe) indirmek için literatürde temel olarak dinamik (model tabanlı) ve istatistiksel (veri güdümlü) olmak üzere iki ana mekansal ölçek indirgeme (spatial downscaling) yaklaşımı kullanılmaktadır (Gemitzi, Koutsias, & Lakshmi, 2021; Khorrami & Gündüz, 2025).

### **6.1. Dinamik (Fiziksel Tabanlı) Ölçek İndirgeme**

Bu yaklaşım, kaba çözünürlüklü GRACE verileri ile yüksek çözünürlüklü yardımcı değişkenler arasında fiziksel bir model kurmaya dayanır (Gemitzi, Koutsias, & Lakshmi, 2021). Düşük çözünürlüklü GRACE verileri, daha yüksek çözünürlüğe sahip fiziksel tabanlı Arazi Yüzey Modellerine (Land Surface Models - LSM) entegre edilerek çalıştırılır (Khorrami & Gündüz, 2025). Açık kaynaklı bu modeller, atmosferik zorlama verileriyle birleştirilerek veri asimilasyonu (data assimilation) sistemleri çerçevesinde yüksek çözünürlüklü çıktılar elde edilmesini sağlar (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020). Ancak bu yöntemler yüksek hesaplama gücü gerektirir, çok çeşitli kaynaklardan elde edilen kapsamlı veri setlerine ihtiyaç duyar ve arazi yüzey modellerindeki parametrisasyon sorunları ile atmosferik belirsizlikler gibi zayıflıklara karşı oldukça duyarlıdır.

### **6.2. İstatistiksel Ölçek İndirgeme**

İstatistiksel yöntemler, dinamik yöntemlere kıyasla daha esnek, pratik ve hesaplama açısından daha düşük maliyetli oldukları için hidroloji çalışmalarında öne çıkmaktadır (Khorrami & Gündüz, 2025). Kaba ölçekli GRACE verileri (tahmin ediciler)

ile daha ayrıntılı yüksek çözünürlüklü hedef veri setleri arasında ampirik bağlantılar kurulmasına dayanır. Bu bağlamda kullanılan başlıca istatistiksel teknikler şunlardır:

- **Regresyon ve Kalıntı Düzeltme Modelleri:** GRACE verilerini örneğin 1 derecelik çözünürlükten 0.1 dereceye indirmek için, **GPM IMERG** gibi uydulardan elde edilen yüksek çözünürlüklü yağış verileri yardımcı (auxiliary) değişken olarak yoğunlukla kullanılır (Gemtzi, Koutsias, & Lakshmi, 2021). Yağış ile Karasal Su Depolaması (TWS) arasındaki zaman gecikmelerini (time lag) dikkate alan **piksel tabanlı regresyon formülleri** oluşturulur. İndirgenen verinin doğruluğunu büyük ölçüde artırmak için hesaplama sürecine bir **kalıntı düzeltme (residual correction)** algoritması da entegre edilir.
- **Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi:** İstatistiksel ölçek indirgemenin daha modern ve gelişmiş versiyonları olarak, GRACE verilerini yerel ölçekteki dinamiklere uyarlamak amacıyla **Yapay Zeka (AI)** ve **Makine/Derin Öğrenme (Machine/Deep Learning)** algoritmalarından da faydalanılmaktadır (Khorrami & Gündüz, 2025).

### **6.3. Diğer Veri Füzyonu (Birleştirme) Teknikleri**

GRACE verilerinin kaba mekansal çözünürlüğünü yerel su yönetimi (örneğin bölgesel akiferler) seviyesine daha iyi odaklayabilmek için InSAR (İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar) gibi yüksek çözünürlüklü diğer uzaktan algılama teknolojileriyle veri birleştirme (füzyon) işlemi yapılır (Besson, 2018). InSAR uyduları yeryüzündeki çökelmeleri ve deformasyonları milimetre ölçeğinde tespit edebildiği için; kaba GRACE kütle verileri ile bu InSAR verileri birleştirildiğinde, 200.000 kilometrekareden daha küçük yerel alanlardaki yeraltı suyu deşarjı ve çökme sorunları tespit edilebilmektedir (Castellazzi, ve diğerleri, 2018).

Uygulanan tüm bu ölçek indirgeme modellerinin güvenilirliğini artırmak ve hidrolojik pratiklere uygunluğunu sağlamak amacıyla, tüp kuyu su seviyesi ölçümleri, yüzey stratigrafisi ve nehir akış verileri gibi yer gerçeği (ground-truth) verileri süreç içinde referans olarak kullanılır ve model çıktıları bu değerlerle kalibre edilir (Mohamad, Ahmad, & Din, 2020).

## **7. SONUÇ**

GRACE ve GRACE-FO (Follow-On) uyduları, yeryüzünün yerçekimi alanındaki zamansal ve konumsal değişimleri izleyerek, karasal su depolaması (TWS) ve yeraltı suyu depolamasındaki (GWS) kütle değişimlerini havza ölçeğinde ölçmede hidrojeoloji ve iklim bilimi alanlarında devrim yaratmıştır. Geleneksel nokta tabanlı kuyu ölçümlerinin yüksek maliyet, zaman kaybı ve geniş alanlara ölçeklendirilme zorluğu gibi dezavantajlarını aşan bu teknoloji; özellikle yeraltı suyunun aşırı çekildiği bölgelerde su tüketiminin ve kuraklık gibi aşırı iklim olaylarının anlaşılması için benzersiz bir makro-ölçekli çerçeve sunmaktadır.

Hidrojeolojik uygulamalardaki temel metodoloji, kütle korunumu prensibine dayanmaktadır. GRACE uydularından elde edilen entegre TWS anomalisinden; GLDAS veya NLDAS gibi hidrolojik modeller yardımıyla yüzey suyu, toprak nemi ve kar su eşdeğeri gibi bileşenler çıkarılarak doğrudan yeraltı suyu depolarındaki net kütle değişimleri hesaplanabilmektedir. Veri işleme aşamasında ise, Küresel Harmonik (SH) ve Mascon olmak üzere iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır. SH çözümlerindeki çizgilenme hatalarını gidermek için uygulanan filtrelerin neden olduğu sinyal kayıpları, arazi yüzey modellerinden elde edilen ölçekleme faktörleri ile geri kazanılmaktadır. Giderek daha çok tercih edilen ve sinyal-gürültü oranı daha yüksek olan Mascon çözümlerinde ise kıyı şeridi sinyal sızıntılarını engellemek için

Kıyı Şeridi Çözünürlük İyileştirme (CRI) filtreleri başarıyla kullanılmaktadır.

Sonuç itibarıyla, GRACE ve GRACE-FO verileri; gelişmiş hidrolojik modeller (veri asimilasyonu) ve güncel yapay zeka algoritmalarıyla birleştirildiğinde, dünyanın veri açısından fakir bölgelerinde dahi yeraltı suyu potansiyelinin belirlenmesi, taşkın/kuraklık tahmini ve sürdürülebilir su politikalarının oluşturulması için en güçlü bilimsel araçlardan biri haline gelmiştir. Bu teknolojik sıçrama, yapay zekâ destekli ölçek indirgeme metotlarıyla birleştiğinde, hidrolojik ve hidrojeolojik olayların ve yeraltı suyu kaynaklarının yerel ölçekte, çok daha eşzamanlı ve kesin bir biçimde izlenmesinin yolunu açmaktadır.

## **KAYNAKÇA**

- Aggarwal, A., Nidup, S. (2025). Ground water recharge and storage variability using GRACE satellite in Punjab. *Environment, Development and Sustainability*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-07100-8>
- Becker, M., Llovel, W., Cazenave, A., Guntner, A., Cretaux, J. F. (2010). Recent hydrological behavior of the East African great lakes region inferred from GRACE, satellite altimetry and rainfall observations. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(3), 223-233. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.12.010>
- Besson, A. (2018). Weighing earth, tracking water: Hydrological applications of data from GRACE satellites. New Haven: A Senior Thesis presented to the faculty of the Department of Geology and Geophysics, Yale University, in partial fulfillment of the Bachelor's Degree.
- Castellazzi, P., Longuevergne, L., Martel, R., Rivera, A., Brouard, C., Chaussard, E. (2018). Quantitative mapping of groundwater depletion at the water management scale using a combined GRACE/InSAR approach. *Remote Sensing of Environment*, 205, 408-418. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.025>
- Castle, S. L., Thomas, B. F., Reager, J. T., Rodell, M., Swenson, S. C., Famiglietti, J. S. (2014). Groundwater depletion during drought threatens future water security of the Colorado River Basin. *Geophysical Research Letters*, 41, 5904-5911. <https://doi.org/10.1002/2014GL061055>
- Gemitzi, A., Koutsias, N., Lakshmi, V. (2021). A spatial downscaling methodology for GRACE total water storage anomalies using GPM IMERG precipitation estimates.

- Remote Sensing, 13(5149), 1-18.  
<https://doi.org/10.3390/rs13245149>
- Gyawali, B., Ahmed, M., Murgulet, D., Wiese, D. N. (2022). Filling temporal gaps within and between GRACE and GRACE-FO terrestrial water storage records: an innovative approach. *Remote Sensing*, 14(7), 1565. <https://doi.org/10.3390/rs14071565>
- Huang, Y. H., Jiang, D., Zhuang, D. F., Wang, J. H., Yang, H. J., Ren, H. Y. (2012). Evaluation of relative water use efficiency (RWUE) at a regional scale: a case study of Tuhai-Majia Basin, China. *Water Science and Technology*, 66(5), 927-933. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.257>
- Jiang, D., Wang, J., Huang, Y., Zhou, K., Ding, X., Fu, J. (2014). The review of GRACE data applications in terrestrial hydrology monitoring. *Advances in Meteorology*(725131), 1-9. <https://doi.org/10.1155/2014/725131>
- Khorrami, B., & Gündüz, O. (2025). A holistic overview of the applications of GRACE observed terrestrial water storage in hydrology and climate science. *Environ Monit Assess*, 197(785), 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14207-y>
- Leblanc, M. J., Tregoning, P., Ramillien, G., Tweed, S. O., Fakes, A. (2009). Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water Resources Research*, 45(4), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2008WR007333>
- Mohamad, N., Ahmad, A., Din, A. H. (2020). Monitoring groundwater depletion due to drought using satellite gravimetry: A review. *IOP Conf. Series: Earth and*

- Environmental Science (IGRSM 2020). 540, s. 1-11. Serdang, Selangor, Malaysia: IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012054>
- Ramillien, G., Famiglietti, J. S., Wahr, J. (2008). Detection of continental hydrology and glaciology Signals from GRACE: a review. *Surveys in Geophysics*, 29(4-5), 361-374.
- Save, H., Bettadpur, S., & Tapley, B. D. (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7547-7569. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>
- Sheard, B. S., Heinzl, G., Danzmann, K., Shaddock, D. A., Klipstein, W. M., Folkner, W. M. (2012). Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission. *Journal of Geodesy*, 86(12), 1083-1095. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0566-3>
- Shukla, M., Maurya, V., Dwivedi, R. (2021). Groundwater monitoring using GRACE mission. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (s. 425-430). Nice, France: Volume XLIII-B3-2021 XXIV ISPRS Congress (2021 edition).
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09607.
- Wang, L., Zhang, Y. (2024). Filling GRACE data gap using an innovative transformer-based deep. *Remote Sensing of Environment*, 315(114465), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114465>

Wiese, D. N., Landerer, F. W., Watkins, M. M. (2016). Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution. *Water Resources Research*, 7490-7502. <https://doi.org/10.1002/2016WR019344>

# **HİDROJEOLOJİDE VERİ ODAKLI YAKLAŞIM: MAKİNE ÖĞRENİMİ VE UYGULAMA ALANLARI**

**İ. İskender SOYASLAN<sup>1</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Yeraltısuyu dünyadaki milyarlarca insanın hayati faaliyetlerini sürdürebilmesi için ana tatlı su kaynağını oluşturmaktadır. Artan nüfus, iklim değişikliği, aşırı tüketim ve tarımsal faaliyetler gibi faktörler nedeniyle tarihte görülmemiş kirlilik riskine maruz kalmaktadır (Ahmadi ve diğerleri, 2022; Shaikh & Birajdar, 2024). Tüm dünyadaki yeraltı suları rezervleri, içme suyu güvenliği ve tarımsal sürdürülebilirlik için stratejik bir öneme sahiptir. Son yıllarda etkileri yoğun olarak hissedilen iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri ve artan antropojenik çekim akiferleri tehdit etmektedir. Bu tehditler akifer seviyelerinin hassas bir şekilde izlenmesini ve tahmin edilmesini zorunlu kılmaktadır. Hidrojeolojik sistemlerin önemli bir bölümünü oluşturan akiferlerin bu dinamik ve karmaşık yapısını yönetebilmek, günümüzde geleneksel yöntemlerin ötesine geçen yenilikçi tekniklerin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Geleneksel hidrojeolojik modelleme yaklaşımları olan fizik tabanlı nümerik modeller, sistemin yönetilmesi için kapsamlı sınır koşullarına ve yüksek çözünürlüklü hidrolik parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Ancak birçok havzada, gözlem kuyusu ağlarının seyrekliği veya veri setlerindeki

---

<sup>1</sup> Doç. Dr. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-5282-8094.

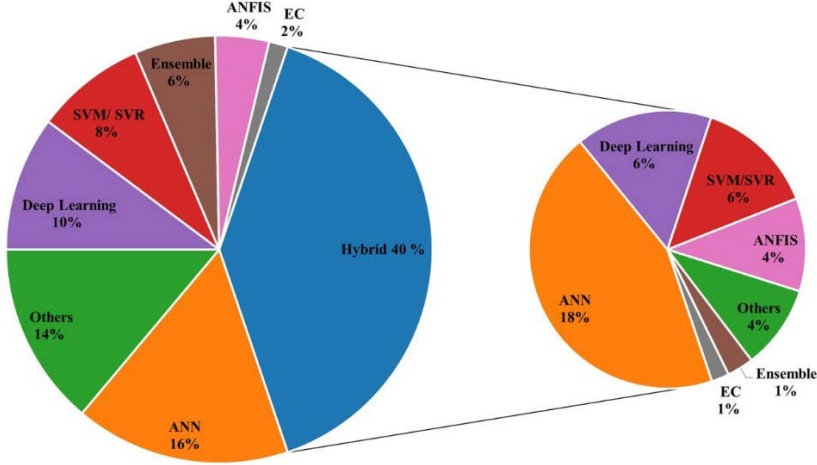
zamansal kesintiler, bu fiziksel modellerin kalibrasyonunu ve güvenilirliğini kısıtlamaktadır. Bu veri kısıtlılığı sorunuyla başa çıkmak için son yıllarda veri odaklı yaklaşımlar, özellikle de AI ve Makine Öğrenmesi (ML) teknikleri öne çıkmaya başlamıştır. Yeraltı suyu seviyesi (GWL) modellemesinde kullanılan yapay zekâ yöntemlerini kapsamlı bir şekilde incelemesiyle bu modellerin karmaşık, doğrusal olmayan hidrolojik süreçleri temsil etme yeteneğinin klasik istatistiksel yöntemlerden çok daha üstün yönleri ortaya konulmuştur (Rajae ve diğerleri, 2019).

Geçmişte yeraltı suyu dinamiklerini modellemek için çoğunlukla MODFLOW, HYDRUS, ParFlow ve HydroGeoSphere gibi fizik tabanlı sayısal ve kavramsal modeller kullanılmıştır (Zhang ve diğerleri, 2018; Jesse ve diğerleri, 2025). Ancak bu geleneksel modeller; sistemin altındaki tüm fiziksel mekanizmaların tam olarak anlaşılmasını gerektirir, kurulumları ve kalibrasyonları oldukça zordur ve çok sayıda detaylı hidrojeolojik girdiye ihtiyaç duydukları için hesaplama açısından yüksek zaman maliyetleri yaratırlar (Rajae ve diğerleri, 2019)

Son yıllarda bilgisayar ve yazılım teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte ML ve DL gibi AI temelli veri odaklı güçlü bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Vu ve diğerleri, 2025). ML modelleri, hidrojeolojik süreçlerin karmaşık fiziğine tam hakimiyet gerektirmeden, sadece mevcut geçmiş meteorolojik (yağış, buharlaşma ve sıcaklık) ve hidrojeolojik (yeraltı suyu seviyesi) verileri kullanarak sistemdeki doğrusal ve durağan olmayan ilişkileri öğrenebilir (Boo ve diğerleri, 2024; Vu ve diğerleri, 2025). Üstelik bu tahmin başarısını sağlarken hesaplama yükünü muazzam ölçüde hafifletirler; örneğin DL ve Evrişimli Sinir Ağları (CNN) temelli bir model, fiziksel bir modele kıyasla 45 kata kadar daha hızlı sonuç üretebilmektedir (Kim ve diğerleri, 2024).

Literatürde hidrojeoloji konusunda ML üzerine yapılmış toplam 142 farklı çalışma incelenerek modellerin dağılımları çıkarılmıştır (Şekil 1). Şekilde sağdaki pasta grafiği, birincil öğrenme algoritmalarına dayalı olarak sınıflandırılmış hibrit ML modellerinin yüzdesini göstermektedir. Bu istatistikler, incelenen çalışmalarda benimsenen çeşitli ML modellerini temsil etmektedir (Boo ve diğerleri, 2024).

Yeraltı suyu seviyelerinin tahmininde ML algoritmalarının başarısı, özellikle zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalayabilen LSTM mimarisi ile kanıtlanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2018). Literatürdeki kapsamlı derlemeler, bu modellerin veri kısıtlı alanlarda klasik fizik tabanlı modellere göre daha esnek çözümler sunduğunu göstermektedir (Rajae ve diğerleri, 2019). Ancak, en iyi sonuçların genellikle fiziksel yasalar ile veriyi harmanlayan hibrit yaklaşımlardan elde edildiği de vurgulanmaktadır (Boo ve diğerleri, 2024)



**Şekil 1. Literatürde kullanılan farklı ML modellerinin dağılımları (Boo ve diğerleri, 2024)**

Saf ML modellerinin "kara kutu" (black-box) doğası, fiziksel süreçlerin ihmal edilmesine neden olabilmektedir. Bu noktada literatürdeki en güncel eğilim, fiziksel yasalar ile DL'yi

birleştiren hibrit yapılara kaymaktadır. Fizik tabanlı DL (Physics-Informed Deep Learning) yöntemlerinin, yeraltı akışı ve taşınımı süreçlerinde veri kısıtlılığına rağmen fiziksel olarak tutarlı sonuçlar üretebilmektedir (Kim ve ark. (2024).

Bu çalışma, AI'nın sağladığı bu veri odaklı dönüşümün teorik temellerini, avantajlarını ve pratik hidrojeoloji sahasındaki vizyoner uygulamalarını literatürden çarpıcı örnekler eşliğinde derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır.

## **2. UYGULAMA ALANLARI**

Son yıllardaki çalışmalarda, ML hidrojeoloji alanında başlıca şu noktalarda yoğunlaştığı ve başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

### **2.1. Yeraltı Suyu Seviyesi (GWL) Değişimi Tahmini**

ML'nin yeraltı suyu araştırmalarındaki en yaygın kullanım alanıdır ve literatürdeki çalışmaların yaklaşık %82.5'ini oluşturur (Ahmadi ve diğerleri, 2022; Jesse ve diğerleri, 2025).

ML'nin yeraltı suyu araştırmalarındaki en yaygın uygulama alanı, meteorolojik veriler ve geçmiş su seviyelerini kullanarak gelecekteki GWL değişimlerinin tahmin edilmesidir (Rajaei vd., 2019). Özellikle zaman serisi verilerinde yaşanan gradyan kaybolması problemini Uzun Kısa Vadeli Bellek (LSTM) ve Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU) gibi DL modelleri çözmektedir (Boo ve diğerleri, 2024; Vu ve diğerleri, 2025). Bu yöntemler yeraltı suyu dinamiklerini ve uzun vadeli zaman bağımlılıklarını öğrenmede geleneksel yöntemlere kıyasla üstün bir performans sergilemektedir (Zhang ve diğerleri, 2018).

## **2.2. Su Kalitesi Modellemesi ve Kirlilik Risk Haritalaması**

İçme ve sulama sularının güvenliğini sağlamak için su kalitesinin değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. İçme ve sulama sularının güvenliğini sağlamak amacıyla Su Kalite İndeksinin (WQI) ve nitrat/ağır metal gibi kirlilik unsurlarının öngörülmesi, ML'nin bir diğer kritik kullanım alanıdır (Venkatesh ve diğerleri, 2026). Araştırmacılar, rastgele orman (RF), SVM ve DL algoritmalarını kullanarak WQI ve entropi su kalite indeksi (EWQI) gibi metrikleri yüksek doğrulukla sınıflandırmakta ve tahmin etmektedir (Kumar ve diğerleri, 2026; Venkatesh ve diğerleri, 2026).

Aynı zamanda tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan nitrat sızıntıları, pestisitler ve çöp döküm (landfill) sahalarının yeraltı suyu kirliliğine (vulnerability) olan etkisi DRASTIC gibi indeksler ve ML entegrasyonu ile hassas risk haritalarına dönüştürülmektedir (Ijlil ve diğerleri, 2022; Ransom ve diğerleri, 2021).

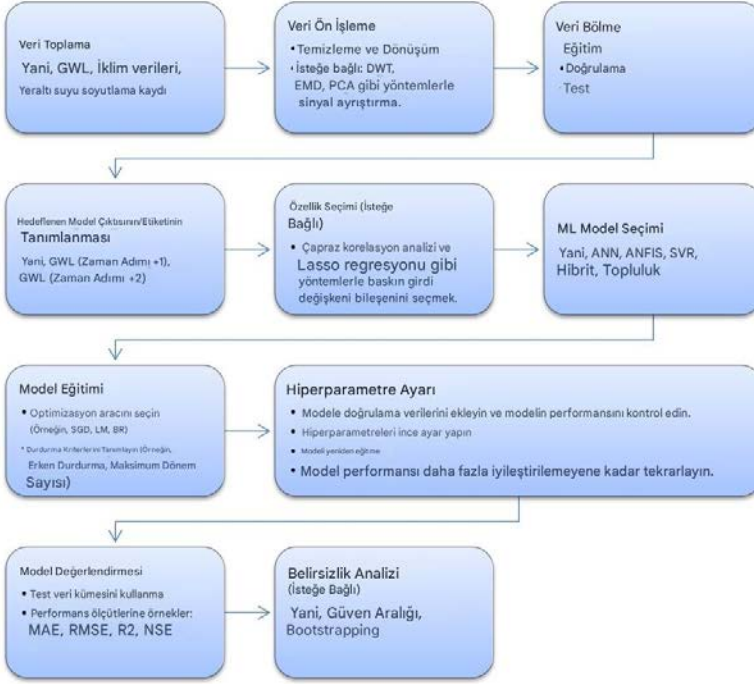
## **2.3. İklim Değişikliği ve Arazi Kullanımının Yeraltı Suyu Beslenimine Etkisi**

İklim değişikliği ve arazi örtüsü/arazi kullanımı (LC/LU) değişikliklerinin yeraltı suyu beslenimi (recharge) üzerindeki birleşik etkilerini modellemek, sürdürülebilir yönetim için hayati öneme sahiptir. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile ML entegre edildiği hibrit yaklaşımlar, jeoloji, yağış ve çizgisellik gibi hidrojeolojik faktörleri ağırlıklandırarak geleceğe yönelik yüksek doğruluklu bölgesel beslenme potansiyeli haritaları oluşturmaktadır (Arthur ve diğerleri, 2025). Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile ML tekniklerini birleştiren hibrit yaklaşımlar, CMIP6 gibi iklim senaryoları altında yeraltı suyu beslenme potansiyelindeki bölgesel artış veya azalışları yüksek mekansal

çözünürlükle tespit etmek için kullanılmaktadır (Arthur ve diğerleri, 2025).

#### **2.4. Fiziksel Modeller ile Derin Öğrenme Hibrit Entegrasyonları**

Son yılların en yenilikçi adımlarından biri, fizik tabanlı kavramsal modellerin ML modelleriyle doğrudan birleştirilmesidir (Motawej, 2025). Geleceğin en vizyoner uygulama alanlarından biri, geleneksel ile modernin birleşimidir. MODFLOW veya HydroGeoSphere gibi geleneksel sayısal modellerden elde edilen veriler, CNN veya LSTM gibi yapay zekâ ağlarının zaman serisi analizi gücüyle entegre edilerek hibrit yapılar oluşturulmaktadır. Bu hibrit yapılar, fiziksel modelin mekanik yorumlanabilirliğini ML algoritmalarının yüksek hesaplama hızıyla birleştirerek hem uzamsal (mekansal) hem de zamansal (spatiotemporal) yeraltı suyu tahminlerinde olağanüstü bir verimlilik sunmaktadır (Kim ve diğerleri, 2024). Ayrıca sadece fiziksel modele veya AI'ya dayanan yöntemlere kıyasla tahmin hatalarını %20'ye kadar azaltmakta ve gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılmaktadır (Kim ve diğerleri, 2024; Motawej, 2025). GWL modellemesinde bazı hibrit AI modellerinin şematik yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 2. GWL modellemesinde bazı hibrit AI modellerinin şematik yapısı (Rajae ve diğerleri, 2019)**

Yeraltı suyu yönetiminde AI ve ML entegrasyonu yalnızca karmaşık hesaplamaları hızlandırmakla kalmamış; aynı zamanda karar alıcılara gerçek zamanlı izleme, veri entegrasyonu ve kirlilik önleme gibi hayati konularda çok güçlü bir karar destek sistemi sunarak yeraltı suyu yönetimi paradigmasını bütünüyle değiştirmiştir (Shaikh & Birajdar, 2024).

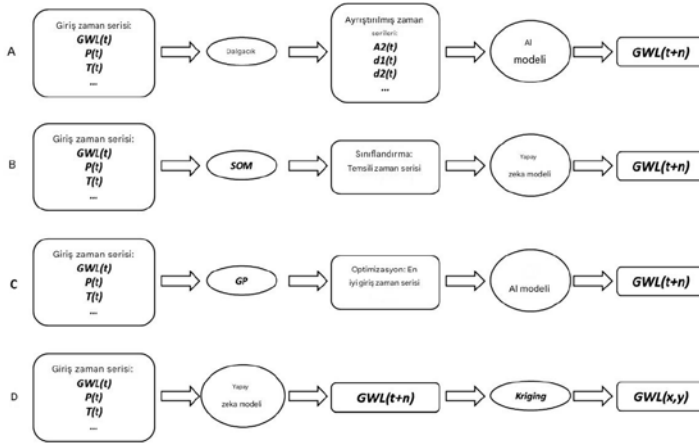
### **3. MODELLEME ÇERÇEVESİ: VERİ HAZIRLIĞI, GİRDİ SEÇİMİ VE OPTİMİZASYON SÜREÇLERİ**

Hidrojeolojide ML uygulamalarının başarısı, yalnızca seçilen algoritmanın gücüne değil, (i) aynı zamanda verilerin nasıl işlendiğine, (ii) modelin girdilerinin nasıl seçildiğine ve (iii)

sistemin nasıl optimize edildiğine bağlıdır. Veri odaklı modellerin geliştirilmesinde dört temel aşamanın kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Yeraltı suyu seviye tahmini için ML modelleme çerçevesi Şekil 3’de verilmiştir.

### 3.1. Veri Setinin Hazırlanması ve Bölünmesi (Data Splitting)

ML modellerinin güvenilirliği ve genelleme yeteneği, verilerin eğitim, doğrulama ve test alt setlerine doğru şekilde bölünmesi ile doğrudan ilişkilidir. Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğunda veri setlerinin genelde %70-%30 veya %80-%20 oranlarında eğitim ve test setlerine ayrıldığı görülmektedir (Ahmadi ve diğerleri, 2022; Jesse ve diğerleri, 2025; Kumar ve diğerleri, 2026). Eğitim verisi modelin öğrenmesi için, doğrulama verisi aşırı öğrenmeyi engellemek ve hiperparametreleri ayarlamak için, test verisi ise modelin sahadaki performansını ölçmek için kullanılır (Ahmadi vd., 2022; Kumar vd., 2026). Modelin küçük veya sınırlı verilerdeki genelleme yeteneğini artırmak için ise K-Katlı Çapraz Doğrulama (K-Fold Cross-Validation) teknikleri giderek daha fazla tercih edilmektedir (Mogaraju, 2023).



Şekil 3. GWL tahmini için ML modelleme çerçevesi (Boo ve diğerleri, 2024)

### 3.2. Girdi Değişkenlerinin Seçimi (Feature Selection)

Modelin yeraltı suyu dinamiklerini doğru öğrenebilmesi için hedef çıktı üzerinde en yüksek etkiye sahip olan girdilerin seçilmesi zorunludur. Yeraltı suyu tahminlerinde en sık kullanılan temel girdiler; geçmiş yeraltı suyu seviyeleri, yağış, sıcaklık ve buharlaşma (evapotranspirasyon) verileridir (Boo ve diğerleri, 2024; Rajae ve diğerleri, 2019). Girdi seçiminde kullanılan yaklaşımlar genellikle şu kategorilere ayrılır:

- **Filtre (Filter) Yöntemleri:** Veri setindeki doğrusal veya zamansal ilişkileri bulmak için Otokorelasyon (ACF), Kısmi Otokorelasyon (PACF), Çapraz Korelasyon ve Karşılıklı Bilgi (Mutual Information - MI) gibi istatistiksel analizler geleneksel olarak en yaygın kullanılan yöntemlerdir (Boo ve diğerleri, 2024).
- **Sarmalayıcı (Wrapper) ve Gömülü (Embedded) Yöntemler:** Yeraltı suyu sistemlerinin karmaşık yapısını daha iyi temsil edebilmek adına, güncel literatürde SHAP (SHapley Additive exPlanations), Özyineli Özellik Eleme (RFE) ve Karar Ağaçlarından elde edilen GINI öznitelik önemi gibi daha gelişmiş ML tabanlı girdi seçimi teknikleri ön plana çıkmaktadır (Jesse ve diğerleri, 2025).

### 3.3. Hiperparametre Optimizasyonu ve Algoritmalar

ML modellerinde gizli katman sayısı, öğrenme oranı (learning rate), iterasyon (epoch) ve düğüm sayısı gibi hiperparametrelerin ayarlanması tahmin performansını doğrudan etkiler.

- Eski çalışmalarda bu süreç çoğunlukla deneme-yanılma (trial-and-error) yoluyla gerçekleştirilmiştir ve hala popüler bir yaklaşımdır (Rajae ve diğerleri, 2019).
- Ancak günümüzde, Genetik Algoritmalar (GA), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Karınca Kolonisi

Optimizasyonu (ACO) gibi meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak çok daha verimli hibrit optimizasyon mimarileri kurulmaktadır (Azizpour ve diğerleri, 2021; Rajae vd., 2019).

- DL modellerinin eğitiminde ise Adam, RMSProp ve Stokastik Gradyan İnişi (SGD) gibi gelişmiş optimize ediciler ile ezberlemeyi önleyen "dropout" (seyreltme) teknikleri üstün performans sergilemektedir (Jesse vd., 2025; Kim vd., 2024; Kumar vd., 2026; Zhang vd., 2018).

### **3.4. Performans Değerlendirme Metrikleri**

Geliştirilen modellerin başarısını ölçmek ve farklı modelleri birbiriyle kıyaslamak için birden fazla performans metriği bir arada kullanılmalıdır.

- Tahmin (regresyon) odaklı seviye veya kalite problemlerinde Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Belirleme Katsayısı ( $R^2$ ) literatürde tartışmasız en çok tercih edilen metriklerdir (Boo vd., 2024; Zhang vd., 2018).
- Öte yandan, yeraltı suyu kirlilik riski haritalaması gibi sınıflandırma (classification) problemlerinde, ROC eğrisi (Receiver Operating Characteristic) ve eğri altında kalan alan (AUC) değerleri ile Doğruluk (Accuracy) ve Kesinlik (Precision) metrikleri, modelin sahadaki geçerliliğini ispatlamak için temel alınmaktadır (Ijlil vd., 2022).

## **4. ZORLUKLAR, SINIRLAMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ**

ML ve DL algoritmaları hidrojeolojik modellemede devrim yaratmış olsa da, bu veri odaklı yaklaşımların yaygınlaşmasının önünde hala aşılması gereken bazı teorik ve pratik zorluklar bulunmaktadır. Araştırmacıların güncel

çalışmaları, yeraltı suyu yönetiminde yapay zekânın geleceğinin aşağıdaki temel alanlarda şekilleneceğini göstermektedir:

#### **4.1. Veri Kalitesi, Kısıtlılığı ve Durağan Olmayan Veri Problemleri**

ML modellerinin en temel sınırlaması, doğrudan veri odaklı olmalarıdır; yani modelin doğruluğu, eğitildiği verinin kalitesine, mekânsal dağılımına ve uzunluğuna sıkı sıkıya bağlıdır (Ahmadi vd., 2022). Birçok havzada, hidro-klimatik ve yeraltı suyu verilerinin eksik veya kısa süreli olması, modelin genelleme yeteneğini kısıtlamaktadır (Jesse vd., 2025). Ayrıca, yeraltı suyu dalgalanmaları iklim değişikliği ve aşırı çekimler nedeniyle oldukça doğrusal olmayan ve durağan olmayan bir yapıya sahiptir. Gelecekteki araştırmaların, bu karmaşık zaman serilerini modellemeden önce ayrıştıran gelişmiş hibrit mimarilere daha fazla odaklanması beklenmektedir (Boo vd., 2024).

#### **4.2. "Kara Kutu" Problemi ve Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI)**

Geleneksel fiziksel modeller şeffaf mekanizmalara sahipken, Yapay Sinir Ağları (ANN) veya RF gibi algoritmalar genellikle iç işleyişi bilinmeyen birer "kara kutu" olarak eleştirilmektedir (Shaikh & Birajdar, 2024). Modelin bir tahmine nasıl ulaştığının bilinmemesi, karar alıcıların bu modellere güvenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, hidrojeoloji alanındaki en önemli gelecek eğilimlerinden biri açıklanabilir AI kavramıdır (Shaikh & Birajdar, 2024). Güncel araştırmalarda, SHAP (SHapley Additive exPlanations) gibi teknikler kullanılarak hangi hidrojeolojik model çıktısını ne yönde etkilediği yorumlanabilmekte ve ML modelleri şeffaf hale getirilmektedir (Jesse vd., 2025).

### **4.3. Fizik Bilgili Derin Öğrenme Modelleri**

Salt veriye dayalı modeller kütle ve enerji korunumu gibi temel fiziksel yasaları dikkate almazlar. Geleceğin en büyük araştırma potansiyeli, fiziksel kuralların ML algoritmalarına entegre edildiği "fizik bilgili" veya hibrit (PB-ML) modellerdir. Örneğin, HydroGeoSphere ve MODFLOW gibi sayısal ve fiziksel modellerin çıktıları, CNN veya LSTM gibi DL ağlarını eğitmek için kullanılmaktadır (Kim ve diğerleri, 2024). Bu sayede, fiziksel modellerin tutarlılığı ile DL modellerinin muazzam hesaplama hızı birleştirilmektedir (Kim ve diğerleri, 2024).

### **4.4. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)**

Yeraltı suyu parametrelerinin ML ile tahmininde bir diğer eksiklik, nokta tahmini üretilmesidir. Oysa hidrojeolojik sistemlerin doğası gereği modellerde bir belirsizlik payı vardır. Son yıllarda araştırmacılar, ML tahminlerinin güvenilirliğini artırmak için Monte Carlo simülasyonları ve güven aralıkları kullanarak modellerin belirsizlik sınırlarını (örneğin  $\pm\%95$  güven aralığı) nicel olarak hesaplamaya yönelmiştir (Azizpour vd., 2021; Kumar vd., 2026).

### **4.5. İleri Seviye Algoritmalar: Transformer ve GNN**

LSTM gibi zaman serisi modellerinin başarısı kanıtlanmış olsa da, yeraltı sularının mekansal-zamansal (spatiotemporal) dinamiklerini aynı anda çözmek için literatür hızla ilerlemektedir. Yakın gelecekte, doğal dil işlemede çığır açan Transformer mimarilerinin ve istasyonlar/kuyular arası mekansal ilişkileri analiz edebilen Çizge Sinir Ağlarının (Graph Neural Networks - GNN) hidrojeolojik tahminde yeni endüstri standartları olması beklenmektedir (Jesse vd., 2025).

## 5. SONUÇ

Geleneksel fiziksel ve istatistiksel yöntemlerden ML ve DL'ye geçiş, yeraltı suyu kaynaklarının yönetimi için eşi görülmemiş fırsatlar sunmaktadır. Seviye tahminlerinden kirlilik kırılmalık haritalarının çıkartılmasına kadar birçok alanda veri odaklı modeller; yüksek doğruluk, zaman tasarrufu ve karmaşık non-lineer ilişkileri çözme yeteneği sergilemektedir. Önümüzdeki on yılda, veri toplama teknolojilerindeki (ör. GRACE uyduları, IoT tabanlı sensörler) gelişmelerle birlikte, ML algoritmalarının fiziksel yasalara entegre şekilde çalışması, karar vericiler için "sürdürülebilir su yönetimi" politikasının temelini oluşturacaktır.

Yeraltı suyu yönetiminde geleneksel fiziksel ve istatistiksel yöntemlerden ML ve DL geçiş, hidrojeoloji alanına eşi görülmemiş fırsatlar ve vizyoner bir bakış açısı kazandırmıştır. Güçlü veri odaklı algoritmaların sahadaki tam potansiyeline ulaşabilmesi için aşılması gereken belirli eşikler bulunmaktadır. Literatür, salt veriye dayalı modellerin fiziksel yorumlanabilirlikten yoksun (kara kutu) olabileceğini ve bu durumun modellerin farklı saha ve havzalardaki genellenmenin sınırlayabileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, ML yeraltı suyu araştırmalarındaki vizyonu; fiziksel süreçlere dayalı kavramsal modeller ile veriye dayalı AI'nın işbirliği içinde çalışacağı bütünleşik/hibrit (physics-informed) çerçevelere dayanmaktadır. Bu tür melez yaklaşımlar, fiziksel mekanizmaların mekanistik yorumlana bilirliği ile veri odaklı algoritmaların işlem hızını ve doğruluğunu harmanlayarak tahmin belirsizliklerini en aza indirecektir.

Gelecekteki çalışmaların aşırı öğrenme ve veri sızıntısı gibi riskleri engellemek için veri setlerinin bölünmesi ve girdi değişkeni seçimi konularında standartlaştırılmış en iyi uygulamalara yönelmesi zorunludur. İleriye dönük olarak, uydu

verilerinin (ör. GRACE) ve gerçek zamanlı izleme teknolojilerinin gelişmiş ML algoritmalarıyla birleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum Birleşmiş Milletler'in "Temiz Su ve Sanitasyon" (SDG-6) gibi Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na ulaşılmasında ve dünya çapında iklim dirençli yeraltı suyu yönetim politikalarının oluşturulmasında kilit bir rol oynayacaktır.

## **KAYNAKÇA**

- Ahmadi, A., Olyaei, M., Heydari, Z., Emami, M., Zeynolabedin, A., Ghomlaghi, A., Daccache, A., Fogg, G. E., & Sadegh, M. (2022). Groundwater level modeling with machine learning: A systematic review and meta-analysis. *Water*, 14(6), 949. <https://doi.org/10.3390/w14060949>
- Azizpour, A., Izadbakhsh, M. A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Rajabi, A. (2021). Estimation of water level fluctuations in groundwater through a hybrid learning machine. *Groundwater for Sustainable Development*, 15, 100687. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100687>
- Arthur, E., Gyamfi, C., Anyemedu, F. O. K., & Anim-Gyampo, M. (2025). Hybrid AHP-machine learning modelling of groundwater recharge potential under land use and climate change in tropical Basins: Implications for sustainable water management. *Environmental and Sustainability Indicators*, 27, 100796. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100796>
- Boo, K. B. W., El-Shafie, A., Othman, F., Khan, M. M. H., Birima, A. H., & Ahmed, A. N. (2024). Groundwater level forecasting with machine learning models: A review. *Water Research*, 252, 121249. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121249>
- Ijlil, S., Essahlaoui, A., Mohajane, M., Essahlaoui, N., Mili, E. M., & Van Rompaey, A. (2022). Machine learning algorithms for modeling and mapping of groundwater pollution risk: A study to reach water security and sustainable development (Sdg) goals in a Mediterranean aquifer system. *Remote Sensing*, 14(10), 2379. <https://doi.org/10.3390/rs14102379>

- Jesse, G., Boateng, C. D., Aryee, J. N. A., Osei, M. A., Wemegah, D. D., Gidigasu, S. S. R., & Owusu-Afriyie, P. (2025). A systematic review of machine learning models for groundwater level prediction. *Applied Computing and Geosciences*, 28, 100303. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2025.100303>
- Kim, S., Lee, E., Hwang, H.-T., Pyo, J., Yun, D., Baek, S.-S., & Cho, K. H. (2024). Spatiotemporal estimation of groundwater and surface water conditions by integrating deep learning and physics-based watershed models. *Water Research* X, 23, 100228. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100228>
- Kumar, P., Singh, S. K., Subba Rao, N., & Srinivas, Y. (2026). Assessing the groundwater quality for drinking purposes using water quality index and machine learning techniques. *Environmental Earth Sciences*, 85, (96),1-29. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12793-1>
- Mogaraju, J. K. (2023). Application of machine learning algorithms in the investigation of groundwater quality parameters over YSR district, India. *Turkish Journal of Engineering*, 7(1), 64-72. <https://doi.org/10.31127/tuje.1032314>
- Motawej, H. (2025). Integrating MODFLOW and LSTM models for enhanced groundwater management in the coastal plains of Lattakia Governorate. *Water Practice & Technology*, 20(2), 413-424. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.016>
- Rajae, T., Ebrahimi, H., & Nourani, V. (2019). A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling. *Journal of Hydrology*, 572, 336-351. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.037>

- Ransom, K. M., Nolan, B. T., Stackelberg, P. E., Belitz, K., Fram, M. S., Reddy, J. E., Johnson, T., & Rodriguez, O. (2021). Data for Machine Learning Predictions of Nitrate in Groundwater Used for Drinking Supply in the Conterminous United States [Veri Seti]. *U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/10.5066/P9IPKWFL>
- Shaikh, M., & Birajdar, F. (2024). Artificial intelligence in groundwater management: Innovations, challenges, and future prospects. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(1), 502-512. <https://doi.org/10.30574/ijstra.2024.11.1.0105>
- Venkatesh, A. T., Rajkumar, S., & Masilamani, U. S. (2026). Assessment of groundwater quality using water quality index, multivariate statistical analysis and machine learning techniques in the vicinity of an open dumping yard. *Environment, Development and Sustainability*, 28, 5397-5422. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05209-w>
- Vu, T. T., Nguyen, A. H., Pham, N. T. T., Tat, V. M. H., & Luu, L. K. (2025). Application of Machine Learning Models to Predict Groundwater Level Change, a Case Study of Vung Tau City, Ba Ria-Vung Tau Province. *International Journal of Environmental Science and Development*, 16(3), 202-213 <https://doi.org/10.18178/ijesd.2025.16.3.1527>
- Zhang, J., Zhu, Y., Zhang, X., Ye, M., & Yang, J. (2018). Developing a Long Short-Term Memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas. *Journal of Hydrology*, 561, 918-929. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.065>

# NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ VE JEOLOJİK OLUŞUMLARI

Hüseyin SENDİR<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca ekonomik gelişme ile doğal kaynakların kullanımı arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur. Taş Devri, Tunç Çağı ve Demir Çağı gibi dönemler, belirli hammaddelerin toplumsal gelişim üzerindeki belirleyici etkisini göstermektedir. Günümüzde ise bilgi teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemleri, yapay zekâ uygulamaları ve savunma sanayii gibi alanlarda yaşanan hızlı gelişmeler, bazı hammaddeleri stratejik açıdan diğerlerinden daha önemli hale getirmiştir. Bu hammaddeler arasında yer alan nadir toprak elementleri, 21. yüzyılın en kritik doğal kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020) (Akademik Araştırma Enstitüsü, 2026).

Nadir toprak elementleri (NTE), periyodik tabloda atom numaraları 57 ile 71 arasında değişen lantanitler ile skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) elementlerinden oluşmaktadır. Her ne kadar "nadir" olarak adlandırılınsalar da bu elementler yer kabuğunda bakır, kurşun ve kalay gibi birçok metalden daha yüksek bollukta bulunabilmektedir. Ancak ekonomik açıdan işletilebilir yataklar oluşturacak şekilde yoğunlaşmaları oldukça sınırlıdır. Bu nedenle ekonomik üretim yapılabilen NTE yatakları dünya genelinde belirli bölgelerde yoğunlaşmıştır (Kanazawa ve Kamitani, 2006) (Şekil 1).

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü. ORCID: 0000-0001-7252-7117.

H <sup>1</sup>	AGIR NADIR TOPRAK ELEMENTLER																He <sup>2</sup>						
Li <sup>3</sup>	Be <sup>4</sup>	HAFIF NADIR TOPRAK ELEMENTLER																Ne <sup>10</sup>					
Na <sup>11</sup>	Mg <sup>12</sup>																	Al <sup>13</sup>	Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup>	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>	Ar <sup>18</sup>
K <sup>19</sup>	Ca <sup>20</sup>	Sc <sup>21</sup>	Ti <sup>22</sup>	V <sup>23</sup>	Cr <sup>24</sup>	Mn <sup>25</sup>	Fe <sup>26</sup>	Co <sup>27</sup>	Ni <sup>28</sup>	Cu <sup>29</sup>	Zn <sup>30</sup>	Ga <sup>31</sup>	Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>	Kr <sup>36</sup>						
Rb <sup>37</sup>	Sr <sup>38</sup>	Y <sup>39</sup>	Zr <sup>40</sup>	Nb <sup>41</sup>	Mo <sup>42</sup>	Tc <sup>43</sup>	Ru <sup>44</sup>	Rh <sup>45</sup>	Pd <sup>46</sup>	Ag <sup>47</sup>	Cd <sup>48</sup>	In <sup>49</sup>	Sn <sup>50</sup>	Sb <sup>51</sup>	Te <sup>52</sup>	I <sup>53</sup>	Xe <sup>54</sup>						
Cs <sup>55</sup>	Ba <sup>56</sup>	La-Lu	Hf <sup>72</sup>	Ta <sup>73</sup>	W <sup>74</sup>	Re <sup>75</sup>	Os <sup>76</sup>	Ir <sup>77</sup>	Pt <sup>78</sup>	Au <sup>79</sup>	Hg <sup>80</sup>	Tl <sup>81</sup>	Pb <sup>82</sup>	Bi <sup>83</sup>	Po <sup>84</sup>	At <sup>85</sup>	Rn <sup>86</sup>						
Fr <sup>87</sup>	Ra <sup>88</sup>	Ac-Lr	Rf <sup>104</sup>	Db <sup>105</sup>	Sg <sup>106</sup>	Bh <sup>107</sup>	Hs <sup>108</sup>	Mt <sup>109</sup>															
NADIR TOPRAK ELEMENTLER																							
*Lantanid Serisi		La <sup>57</sup>	Ce <sup>58</sup>	Pr <sup>59</sup>	Nd <sup>60</sup>	Pm <sup>61</sup>	Sm <sup>62</sup>	Eu <sup>63</sup>	Gd <sup>64</sup>	Tb <sup>65</sup>	Dy <sup>66</sup>	Ho <sup>67</sup>	Er <sup>68</sup>	Tm <sup>69</sup>	Yb <sup>70</sup>	Lu <sup>71</sup>							
**Aktinid Serisi		Ac <sup>89</sup>	Th <sup>90</sup>	Pa <sup>91</sup>	U <sup>92</sup>	Np <sup>93</sup>	Pu <sup>94</sup>	Am <sup>95</sup>	Cm <sup>96</sup>	Bk <sup>97</sup>	Cf <sup>98</sup>	Es <sup>99</sup>	Fm <sup>100</sup>	Md <sup>101</sup>	No <sup>102</sup>	Lr <sup>103</sup>							

**Şekil 1. Nadir Toprak Elementleri <https://diyot.net/nadir-elementler/>**

NTE'lerin önemi, sahip oldukları benzersiz manyetik, optik, elektriksel ve katalitik özelliklerden kaynaklanmaktadır. Özellikle neodimyum (Nd), praseodimyum (Pr), disprosyum (Dy) ve terbiyum (Tb) gibi elementler yüksek performanslı kalıcı mıknatısların üretiminde kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar elektrikli araç motorlarının, rüzgâr türbinlerinin, robotik sistemlerin ve gelişmiş savunma teknolojilerinin temel bileşenleridir. Benzer şekilde europiyum (Eu), terbiyum (Tb) ve itriyum (Y) ekran teknolojilerinde; gadolinyum (Gd) ise tıbbi görüntüleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Milli İstihbarat Akademisi, 2025).

NTE'lerin stratejik önemi yalnızca ekonomik ve teknolojik kullanım alanlarından kaynaklanmamaktadır. Savunma sanayisinde kullanılan hassas güdüm sistemleri, radarlar, sonarlar, lazerler ve gelişmiş iletişim sistemleri de büyük ölçüde NTE'lere bağımlıdır. Bu nedenle NTE kaynaklarına erişim, günümüzde enerji güvenliği kadar önemli bir ulusal güvenlik konusu haline gelmiştir. Nitekim birçok ülke NTE'leri kritik mineraller listesine dahil etmiş ve bu kaynakların güvenli tedarikini sağlamak amacıyla uzun vadeli stratejiler geliştirmiştir (Gündoğdu, 2022).

Türkiye, son yıllarda yapılan jeolojik araştırmalar sonucunda NTE potansiyeli bakımından dikkat çeken ülkeler arasında yer almaya başlamıştır. Özellikle Eskişehir-Beylikova (Kızılcaören) sahasında belirlenen büyük ölçekli kaynak, Türkiye'nin kritik mineraller alanındaki konumunu güçlendirmiştir. Bunun yanında Malatya-Kuluncak, Bolkaradağı, Keban ve Divriği gibi bölgelerde belirlenen cevherleşmeler de ülkenin NTE potansiyelini ortaya koymaktadır. Eti Maden tarafından yürütülen çalışmalar, Türkiye'nin yalnızca cevher üretiminde değil, aynı zamanda zenginleştirme ve ayrıştırma teknolojilerinde de önemli ilerlemeler kaydedebileceğini göstermektedir (Milli İstihbarat Akademisi, 2025).

## **2. NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN SINIFLANDIRILMASI VE JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ**

Nadir toprak elementleri (NTE), periyodik tabloda atom numaraları 57 ile 71 arasında bulunan lantanit serisi elementleri ile skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) elementlerinden oluşan toplam 17 elementi kapsamaktadır. Her ne kadar "nadir" olarak adlandırılınsalar da bu elementler yer kabuğunda mutlak anlamda nadir değildir. Örneğin seryum (Ce), bakırdan daha yüksek bolluğa sahipken, tulyum (Tm) ve lutesyum (Lu) gibi bazı elementler altın ile benzer bolluk değerleri göstermektedir. Ancak ekonomik olarak işletilebilir konsantrasyonlarda bir araya gelmeleri nadir olduğundan bu isim kullanılmaktadır (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

NTE'lerin ortak özelliği, dış elektron dizilimlerinin benzer olması nedeniyle birbirlerine oldukça yakın kimyasal davranışlar göstermeleridir. Bu durum doğada genellikle aynı mineraller içerisinde birlikte bulunmalarına neden olur. Ancak benzer kimyasal özellikleri aynı zamanda bu elementlerin

birbirlerinden ayrılmasını zorlaştırmakta ve üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle NTE madenciliğinde en büyük teknolojik zorluklardan biri cevherden elementlerin seçici olarak ayrıştırılmasıdır (Tunç, 2025).

NTE'ler genellikle atom numaralarına ve jeokimyasal davranışlarına göre iki ana gruba ayrılmaktadır:

**Hafif Nadir Toprak Elementleri (LREE):** Lantan (La), Seryum (Ce), Praseodimyum (Pr), Neodimyum (Nd), Prometyum (Pm), Samaryum (Sm), Europyum (Eu).

**Ağır Nadir Toprak Elementleri (HREE):** Gadolinyum (Gd), Terbiyum (Tb), Disprosyum (Dy), Holmiyum (Ho), Erbiyum (Er), Tulyum (Tm), İterbiyum (Yb), Lütesyum (Lu), İtriyum (Y). Skandiyum ise çoğu sınıflandırmada ayrı değerlendirilmektedir.

Ağır NTE'ler genellikle daha yüksek ekonomik değere sahiptir. Bunun temel nedeni, ağır NTE içeren yatakların daha az bulunması ve özellikle yüksek performanslı mıknatıs teknolojilerinde disprosyum (Dy) ve terbiyum (Tb) gibi elementlerin kritik öneme sahip olmasıdır. Çin'in güneyindeki iyon adsorpsiyon tipi killer, ağır NTE üretiminin en önemli kaynakları arasında yer almaktadır (Öztürk ve diğ., 2019).

NTE'lerin büyük bölümü doğada +3 değerlikli iyonlar halinde bulunur. Bu durum onların benzer jeokimyasal özellikler göstermesine neden olmaktadır. NTE'ler genel olarak:

- Büyük iyon yarıçapına sahiptir.
- Düşük yük yoğunluğu gösterir.
- Litofil karakterlidir.
- Oksijen ve flor ile güçlü bağlar oluşturur.

Bu özellikler nedeniyle karbonatlar, fosfatlar, silikatlar ve florür mineralleri içerisinde yoğunlaşırlar. Jeokimyasal

açından NTE'ler genellikle aşağıdaki süreçlerde zenginleşmektedir:

**Magmatik Süreçler:** Alkalen magmalar ve karbonatit magmaları, NTE bakımından zenginleşmeye en uygun sistemlerdir.

**Hidrotermal Süreçler:** NTE içeren sıcak akışkanlar fay ve kırık sistemleri boyunca taşınarak cevherleşme oluşturabilir.

**Ayrışma Süreçleri:** Tropikal iklim koşullarında gelişen ayrışma süreçleri sonucunda iyon adsorpsiyon tipi killer oluşabilir.

**Sedimanter Süreçler:** Plaser ve ağır mineral birikimleri önemli ikincil NTE kaynaklarını oluşturabilir. Bu süreçlerin kombinasyonu sonucunda ekonomik NTE yatakları meydana gelmektedir (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 2020).

### 3. ÖNEMLİ NADİR TOPRAK MİNERALLERİ

Bugüne kadar yaklaşık 200'den fazla NTE minerali tanımlanmış olmakla birlikte ekonomik üretimin büyük bölümü birkaç mineralden gerçekleştirilmektedir (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

**Bastnazit [(Ce,La)(CO<sub>3</sub>)F]:** Dünya üretiminin önemli kısmını oluşturmaktadır. Başlıca sahalara:

- Bayan Obo (Çin)
- Mountain Pass (ABD)

**Monazit [(Ce,La,Nd,Th)PO<sub>4</sub>]:** Toryum içermesi nedeniyle çevresel açıdan dikkat gerektirmektedir. Başlıca kaynaklar:

- Hindistan
- Brezilya
- Avustralya

**Ksenotim (YPO<sub>4</sub>):** Ağır NTE'lerin en önemli kaynaklarından biridir (Tablo 1).

Her NTE aynı ekonomik değere sahip değildir. Günümüzde aşağıdaki elementler kritik kabul edilmektedir:

**Neodimyum (Nd):** Elektrikli araç motorları ve rüzgâr türbinlerinde kullanılan NdFeB mıknatıslarının temel bileşenidir.

**Praseodimyum (Pr):** Nd ile yüksek performanslı mıknatıs üretiminde kullanılır.

**Disprosyum (Dy):** Yüksek sıcaklıklarda çalışan mıknatısların performansını artırır.

**Terbiyum (Tb):** Savunma ve elektronik uygulamalarda kritik öneme sahiptir.

**Samaryum (Sm):** Sm-Co mıknatıslarının üretiminde kullanılmaktadır.

**İtriyum (Y):** Lazerler, seramikler ve optik sistemlerde kullanılmaktadır.

Bu elementlerin stratejik değeri yalnızca piyasa fiyatlarıyla değil, aynı zamanda tedarik riskleriyle de ilişkilidir. Özellikle Dy ve Tb gibi ağır NTE'lerin arzı büyük ölçüde Çin kaynaklarına bağlıdır. Bu nedenle küresel kritik mineral politikalarının merkezinde yer almaktadırlar (İMMİB, 2024).

**Tablo 1. Başlıca NTE Mineralleri Kanazawa ve Kamitani (2006); Demir vd. (2026).**

Mineral	Başlıca Elementler	Önemi
Bastnazit	Ce, La, Nd	Dünya üretiminin büyük bölümü
Monazit	Ce, La, Nd, Th	Önemli rezerv kaynağı
Ksenotim	Y, HREE	Ağır NTE kaynağı
Eudialit	HREE	Gelecek vadeden kaynak
İyon Adsorpsiyon Killeri	Dy, Tb, Y	Kritik ağır NTE kaynağı

#### **4. NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN JEOLOJİK OLUŞUM ORTAMLARI**

Nadir toprak elementlerinin (NTE) ekonomik açıdan işletilebilir konsantrasyonlara ulaşabilmesi, belirli jeolojik süreçlerin uzun zaman ölçeklerinde etkili olmasıyla mümkün olmaktadır. Yerkabuğunda yaygın olarak bulunan NTE'ler çoğu kayada düşük konsantrasyonlarda dağılmış halde bulunur. Ekonomik yatak oluşumu ise magmatik farklılaşma, hidrotermal süreçler, ayrışma, sedimantasyon ve metamorfizma gibi karmaşık jeolojik mekanizmaların sonucunda gerçekleşmektedir. Günümüzde ekonomik öneme sahip NTE yatakları temel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır:

1. Birincil (primer) yataklar
2. İkincil (sekonder) yataklar

Birincil yataklar doğrudan magmatik veya hidrotermal süreçlerle oluşurken, ikincil yataklar ayrışma, taşınma ve yeniden çökelme süreçleri sonucunda meydana gelmektedir (Çimen ve Dönmez, 2026).

##### **4.1. Karbonatitlerle İlişkili NTE Yatakları**

Karbonatitler, hacimce %50'den fazla karbonat minerali içeren magmatik kayalar olarak tanımlanmaktadır. Dünya üzerindeki en önemli NTE yataklarının büyük bölümü karbonatitlerle ilişkilidir.

Karbonatit magmaları;

- Düşük viskozitelidir,
- Yüksek miktarda CO<sub>2</sub> içerir,
- NTE bakımından zenginleşmeye eğilimlidir.

Bu özellikler NTE'lerin magmanın son evrelerinde yoğunlaşmasına neden olmaktadır (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

Başlıca karbonatit yatakları Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2. Başlıca karbonatit yatakları (Kanazawa ve Kamitani, 2006).**

Yatak	Ülke
Bayan Obo	Çin
Mountain Pass	ABD
Mount Weld	Avustralya
Araxá	Brezilya
Kızılcaören	Türkiye

Karbonatit yataklarında en yaygın ekonomik mineraller: Bastnazit, Monazit, Parisit, Sinkizit olarak bilinmektedir.

Dünya NTE üretiminin önemli bölümü karbonatit kaynaklı cevherlerden sağlanmaktadır (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

#### **4.2. Alkalen Magmatik Kayaçlarla İlişkili Yataklar**

Alkalen magmatik kayaçlar düşük silika içeriği ve yüksek alkali element (Na ve K) konsantrasyonları ile karakterizedir. Bu sistemler; Nefelin siyenitler, Peralkalen granitler, Alkalen kompleksler şeklinde görülebilmektedir.

Alkalen magmaların gelişimi sırasında NTE'ler magmanın geç evrelerinde yoğunlaşarak ekonomik cevherleşmeler oluşturabilmektedir.

##### **Başlıca Örnekler**

- Strange Lake (Kanada)
- Lovozero (Rusya)
- Ilímaussaq (Grönland)
- Kvanefjeld (Grönland)

Bu yataklar özellikle ağır nadir toprak elementleri (HREE) bakımından önem taşımaktadır.

Çin dışındaki geleceğin NTE kaynaklarının önemli kısmının alkalin sistemlerden sağlanacağı düşünülmektedir (Demir vd., 2026).

### **4.3. İyon Adsorpsiyon Tipi Kil Yatakları**

İyon adsorpsiyon tipi killer günümüzde ağır NTE üretiminin en önemli kaynaklarını oluşturmaktadır.

Bu yataklar ilk olarak Çin'in güneyinde tanımlanmıştır.

Oluşum Süreci

1. NTE bakımından zengin granitik kayalar ayrışır.
2. Tropikal iklim koşullarında yoğun kimyasal ayrışma gerçekleşir.
3. NTE iyonları kil minerallerinin yüzeylerine adsorbe olur.
4. Ekonomik konsantrasyonlar gelişir.

Bu yatakların en önemli avantajları:

- Açık işletmeye uygun olmaları
- Düşük tenörlü cevherlerin ekonomik işletilebilmesi
- Ağır NTE bakımından zengin olmalarıdır.

Kritik Elementler; Disprosyum (Dy), Terbiyum (Tb), İttriyum (Y) gibi yüksek değerli elementler bu yataklardan elde edilmektedir.

Çin'in küresel ağır NTE hakimiyetinin temel nedeni bu yatak tipidir (Demir vd., 2026).

### **4.4. Plaser Yatakları**

Plaser yatakları, dayanıklı ağır minerallerin akarsu, göl veya kıyı ortamlarında yoğunlaşması sonucu oluşmaktadır.

NTE taşıyan başlıca plaser mineralleri; Monazit, Ksenotim, Zirkon ve İlmenit olarak bilinmektedir.

Bu yataklar özellikle monazit üretimi açısından önem taşımaktadır. Monazitin toryum içermesi çevresel açıdan dikkatli yönetim gerektirmektedir.

Lateritler tropikal ve subtropikal iklim koşullarında gelişen yoğun ayrışma ürünleridir.

Bu sistemlerde; Demir, Alüminyum, NTE gibi elementler artık zonlarda zenginleşebilmektedir.

Lateritik yatakların gelişimi için:

- Yüksek yağış
- Yüksek sıcaklık
- Uzun süreli tektonik duraylılık gerekmektedir.

Son yıllarda lateritik nikel yataklarının NTE potansiyeli de araştırılmaktadır.

Bu yataklar gelecekte ikincil NTE kaynağı olarak önem kazanabilir (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

Önemli plaser yatakları Tablo 3' de gösterilmiştir.

**Tablo 3. Önemli plaser yatakları (Kanazawa ve Kamitani, 2006).**

Ülke	Önemli Sahalar
Avustralya	Doğu kıyı plaserleri
Hindistan	Kerala kıyıları
Brezilya	Kıyısal plaserler
Malezya	Kalay plaserleri

#### **4.5. Lateritik Yataklar**

Lateritler tropikal ve subtropikal iklim koşullarında gelişen yoğun ayrışma ürünleridir.

Bu sistemlerde; Demir, Alüminyum NTE gibi elementler artık zonlarda zenginleşebilmektedir.

Lateritik yatakların gelişimi için; Yüksek yağış, yüksek sıcaklık ve uzun süreli tektonik duraylılık gerekmektedir.

Son yıllarda lateritik nikel yataklarının NTE potansiyeli de araştırılmaktadır.

Bu yataklar gelecekte ikincil NTE kaynağı olarak önem kazanabilir (Kanazawa ve Kamitani, 2006).

#### **4.6. Fosforitlerle İlişkili Yataklar**

Fosforitler dünya genelinde önemli NTE rezervleri içermektedir. Fosfat mineralleri; La, Ce, Nd gibi hafif NTE'leri bünyelerinde tutabilmektedir. Özellikle Fas, ABD ve Çin önemli fosforit rezervlerine sahiptir.

Türkiye'deki Mazıdağı fosfatları üzerinde yapılan çalışmalar ise ekonomik NTE konsantrasyonlarının sınırlı olduğunu göstermiştir (Öztürk vd., 2019).

#### **4.7. IOCG (Demir Oksit-Bakır-Altın) Yatakları**

Demir Oksit Bakır Altın (IOCG) yatakları bazı durumlarda önemli miktarda NTE içerebilmektedir.

En önemli örnek: Olympic Dam (Avustralya) yatağıdır. Bu yatakta, Demir, Bakır, Altın, Uranyum ve NTE birlikte bulunmaktadır.

IOCG sistemleri henüz birincil NTE kaynağı olmasa da gelecekte yan ürün üretimi açısından önemli görülmektedir.

### **5. SONUÇLAR**

Nadir toprak elementleri (NTE), sahip oldukları üstün manyetik, optik ve elektronik özellikler nedeniyle günümüzün yüksek teknoloji, yenilenebilir enerji ve savunma sanayii

uygulamalarında kritik öneme sahip stratejik hammaddelerdir. Elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri, elektronik cihazlar ve gelişmiş savunma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaları, bu elementlere olan talebi her geçen gün artırmaktadır.

NTE yatakları karbonatitler, alkalen magmatik kayalar, iyon adsorpsiyon tipi killeri, plaser yatakları ve fosforitler gibi farklı jeolojik ortamlarda oluşmaktadır. Özellikle karbonatit ve alkalen sistemler günümüzde ekonomik açıdan en önemli NTE kaynaklarını oluştururken, ağır nadir toprak elementleri bakımından iyon adsorpsiyon tipi kil yatakları öne çıkmaktadır.

Küresel ölçekte NTE üretimi ve işlenmesi büyük ölçüde Çin'in kontrolünde bulunmakta olup bu durum NTE'leri ekonomik olduğu kadar jeopolitik açıdan da önemli hale getirmektedir. Türkiye ise özellikle Eskişehir-Beylikova (Kızılcaören) sahasında belirlenen önemli rezervleri sayesinde bu alanda dikkat çeken ülkeler arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, nadir toprak elementleri geleceğin enerji ve teknoloji sistemlerinin temel bileşenleri arasında yer almakta olup, bu kaynakların araştırılması, sürdürülebilir şekilde değerlendirilmesi ve katma değerli teknolojilere dönüştürülmesi ülkelerin ekonomik ve stratejik rekabet gücü açısından büyük önem taşımaktadır.

## **KAYNAKÇA**

- Akademik Araştırma Enstitüsü (2026). Kritik Mineraller ve Nadir Toprak Elementleri Raporu. Ankara.
- Çimen, M., & Dönmez, A. (2026). Nadir Toprak Elementlerinin Jeolojik Oluşum Mekanizmaları ve Yatak Tipleri. *Jeoloji Araştırmaları Dergisi*, 12(2), 45–68.
- Demir, H., Kaya, S., & Yılmaz, E. (2026). Dünya Nadir Toprak Elementi Yatakları ve Gelecekteki Arz Potansiyeli. *Maden Bilimleri Dergisi*, 18(1), 23–41.
- Gündoğdu, M. (2022). Kritik Mineraller ve Küresel Rekabet: Nadir Toprak Elementleri. Ankara: SETA Yayınları.
- <https://diyot.net/nadir-elementler/>.
- İMMİB (2024). Kritik Mineraller ve Nadir Toprak Elementleri Sektör Raporu. İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri, İstanbul.
- Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare Earth Minerals and Resources in the World. *Journal of Alloys and Compounds*, 408–412, 1339–1343.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) (2020). Türkiye Kritik Mineraller ve Nadir Toprak Elementleri Potansiyeli Raporu. Ankara.
- Milli İstihbarat Akademisi (2025). Kritik Mineraller ve Nadir Toprak Elementleri: Jeopolitik ve Stratejik Değerlendirme Raporu. Ankara.
- Öztürk, H., Hanılçı, N., Altuncu, S., & Kasapçı, C. (2019). Türkiye’de Nadir Toprak Elementleri Yatakları ve Potansiyelleri. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 27, 15–34.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2020). 2023 Sanayi ve Teknoloji Stratejisi Kapsamında Kritik Hammaddeler ve Nadir Toprak Elementleri. Ankara.

Tunç, M. (2025). Nadir Toprak Elementlerinin Ayrıştırma Teknolojileri ve Endüstriyel Uygulamaları. Madencilik ve Teknoloji Dergisi, 7(3), 55–72.

**YER BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA  
AKADEMİK TARTIŞMALAR**

**yaz**  
yayınları

YAZ Yayınları  
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar / AFYONKARAHİSAR  
Tel : (0 531) 880 92 99  
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com