

# TÜRKİYE JEOLojİ BÜLTENİ

*Geological Bulletin of Turkey*

Nisan 2026 Cilt 69 Sayı 2

*April 2026 Volume 69 Issue 2*

ISSN 1016-9164



**TMMOB JEOLojİ MÜHENDİSLERİ ODASI**  
*Chamber of Geological Engineers of Turkey*

TMMOB  
JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI  
Chamber of Geological Engineers of Turkey

**YÖNETİM KURULU / EXECUTIVE BOARD**

Hüseyin ALAN	Başkan / President
Seçkin GÜLBUDAK	İkinci Başkan / Vice President
D. Malik BAKIR	Yazman / Secretary
Düzcün EŞİNA	Sayman / Treasurer
Özgür DEĞİRMENCI	Mesleki Uygulamalar Üyesi / Member of Professional Activities
Zeynel Abidin GÖK	Sosyal İlişkiler Üyesi / Member of Social Affairs
Burcu GÖRBİL	Yayın Üyesi / Member of Publication

**TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ**

**Geological Bulletin of Turkey**

**Yayın Kurulu / Publication Board**

**Baş Editör / Editor in Chief**

Erdoğan YİĞİTBAŞ  
eyigitbas@comu.edu.tr

**Editörler / Editors**

Mustafa AVCIOĞLU  
m\_avcioglu@comu.edu.tr

İsmail Onur TUNÇ  
onurtunc@comu.edu.tr

**İngilizce Editörleri / English Editors**

Catherine YİĞİT

Sercan Hamza BAĞLAMA

**Editör Kurulu / Editorial Board**

AKSOY Ercan (Elazığ, Türkiye)	OKAY, Nilgün (İstanbul, Türkiye)
ALDANMAZ Ercan (Kocaeli, Türkiye)	ÖZDEN Süha (Çanakkale, Türkiye)
AYDOĞAN Mustafa Selman (Balıkesir, Türkiye)	ÖZKUL Mehmet (Denizli, Türkiye)
BABA Alper (İzmir, Türkiye)	ÖZSAYIN, Erman (Ankara, Türkiye)
BOULTON, Sarah J. (Plymouth, Birleşik Krallık)	PARLAK Osman (Adana, Türkiye)
BOZKURT Erdin (Ankara, Türkiye)	ROJAY Bora (Ankara, Türkiye)
ÇEMEN, İBRAHİM (Alabama, ABD)	SEYİTOĞLU Gürol (Ankara, Türkiye)
EKİNCİ, Yunus Levent (Bitlis, Türkiye)	SÖZBİLİR Hasan (İzmir, Türkiye)
ERGİNAL, Ahmet Evren (Çanakkale, Türkiye)	TAGLIASACCHI Ezher (Denizli, Türkiye)
EYÜBOĞLU Yener (Trabzon, Türkiye)	TATAR, Orhan (Sivas, Türkiye)
GÜRSOY Halil (Sivas, Türkiye)	ÜNLÜGENÇ Ulvi Can (Adana, Türkiye)
HELVACI Cahit (İzmir, Türkiye)	YALÇIN Hüseyin (Sivas, Türkiye)
KAYSERİ-ÖZER Mine Sezgül (İzmir, Türkiye)	YALÇIN Gürhan (Antalya, Türkiye)
KAZANCI Nizamettin (Ankara, Türkiye)	YILMAZ İsmail Ömer (Ankara, Türkiye)
MÜLAYİM, Okan (Ankara, Türkiye)	ZABÇI, Cengiz, (İstanbul, Türkiye)
NAZİK Atike (Adana, Türkiye)	ZAGORCHEV Ivan (Sofya, Bulgaristan)

**Yazışma Adresi**

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası  
PK. 464 Yenişehir, 06410 Ankara  
Tel: (0312) 434 36 01  
Faks: (0312) 434 23 88  
E-Posta: tjb@jmo.org.tr  
URL: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb>

**Corresponding Address**

UCTEA Chamber of Geological Engineers of Turkey  
PO Box 464 Yenişehir, TR-06410 Ankara  
Phone: +90 312 434 36 01  
Fax: +90 312 434 23 88  
E-Mail: [tjb@jmo.org.tr](mailto:tjb@jmo.org.tr)  
URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tjb>

Yayın Türü	: Yaygın Süreli Yayın
Yayın Şekli / Frequency	: Yılda 3 sayı (Türkçe -İngilizce) / 3 issues per year (Turkish - English)
Yayın Sahibi	: TMMOB JMO Adına Hüseyin ALAN
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü	: Hüseyin ALAN
Yayın İdari Adresi	: Hatay 2 Sokak No: 21 Kocatepe / Ankara Tel: 0 312 432 30 85 Faks: 0 312 434 23 88
Baskı (Printed by)	: ERS Matbaacılık Kazım Karabekir Cad. Altıntop İşhanı No: 87/7 İskitler / Ankara Tel: 0 312 384 54 88
Baskı Tarihi	: Nisan 2026
Baskı Adedi	: 500

# TÜRKİYE JEOLJİ BÜLTENİ

## Geological Bulletin of Turkey

Nisan 2026 Cilt 69 Sayı 2  
April 2026 Volume 69 Issue 2

### İÇİNDEKİLER CONTENTS

- Oğuz Mülayim**  
**Yapay Zeka Destekli Araştırmalarda, Tahminin Yorumlamayı Gölgede Bıraktığı Durumlar: Jeolojide Veri Odaklı Yanılsama**  
*When Accuracy Misleads Geological Interpretation: A Data-Driven Illusion*..... 169
- Semih Eski, Mehmet Akbulut**  
**Remote Sensing of Listvenite Hydrothermal Alteration in Vezirler Mélange, Kula (Western Türkiye): Landsat-7 ETM+, Crosta-PCA and Band-Ratio Mapping**  
*Kula (Batı Türkiye) Vezirler Karmaşığındaki Listvenitik Hidrotermal Alterasyonunun Uzaktan Algılanması: Landsat-7 ETM+, Crosta-PCA ve Bant-Oranı Haritalaması* ..... 183
- Alp Ünal**  
**Güney Shetland Yayı (Batı Antarktika) Boyunca Çok Seviyeli Mafik Magma Yerleşimine Karşılaştırmalı Bir Örnek: Dee ve Cecilia İntrüzyonları**  
*A Comparative Example of Multi-Level Mafic Magma Emplacement Along The South Shetland Arc (West Antarctica): The Dee and Cecilia Intrusions* .....203
- Okay Çimen, Cahit Dönmez**  
**Nadir Toprak Elementlerinin Jeolojik Oluşum Ortamları: Dünya ve Türkiye'den Örnekler**  
*Geological Formation Environments of Rare Earth Elements: Examples from Around the World and Türkiye ...* 225
- Bülent Özmen, Bahattin Murat Demir**  
**Türkiye'nin İlk Resmi Deprem Bölgeleri Haritası: 1945 Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası**  
*Türkiye's First Official Seismic Hazard Map: 1945 Seismic Hazard Map*.....257
- Yaşar Ergun Gökten**  
**Re-Assessment of Seismic Risk Associated with the Furthest East of the Düzce-Kaynaşlı Segment of the North Anatolian Fault (Türkiye) Utilising Data Derived From 12 November 1999 Earthquake in the Bolu Basin (NW Anatolia)**  
*Kuzey Anadolu Fayı Düzce-Kaynaşlı Segmentinin Doğusunda Sismik Riskin Yeniden Değerlendirilmesi; 12 Kasım 1999 Depreminde Bolu Havzasında (KB Anadolu) Gözlenen Etkiler*.....273

#### Türkiye Jeoloji Bülteni makale dizin ve özleri:

Emerging Sources Citation Index (ESCI), Georef, Geotitles, Geoscience Documentation, Geo Archive, Geo Abstracts, Mineralogical Abstracts, EBSCO, SOBIAD ve ULAKBİM TR Dizin Veri Tabanlarında yer almaktadır.

#### Geological Bulletin of Turkey is indexed and abstracted in:

Emerging Sources Citation Index (ESCI), Georef, Geotitles, Geoscience Documentation, Geo Archive, Geo Abstracts, Mineralogical Abstracts, EBSCO, SOBIAD and ULAKBİM TR Dizin Databases.

**TÜRKİYE JEOLJİ MÜHENDİSLERİ ODASI**  
**Chamber of Geological Engineers of Turkey**





**Yapay Zeka Destekli Araştırmalarda, Tahminin Yorumlamayı Gölgede Bıraktığı Durumlar: Jeolojide Veri Odaklı Yanılsama**  
*When Accuracy Misleads Geological Interpretation: A Data-Driven Illusion*

**Oğuz Mülayim<sup>1,2\*</sup>** 

<sup>1</sup> *Türkiye Petrolleri A.O. Adıyaman Bölge Müdürlüğü, 02040, Adıyaman, Türkiye*

<sup>2</sup> *Türkiye Jeoloji Bülteni Editör Kurulu Üyesi/Member of the Geological Bulletin of Turkey Editorial Board*

• Geliş/Received: 16.02.2026

• Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 30.03.2026

• Kabul/Accepted: 31.03.2026

• Çevrimiçi Yayın/Available online: 14.04.2026

• Baskı/Printed: 30.04.2026

*Editorial/Editorial*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Son yıllarda yapay zeka (YZ) modelleri; deprem erken uyarı sistemlerinden heyelan duyarlılık haritalarına, yeraltı kaynaklarının modellenmesinden stratigrafik sınıflandırmaya kadar yer bilimlerinin hemen her alanında rutin olarak kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemleri tahmin doğruluğu açısından geride bırakan bu modeller, gözlem ile çıkarım arasında giderek daha fazla arabuluculuk rolü üstlenmektedir. Ancak bu teknik başarı, kritik bir soruyu gündeme getirmektedir: Yüksek tahmin doğruluğu, gerçek jeolojik anlayışı yansıtmakta mıdır? Bu yazı, veri odaklı modellerin artan tahmin kapasitesinin, yerbilimlerinin yorumlayıcı doğasını ve gerçek jeolojik koşulların ortaya konulmasını gölgeleme riskine dikkat çekmektedir. Gözlemlerin seyrek, belirsizliğin yapısal nitelikte ve doğruluğu kanıtlanmış bilginin sınırlı olduğu alanlarda —örneğin yeraltı yorumlaması ve afet değerlendirmesi— modeller, fiziksel süreç temelli olarak ilgisiz proksiler (vekil değişkenler) aracılığıyla görünürde yüksek sınıflandırma doğruluğuna ulaşabilmektedir. Bu durum, değişen çevresel veya tektonik koşullar altında modellerin taşınabilirliğini ve jeolojik tutarlılığını zayıflatmaktadır. Tahmine dayalı modellemeyi reddetmeksizin, bu perspektif çalışma, yeni bir algoritma önermekten ziyade yol gösterici bir yapı niteliğindeki kavramsal ve yarı-biçimsel bir “asistan” çerçevesi sunmayı amaçlamaktadır. Bu çerçeve, jeolojik kısıtlamaları, yorumlanabilir modellemeyi ve model sonrası jeolojik doğrulamayı bütünleştirerek tahmin performansının jeolojik akıl yürütmenin önüne geçmesini engellemeyi hedeflemektedir.

**Abstract:** In recent years, artificial intelligence (AI) models have become routine in geoscience applications ranging from earthquake early warning systems to landslide susceptibility mapping, subsurface resource modeling, and stratigraphic classification. Outperforming traditional methods for predictive accuracy, these models increasingly mediate between observation and inference. However, this technical success raises a critical question: does high predictive accuracy reflect true geological understanding? This paper draws attention to the risk that the growing predictive capacity of data-driven models may overshadow the interpretive nature of geoscience and the elucidation of actual geological conditions. In domains where observations are sparse, uncertainty is structural, and ground truth is limited—such as subsurface interpretation and hazard assessment—models can achieve seemingly high classification accuracy by relying on mechanistically irrelevant proxies. This undermines model transferability and geological consistency under changing environmental or tectonic conditions. Without rejecting predictive modeling, this perspective aims to propose a conceptual and semi-formalized “assistant” framework— not introducing a new algorithm but rather a guiding structure—that integrates geological constraints, interpretable modeling, and post-hoc geological validation to ensure that predictive performance does not override geological reasoning.

\* Yazışma / Correspondence: omulayim@tpao.gov.tr

**Anahtar Kelimeler:** Açıklanabilir yapay zeka, fizik bilgili makine öğrenmesi, jeolojik yorum, tahmin modelleri, yapay zeka.

**Keywords:** *Artificial intelligence, explainable AI, geological interpretation, physics-informed machine learning, predictive models.*

Yapay zeka (YZ), yerbilimleri araştırmalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiş ve son yıllarda keşif amaçlı analizlerden karar verme süreçlerinin kritik olduğu durumlardaki operasyonel kullanıma doğru hızla ilerlemektedir. YZ odaklı modeller artık afet değerlendirme, erken uyarı sistemleri ve yeraltı kaynaklarına ilişkin karar alma süreçlerine giderek daha fazla entegre edilmekte; bu modellerin çıktıları politikaları, mühendislik uygulamalarını ve risk yönetimini doğrudan şekillendirmektedir. Bu değişim, giderek büyüyen, heterojen ve karmaşık veri kümelerinin analizini mümkün kılmıştır. Deprem erken uyarı sistemlerinden heyelan duyarlılık haritalamasına, stratigrafik sınıflandırmadan iklim verilerinin yeniden yapılandırılmasına kadar, makine öğrenmesi modelleri artık rutin olarak geleneksel yöntemleri tahmin performansı kıyaslamalarında geride bırakmaktadır (Lary vd. 2016; Reichstein vd. 2019; Rolnick vd. 2019; Bergen vd. 2019).

Bu dönüşüm yalnızca küresel ölçekte değil, Türkiye’de de hız kazanmıştır. Özellikle deprem tehlikesinin yüksek olduğu ülkelerde erken uyarı ve sismik veri işleme sistemlerinde YZ temelli yaklaşımlar yaygınlaşmaktadır. Benzer şekilde heyelan duyarlılık haritalaması, maden arama ve hidrokarbon potansiyeli değerlendirmelerinde makine öğrenmesi yöntemleri hem akademik hem de kurumsal uygulamalarda kullanılmaktadır. MTA, AFAD ve TPAO gibi kurumların yürüttüğü veri yoğun projelerde algoritmik modelleme yaklaşımlarının artan rolü, bu tartışmayı Türkiye bağlamında da güncel kılmaktadır. Bu nedenle, tahmin doğruluğu ile jeolojik yorum arasındaki ilişkinin sağlıklı kurulması kritik öneme sahiptir. Bu gereklilik yalnızca bilimsel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal sonuçlar doğurmaktadır.

*Artificial intelligence (AI) has become an integral part of geoscience research and has rapidly advanced in recent years, moving from exploratory analysis to operational use in contexts where decision-making is critical. AI-driven models are now increasingly integrated into disaster assessment, early warning systems, and decision-making processes related to subsurface resources; the outputs of these models directly shape policies, engineering practices, and risk management. This shift has enabled the analysis of ever-growing, heterogeneous, and complex datasets. From earthquake early warning systems to landslide susceptibility mapping, and from stratigraphic classification to the reconstruction of climate data, machine learning models now routinely outperform traditional methods for predictive performance benchmarks (Lary et al. 2016; Reichstein et al. 2019; Rolnick et al. 2019; Bergen et al. 2019).*

*This transformation has gained momentum not only globally but also in Turkey. AI-based approaches are becoming widespread in early warning and seismic data processing systems, particularly in countries with high earthquake risk. Similarly, machine learning methods are used in both academic and institutional practice for landslide susceptibility mapping, mineral exploration, and hydrocarbon potential assessment. The increasing role of algorithmic modeling approaches in data-intensive projects carried out by institutions such as MTA, AFAD, and TPAO makes this discussion highly relevant in the Turkish context. Therefore, establishing a sound relationship between predictive accuracy and geological interpretation has critical importance. This necessity carries not only scientific but also economic and societal consequences.*

Ancak bu tahmin başarısının daha temel bir soruyu gölgeleme riski taşıdığı ileri sürülebilir. Gelişmiş tahmin yeteneği, gelişmiş jeolojik anlayışla karıştırılıyor mu? Bu ikilem yeni değildir. Yerbilimleri, devasa mekansal ve zamansal ölçeklere yayılan Dünya süreçlerini yeniden yapılandırmak için her zaman eksik kayıtlara, dolaylı kanıtlara ve uzman görüşüne dayanmıştır. Yeni olan, algoritmik sistemlerin gözlem ile çıkarım arasındaki arabuluculuk rolünü üstlendiği hız, ölçek ve bu süreçlerin şeffaf olmayışıdır. YZ bu arabuluculuk rolünü giderek daha fazla üstlendikçe, yerbilimlerinde nedensellik, anlam ve açıklama üzerine uzun süredir var olan bilginin doğasına ilişkin sorular hafiflemek yerine daha da keskinleşmiştir.

Günümüzde yerbilimlerindeki birçok YZ uygulaması, birincil başarı göstergesi olarak tahmin performansını önceliklendirmektedir. Modeller genellikle doğruluk metrikleri, çapraz doğrulama skorları veya sınıflandırma oranları kullanılarak değerlendirilmekte; tahminlerin nasıl üretildiği veya jeolojik olarak makul olup olmadığı çoğunlukla sorgulanmamaktadır. Oysa yüksek tahmin performansı, mutlaka jeolojik anlayış üstünlüğü anlamına gelmez (Breiman, 2001; Karpatne vd. 2017). Gözlemlerin seyrek olduğu, belirsizliğin istatistiksel olmaktan ziyade yapısal olduğu ve doğruluğu kanıtlanmış bilgiye genellikle erişilemeyen yeraltı yorumlaması veya afet değerlendirmesi gibi alanlarda bu ayırım özellikle önem arz eder.

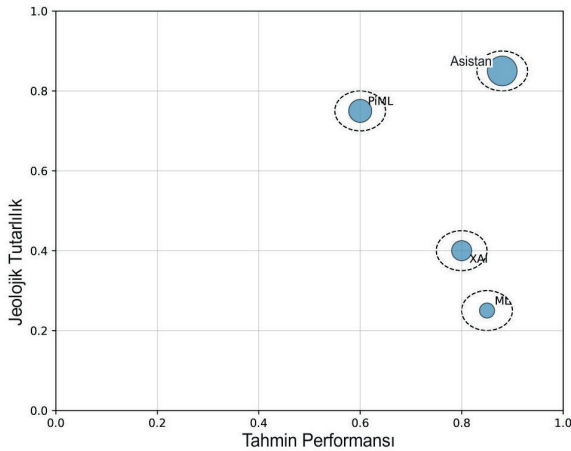
İç işleyişi, kullandığı veri kaynakları ve dayandığı varsayımlar yeterince şeffaf olmayan modellere olan artan bağımlılık, yerbilimlerini yorumlayıcı bir bilim dalı olmaktan çıkarıp, nedenselliğin yeterince sorgulanmadığı, korelasyonların kabul edildiği bir veri işleme faaliyetine dönüştürme riski taşımaktadır. Bu sorun, son yıllarda açıklanabilir yapay zeka (XAI) ve fizik bilgisine dayalı makine öğrenimi (PIML) gibi yaklaşımların geliştirilmesiyle daha görünür hale gelmiştir. XAI, özellikle yüksek riskli

*It can be argued that this predictive success risks overshadowing a more fundamental question: Is advanced predictive capability being conflated with enhanced geological understanding? This dilemma is not new. The geosciences have always relied on incomplete records, indirect evidence, and expert opinion to reconstruct Earth processes that span vast spatial and temporal scales. What is new is the speed, scale, and opacity with which algorithmic systems now assume the role of mediating between observation and inference. As AI increasingly undertakes this mediating role, long-standing questions about the nature of knowledge in the geosciences—concerning causality, meaning, and explanation—have become sharper rather than diminished.*

*Today, many AI applications in the geosciences prioritize predictive performance as the primary indicator of success. Models are often evaluated using accuracy metrics, cross-validation scores, or classification rates, while questions about how predictions are generated or whether they are geologically plausible frequently remain unanswered. However, high predictive performance does not necessarily imply superior geological understanding (Breiman, 2001; Karpatne et al., 2017). This distinction is particularly important in fields such as subsurface interpretation or disaster assessment, where observations are sparse, uncertainty is structural rather than merely statistical, and ground truth is often inaccessible.*

*The increasing reliance on models whose internal workings, data sources, and underlying assumptions are not sufficiently transparent risks transforming the geosciences from an interpretive science into a data-processing activity where correlations are accepted without adequate scrutiny of causality. This issue has become more visible in recent years with the development of approaches such as explainable AI (XAI) and physics-informed machine learning (PIML). While XAI aims to enhance model transparency*

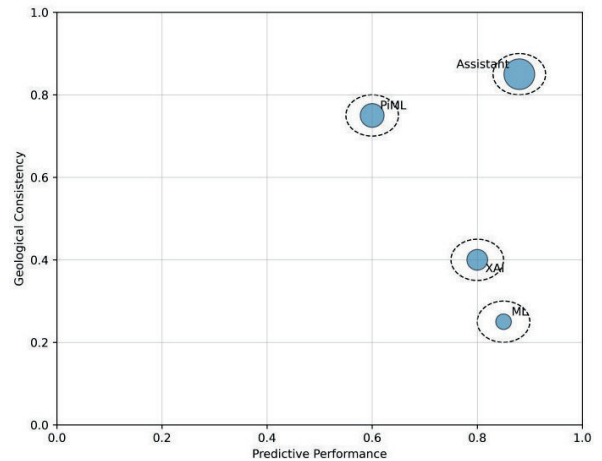
kararların alındığı alanlarda model şeffaflığını ve yorumlanabilirliğini artırmayı hedeflerken (Rudin, 2019; Molnar, 2019; Molnar, 2022), PIML ise fizik yasalarını veya alana özgü teorik bilgiyi doğrudan öğrenme sürecine dâhil ederek yalnızca korelasyonel değil, nedensel olarak anlamlı modeller geliştirilmesine olanak tanır (Karpatne vd. 2017; Raissi vd. 2019). Bu yaklaşımlar, YZ'nın yer bilimlerinde salt bir tahmin aracı olmanın ötesine geçmesi için önemli metodolojik alternatifler sunmaktadır. Farklı YZ yaklaşımlarının şeffaflık, jeolojik tutarlılık ve tahmin performansı açısından konumlanışı Şekil 1 ve Çizelge 1'de özetlenmiştir.



**Şekil 1.** Yer bilimlerinde farklı yapay zeka yaklaşımlarının tahmin performansı ve jeolojik tutarlılık boyutlarındaki kavramsal konumlandırılması. Balon boyutu model şeffaflığını temsil ederken, kesikli elipsler kavramsal belirsizlik aralıklarını gösterir. Göreceli konumlar sezgiseldir ve nicel kıyaslama sonuçlarını temsil etmez.

Bununla birlikte, bu yaklaşımların da bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. XAI yöntemleri çoğunlukla model sonrası (post-hoc) açıklamalar sunmakta olup, bu açıklamaların her zaman gerçek nedensel ilişkileri yansıtmayabileceği tartışılmaktadır. Benzer şekilde, PIML yaklaşımları fiziksel tutarlılığı artırma potansiyeline sahip olmakla birlikte, model karmaşıklığını artırabilir

and interpretability, especially in high-stakes decision-making domains (Rudin, 2019; Molnar, 2022), PIML enables the development of models that are not merely correlational but causally meaningful by incorporating physical laws or domain-specific theoretical knowledge directly into the learning process (Karpatne et al., 2017; Raissi et al., 2019). These approaches offer important methodological alternatives for AI to move beyond being a mere prediction tool in the geosciences. The positioning of different AI approaches in terms of transparency, geological consistency, and predictive performance is summarized in Figure 1 and Table 1.



**Figure 1.** Conceptual positioning of different AI approaches in the geosciences in terms of prediction performance and geological consistency. Balloon size represents model transparency, while dashed ellipses indicate ranges of conceptual uncertainty. Relative positions are intuitive and do not represent quantitative comparison results.

However, these approaches also have certain limitations. XAI methods often provide post-hoc explanations, and it has been debated as to whether these explanations always reflect true causal relationships. Similarly, while PIML approaches have the potential to enhance physical consistency, they may increase model complexity and may not be easily applicable for

ve yüksek kaliteli veri ile iyi tanımlanmış fiziksel denklemlere olan bağımlılığı nedeniyle her uygulama için kolayca uygulanamayabilir. Bu sınırlılıklar, farklı yaklaşımların tamamlayıcı biçimde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

**Çizelge 1.** Farklı yapay zekâ yaklaşımlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi.

Yaklaşım	Şeffaflık	Jeolojik tutarlılık	Performans	Risk
ML	düşük	düşük	yüksek	yüksek
XAI	orta	düşük-orta	yüksek	orta
PIML	orta	yüksek	orta	düşük
Asistan	yüksek	yüksek	yüksek (potansiyel)	düşük-orta

Son çalışmalar, geniş jeomorfolojik ve çevresel ipuçları temelinde geliştirilen modellerin, heyelan duyarlılık haritalamasında yüksek sınıflandırma doğruluğuna ulaşırken, eğim-süreç eşikleri veya malzeme sürekliliği gibi temel jeolojik kısıtlamaları ihmal edebildiğini göstermiştir. Örneğin, bir heyelan duyarlılık modelinde eğim yerine yalnızca yükselti değişkeninin güçlü bir belirleyici olarak model tarafından istatistiksel bir korelasyon şeklinde keşfedildiği bir durumda, model tarihsel veri seti üzerinde yüksek doğruluk gösterebilir. Ancak bu ilişki, jeolojik süreçler açısından nedensel değildir ve farklı topoğrafik koşullara sahip bir bölgede model başarısız olacaktır. Benzer şekilde, stratigrafik sınıflandırmada modelin litolojik birimleri doğru tahmin etmesine rağmen, bu birimlerin stratigrafik sıralamayı ihlal edecek şekilde konumlandırılması, yüksek doğruluğa rağmen düşük jeolojik tutarlılığa işaret eder. Bu tür durumlar, tahmin performansının tek başına yeterli bir değerlendirme ölçütü olmadığını açıkça

every application due to their reliance on high-quality data and well-defined physical equations. These limitations necessitate the complementary evaluation of different approaches.

**Table 1.** Comparative evaluation of different artificial intelligence approaches.

Approach	Transparency	Geological consistency	Performance	Risk
ML	low	low	high	high
XAI	medium	low-medium	high	medium
PIML	medium	high	medium	low
Assistant	high	high	high (potential)	low-medium

Recent studies show that models developed on the basis of broad geomorphological and environmental cues can achieve high classification accuracy in landslide susceptibility mapping, while neglecting fundamental geological constraints such as slope-process thresholds or material continuity. For example, consider a landslide susceptibility model where, instead of slope, only the elevation variable is discovered to be a strong predictor in the form of a statistical correlation by the model. The model may have high accuracy for the historical dataset. However, this relationship is not causal in terms of geological processes, and the model will fail in a region with different topographic conditions. Similarly, in stratigraphic classification, even if the model correctly predicts lithological units, the placement of these units in a way that violates stratigraphic ordering indicates low geological consistency despite high accuracy. Such cases clearly demonstrate that predictive performance alone is not a sufficient evaluation criterion. For instance, in a study by Karpatne et al. (2017), a machine learning model trained

ortaya koymaktadır. Örneğin, Karpatne vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, yalnızca geçmiş heyelan envanteri ile eğitilen bir makine öğrenmesi modeli, fiziksel süreç temelli olarak ilgisiz ancak geçmişte heyelanlarla ilişkili proksilere (örneğin belirli bir yükselti aralığı) dayanarak yüksek doğruluk göstermiş; ancak değişen iklim koşullarında bu korelasyonlar geçersiz hale geldiğinde modelin tahmin başarısı ciddi ölçüde düşmüştür. Benzer şekilde, Rudin (2019), yüksek doğruluklu “açıklanamayan karmaşık modellerin” (black-box) adli veri analizinde yanıltıcı sonuçlar üretebildiğini, oysa yorumlanabilir modellerin daha güvenilir olduğunu vurgulamıştır.

Stratigrafik sınıflandırma alanında da benzer sorunlar gözlenmektedir. Derin öğrenme modelleri, litolojik birimleri yüksek doğrulukla ayırt edebilmekte; ancak süperpozisyon ilkesi veya bilinen yapısal ilişkiler model çıktılarıyla çeliştiğinde, bu çelişki yalnızca performans metriği üzerinden değil, jeolojik tutarlılık açısından da değerlendirilmelidir (Bergen vd. 2019). Bu tür örnekler, model geliştirme sürecinde jeolojik ön bilgilerin dışlanması durumunda, tahmin başarısının jeolojik anlayışı temsil etmekten uzaklaşabileceğini açıkça göstermektedir.

Bu durumu daha somutlaştırmak için yarı gerçekçi bir örnek düşünülebilir. Bir heyelan duyarlılık modelinin sayısal yükseklik modeli (DEM), yağış verisi ve litolojik haritalar kullanılarak eğitildiği varsayalım. Model, eğitim ve doğrulama veri setlerinde %90'ın üzerinde doğruluk (örneğin %92) elde edebilir. Ancak model girdileri arasında eğim açısının (slope) yer almaması durumunda, modelin yüksek doğruluğu jeolojik süreçleri temsil etmekten ziyade, tarihsel veri setinde heyelanlarla korelasyon gösteren ancak fiziksel süreç temelli olarak ikincil olan değişkenlere dayanabilir. Bu durumda model, farklı topoğrafik özelliklere sahip bir bölgede uygulandığında başarısız olacaktır. Çünkü temel süreç kontrolü olan eğim parametresi modele dahil edilmemiştir. Bu tür örnekler, yüksek tahmin doğruluğunun jeolojik anlamlılıkla her zaman

*solely on a past landslide inventory achieved high accuracy based on proxies that were physically unrelated but historically associated with landslides (e.g., a specific elevation range). However, when these correlations became invalid under changing climatic conditions, the model's predictive performance dropped significantly. Similarly, Rudin (2019) emphasized that high-accuracy “black-box” models can produce misleading results in forensic data analysis, whereas interpretable models are more reliable.*

*Similar problems are observed in the field of stratigraphic classification. Deep learning models can distinguish lithological units with high accuracy; but when the principle of superposition or known structural relationships contradict the model outputs, this contradiction should be evaluated not only in terms of performance metrics but also in terms of geological consistency (Bergen et al. 2019). Such examples clearly show that when prior geological knowledge is excluded from the model development process, predictive success may cease to represent geological understanding*

*To make this situation more concrete, consider a semi-realistic example. Suppose a landslide susceptibility model is trained using a digital elevation model (DEM), rainfall data, and lithological maps. The model might achieve over 90% accuracy (e.g., 92%) on the training and validation datasets. However, if slope angle is not included among the model inputs, the model's high accuracy may rely not on representing geological processes but on variables that correlate with landslides in the historical dataset but are secondary from a physical process perspective. In this case, the model will fail when applied to a region with different topographic characteristics, because the slope parameter—the fundamental process control—was not included in the model. Such examples clearly demonstrate that high predictive accuracy does not always coincide with geological meaningfulness.*

örtüşmediğini açıkça göstermektedir.

Özerk bir karar alıcı olarak konumlandırmak yerine, YZ'nin veri ile jeolojik akıl yürütme arasında yorumlayıcı bir araç olarak sınırlandırılmalıdır ve bu rol kavramsal olarak "asistan/yardımcı" olarak değerlendirilmelidir. Bu çerçeveye, üç metodolojik ilkeye dayanmaktadır.

### Önerilen "Asistan/Yardımcı" Çerçevesi

Bu çalışma kapsamında önerilen "asistan/yardımcı" yaklaşımı yalnızca kavramsal bir çerçeve değil, aynı zamanda yarı-formal bir modelleme iş akışı (workflow) olarak tanımlanabilir:

#### Aşama 1 – Girdi:

- Gözlemsel veri (jeofizik, jeokimyas, uzaktan algılama vb.)
- Temel jeolojik kısıtlar (stratigrafik ilişkiler, fiziksel eşikler, yapısal süreklilik)

#### Aşama 2 – Modelleme:

- Makine öğrenmesi / derin öğrenme modelleri
- Gerekğinde fizik bilgili yaklaşımlar (PIML)

#### Aşama 3 – Çıktıların Dönüştürülmesi:

- XAI teknikleri (ör. SHAP, LIME)
- Model çıktılarının jeolojik kavramlara (fasiyes, süreç, deformasyon vb.) çevrilmesi

#### Aşama 4 – Doğrulama:

- Klasik performans metrikleri (accuracy, F1, ROC vb.)
- Jeolojik tutarlılık testleri

#### Aşama 5 – Geri Besleme:

- Jeolojik olarak tutarsız sonuçların modele geri beslenmesi
- Modelin yeniden eğitilmesi / kısıtların güncellenmesi

*Instead of positioning AI as an autonomous decision-maker, AI should be constrained as an interpretive tool between data and geological reasoning, and this role should be conceptually considered as that of an "assistant." This framework is based on three methodological principles.*

### Proposed "Assistant" Framework

*The "assistant" approach proposed within the scope of this study can be defined not only as a conceptual framework but also as a semi-formal modeling workflow:*

#### Stage 1 – Input:

- *Observational data (geophysical, geochemical, remote sensing, etc.)*
- *Basic geological constraints (stratigraphic relationships, physical thresholds, structural continuity)*

#### Stage 2 – Modeling:

- *Machine learning/deep learning models*
- *Physics-informed approaches (PIML) where necessary*

#### Stage 3 – Transformation of Outputs:

- *XAI techniques (e.g., SHAP, LIME)*
- *Translation of model outputs into geological concepts (facies, process, deformation, etc.)*

#### Stage 4 – Validation:

- *Classical performance metrics (accuracy, F1, ROC, etc.)*
- *Geological consistency tests*

#### Stage 5 – Feedback:

- *Feeding geologically inconsistent results back into the model*
- *Retraining the model/updating constraints*

Bu yapı, YZ'yi özerk bir karar verici olmaktan çıkararak, veri ile jeolojik akıl yürütme arasında insan faktörünün dahil olduğu (human-in-the-loop) bir yorumlayıcı sistem olarak konumlandırır. Bu ilkeler ve aralarındaki ilişkiler Şekil 2'de akış şeması olarak gösterilmiştir. Şekil 1'de ise önerilen yaklaşımın diğer YZ paradigmalarıyla karşılaştırması sunulmaktadır. Çizelge 1'de, geleneksel makine öğrenmesi (ML), açıklanabilir yapay zekâ (XAI), fizik bilgili makine öğrenmesi (PIML) ve önerilen “asistan/yardımcı” çerçevesi; şeffaflık, jeolojik tutarlılık, tahmin performansı ve risk açısından nitel (kalitatif) olarak karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmada PIML'in jeolojik tutarlılığı, modelleme sürecine doğrudan gömülü fizik kısıtlarından (örneğin diferansiyel denklemler, korunum yasaları) kaynaklanırken; önerilen “asistan/yardımcı” çerçevesi jeolojik tutarlılığı hem PIML benzeri fizik kısıtlarını hem de model çıktılarının insan faktörünün dahil olduğu (human-in-the-loop) ile sonradan doğrulanmasını birleştirerek sağlamaktadır. Bu nedenle her iki yaklaşım da jeolojik tutarlılık açısından “yüksek” olarak değerlendirilmiş, ancak asistan çerçevesi ek bir doğrulama mekanizması sunmaktadır. Değerlendirme, her bir yaklaşımın jeolojik yorumlama süreçlerine katkısı ve potansiyel sınırlılıkları dikkate alınarak kavramsal bir çerçevede sunulmuştur.

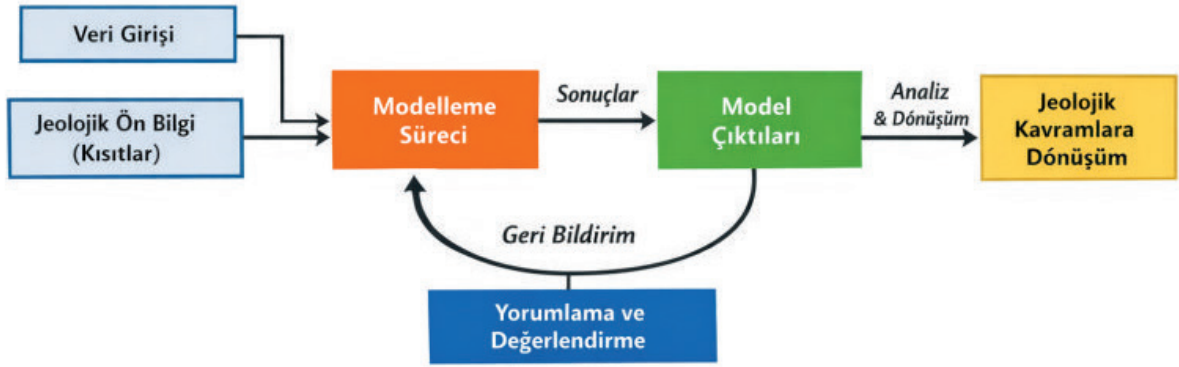
*Jeolojik önbilginin modellenmesi:* Model girdilerine stratigrafik süreklilik, süreç eşikleri (örneğin eğim açısı, malzeme dayanımı) veya yapısal ilişkiler gibi yerleşik jeolojik kavramların temel jeolojik kısıt olarak eklenmesi. Bu, PIML yaklaşımlarıyla doğrudan ilişkilidir (Karpatne vd. 2017; Raissi vd. 2019). Bu süreç adımları Şekil 1'de görselleştirilmiştir.

*Jeolojik olarak makul olmayan yüksek doğrulukların tespiti:* Modelin yüksek performansına rağmen, tahminlerin dayandığı korelasyonların jeolojik olarak anlamlandırılmadığı durumların sistematik biçimde işaretlenmesi ve bu tür modellerin karar destek süreçlerinde kullanılmadan önce yeniden değerlendirilmesi.

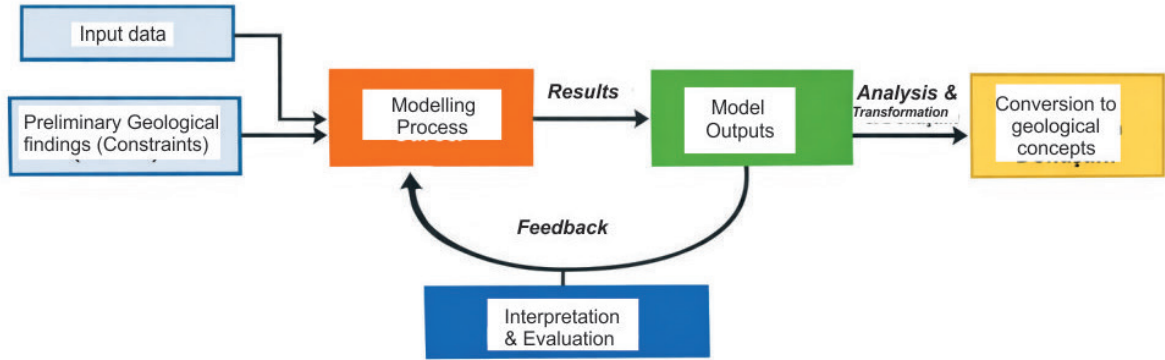
*This structure positions AI not as an autonomous decision-maker but as an interpretive system with humans-in-the-loop between data and geological reasoning. These principles and their relationships are shown as a flowchart in Figure 2. Figure 1 presents a comparison of the proposed approach with other AI paradigms. Table 1 provides a qualitative comparison of traditional machine learning (ML), explainable AI (XAI), physics-informed machine learning (PIML), and the proposed “assistant” framework in terms of transparency, geological consistency, predictive performance, and risk. In this comparison, while PIML’s geological consistency arises from physical constraints (e.g., differential equations, conservation laws) embedded directly into the modeling process, the proposed “assistant” framework achieves geological consistency by combining both PIML-like physical constraints and post-hoc validation with human-in-the-loop. Therefore, both approaches are rated as “high” in terms of geological consistency, but the assistant framework offers an additional validation mechanism. The evaluation is presented within a conceptual framework, considering each approach’s contribution to geological interpretation processes and its potential limitations.*

*Modeling of prior geological knowledge: Adding inherent geological concepts such as stratigraphic continuity, process thresholds (e.g., slope angle, material strength), or structural relationships as basic geological constraints to model inputs. This is directly related to PIML approaches (Karpatne et al., 2017; Raissi et al., 2019). These process steps are visualized in Figure 2.*

*Translation of model outputs into geological concepts: Reporting and interpreting predictions not merely as class labels or numerical values, but together with their geological meaning (e.g., facies relationships, deformation evolution, production potential). This stage can be supported*



**Şekil 2.** “Asistan/Yardımcı” çerçevesinin kavramsal iş akışı. Bu şemada veri girişi, jeolojik ön bilgi (kısıtlar), modelleme süreci, model çıktılarının jeolojik kavramlara dönüştürülmesi, yorumlama aşaması ve geri bildirim döngüsü arasındaki ilişkiler insan faktörünün dahil olduğu (human-in-the-loop) yaklaşımı kapsamında gösterilmektedir.



**Figure 2.** Conceptual workflow for the “Assistant” framework. In this diagram, the relationships between data input, geological prior knowledge (constraints), the modeling process, the conversion of model outputs into geological concepts, the interpretation phase, and the feedback loop are depicted within the context of a human-in-the-loop approach.

Bu çalışmada “jeolojik tutarlılık”, yalnızca nitel bir kavram olarak ele alınmamakta, aynı zamanda çeşitli ölçütler üzerinden yarı nicel biçimde değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, öncelikle stratigrafik uyum dikkate alınarak süperpozisyon ilkesi ve bilinen stratigrafik sıralamaların ihlal edilip edilmediği kontrol edilmektedir. Ayrıca fiziksel eşiklerin korunumu değerlendirilmekte; eğitim açısı, kaya dayanımı ve akışkan basıncı gibi süreç temelli parametrelerin fiziksel sınırlarının aşılıp aşılmadığı incelenmektedir. Bunun yanı sıra uzaysal süreklilik ölçütü ile litolojik birimlerin ve yapısal özelliklerin jeolojik olarak beklenen

by XAI techniques (e.g., SHAP, LIME) (Lundberg & Lee, 2017; Ribeiro et al., 2016).

Detection of geologically implausible high accuracy: Systematically flagging cases where, despite a model’s high performance, the correlations underlying the predictions cannot be geologically interpreted, and re-evaluating these models before using them in decision-support processes.

In this study, “geological consistency” is not treated merely as a qualitative concept but is also evaluated in a semi-quantitative manner

mekânsal devamlılığı gösterip göstermediği analiz edilmektedir. Son olarak, model çıktıları alan uzmanlar tarafından yarı nicel ölçekler kullanılarak (örneğin 1–5 arası tutarlılık puanı) değerlendirilmektedir. Bu çok boyutlu yaklaşım, yüksek tahmin doğruluğuna sahip olsa dahi jeolojik açıdan anlamlı olmayan modellerin tespit edilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu değerlendirmeyi daha sistematik hale getirmek amacıyla, jeolojik tutarlılık yarı nicel bir skor ile ifade edilebilir. Bu kapsamda, jeolojik tutarlılık üç temel bileşen üzerinden tanımlanabilir: (i) stratigrafik uyum ( $S_1$ ), (ii) fiziksel eşiklerin korunumu ( $S_2$ ) ve (iii) uzaysal süreklilik ( $S_3$ ). Her bir bileşen 0 ile 1 arasında normalize edilerek değerlendirilir. Buna göre basit bir Jeolojik Tutarlılık Skoru (JTS) aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$JTS = (S_1 + S_2 + S_3) / 3$$

Bu tür bir yaklaşım, model performansının yalnızca doğruluk metrikleri ile değil, aynı zamanda jeolojik anlamlılık açısından da değerlendirilmesine olanak tanır. Amaç kesin bir ölçüm üretmekten ziyade, jeolojik muhakemenin model değerlendirme sürecine sistematik olarak dahil edilmesini sağlamaktır.

Bu çerçeve yalnızca terminolojik bir öneri değil, aynı zamanda uygulamaya dönük bir metodolojik yönlendirmedir. Örneğin, heyelan duyarlılık haritalamasında geliştirilen bir makine öğrenmesi modeli, geçmiş heyelan envanteri ile eğitildiğinde yüksek doğruluk elde edebilir; ancak model, fiziksel olarak anlamlı eğitim-süreç eşiklerini dikkate almaksızın yalnızca korelasyonel örüntülere dayanıyorsa, değişen iklimsel koşullar altında yanıltıcı sonuçlar üretebilir. “Asistan/yardımcı” çerçevesi, bu tür modellerin geliştirilmesi sırasında jeolojik kısıtların işe koşulmasını ve çıktıların jeolojik akıl yürütmeyle sınanmasını zorunlu kılar.

Böyle bir yaklaşım, tahmine dayalı modellemeyi reddetmediği gibi geleneksel yorumlamayı da yüceltmez. Bunun yerine,

*based on various criteria. In this context, first, stratigraphic conformity is considered, checking whether the principle of superposition and known stratigraphic sequences are violated. Additionally, the preservation of physical thresholds is assessed, examining whether process-based parameters such as slope angle, rock strength, and fluid pressure exceed physical limits. Furthermore, using the spatial continuity criterion, whether lithological units and structural features exhibit the spatially expected geological continuity or not is analyzed. Finally, model outputs are evaluated by domain experts using semi-quantitative scales (e.g., a consistency score from 1 to 5). This multidimensional approach makes it possible to identify models that are geologically meaningless even if they possess high predictive accuracy.*

*To make this evaluation more systematic, geological consistency can be expressed as a semi-quantitative score. In this context, geological consistency can be defined based on three fundamental components: (i) stratigraphic conformity ( $S_1$ ), (ii) preservation of physical thresholds ( $S_2$ ), and (iii) spatial continuity ( $S_3$ ). Each component is evaluated by normalizing between 0 and 1. Accordingly, a simple Geological Consistency Score (GCS) can be defined as follows:*

$$JTS = (S_1 + S_2 + S_3) / 3$$

*Such an approach allows model performance to be evaluated not only in terms of accuracy metrics but also in terms of geological meaningfulness. The aim is not to produce a precise measurement but to ensure the systematic incorporation of geological reasoning into the model evaluation process.*

*This framework is not merely a terminological proposal but also a practical methodological guideline. For example, a machine learning model developed for landslide susceptibility mapping may achieve high accuracy when trained on a past landslide inventory; however, if the model relies solely on correlational patterns without considering physically meaningful slope-*

yerbilimleri camiasındaki farklı aktörler için belirli çıkarımları beraberinde getirir:

*Araştırmacılar:* Jeolojik varsayımları gizlemek yerine açığa çıkaran modeller tasarlamaya teşvik edilir. Model geliştirme sürecine jeolojik ön bilgileri ve kısıtlamaları açıkça dâhil etmeleri, yalnızca tahmin performansına değil, model çıktılarının jeolojik tutarlılığına da öncelik vermeleri beklenir. Yorumlanabilir ya da kuram rehberliğinde öğrenme yaklaşımlarının tercih edilmesi, sorumlu bir araştırma pratiğinin parçasıdır.

*Hakemler ve Editörler:* Değerlendirme süreçlerinde tahmin doğruluğu metriklerinin yanında jeolojik tutarlılık ve yorumlanabilirliği de teşvik edici ölçütler olarak benimsemelidir. Çalışmalarda model çıktılarının yerleşik jeolojik kavramlarla ilişkilendirilmesini talep etmelidir; yüksek doğruluğa jeolojik olarak makul olmayan yollardan ulaşan modelleri eleştirel biçimde değerlendirmelidir.

*Fon sağlayan kurumlar ve karar alıcılar:* Kuram rehberliğinde ve yorumlama bilincine sahip YZ çerçevelerini öncelikli destek alanları arasında konumlandırılmalı; disiplinlerarası projelerde jeoloji ve bilgisayar bilimlerinin dengeli biçimde temsil edilmesini gözetmelidir. Yalnızca tahmin başarısını değil, jeolojik anlayışa katkıyı da ölçen değerlendirme kriterlerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve nitelikli bir bilimsel ortamın tesis edilmesine katkı sağlayacaktır.

Yapay zeka, yerbilimlerinde gözlem ile sonuç arasındaki asistan/yardımcı rolünü benzeri görülmemiş bir hız ve ölçekte yerine getirebilir. Deprem erken uyarı sistemlerinden heyelan duyarlılık haritalarına, yeraltı kaynaklarının modellenmesinden stratigrafik sınıflandırmaya kadar pek çok alanda YZ modelleri, geleneksel yöntemleri tahmin performansı açısından geride bırakmaktadır. Ancak bu teknik başarı, jeolojik anlayışla eşdeğer görülmemelidir.

*process thresholds, it may produce misleading results under changing climatic conditions. The “assistant” framework necessitates the deployment of geological constraints during the development of such models and requires that outputs be tested against geological reasoning.*

*Such an approach neither rejects predictive modeling nor glorifies traditional interpretation. Instead, it carries specific implications for different actors within the geoscience community:*

*Researchers: It is recommended that researchers be encouraged to design models that reveal rather than conceal geological assumptions. They are expected to explicitly incorporate prior geological knowledge and constraints into the model development process, prioritizing not only predictive performance but also the geological consistency of model outputs. Preferring interpretable or theory-guided learning approaches is part of responsible research practice.*

*Reviewers and Editors: In evaluation processes, reviewers and editors should adopt geological consistency and interpretability as encouraging criteria alongside predictive accuracy metrics. They should demand that studies relate model outputs to established geological concepts; they should critically evaluate models that achieve high accuracy through geologically implausible means.*

*Funding agencies and decision-makers: It is recommended that funding agencies and decision-makers should position theory-guided and interpretation-aware AI frameworks among priority funding areas and ensure balanced representation of geology and computer science in interdisciplinary projects. Developing evaluation criteria that measure not only predictive success but also contributions to geological understanding will contribute to establishing a sustainable and high-quality scientific environment.*

*Artificial intelligence can fulfill the assistant role between observation and outcome in the geosciences at an unprecedented speed and*

Yüksek tahmin doğruluğu, jeolojik tutarlılık ve nedensel çıkarım anlamına gelmez; aksine, yorumlayıcı muhakemenin marjinalleşmesi halinde modellerin fiziksel süreç temelli olarak ilgisiz proksilere dayanan yanıltıcı sonuçlar üretebileceği dikkatle değerlendirilmelidir. Özellikle gözlemlerin seyrek olduğu, belirsizliğin yapısal nitelikte olduğu ve doğruluğu kanıtlanmış bilginin sınırlı olduğu yeraltı yorumlaması ve afet değerlendirmesi gibi alanlarda bu risk daha da belirgindir.

Bu sorunu aşmak amacıyla önerilen YZ'nın asistan/yardımcı vasfı, YZ'yi özerk bir karar alıcı olarak değil, veri ile jeolojik akıl yürütme arasında yorumlayıcı bir aracı olarak konumlandırmaktadır. Bu yaklaşım, tahmine dayalı modellemeyi reddetmeksizin, yorumlamayı aktif ve eleştirel bir bilimsel pratik olarak korumayı hedefler.

Yapay zeka yerbilimlerini yeniden şekillendirmeye ve dönüştürmeye devam edecektir. Bu dönüşümün, kavrayışı derinleştirip derinleştirmeyeceği ya da yalnızca örüntü tespitini hızlandırıp hızlandırmayacağı, araştırmacıların, editörlerin ve kurumların alacağı kararlara bağlıdır. Yorumlamayı temel bir bilimsel pratik olarak korumak, veri odaklı bilimsel gelişmenin uzun ömürlü ve uygulanabilir jeolojik öngörüye dönüşmesine yardımcı olacaktır.

## KATKI BELİRTME

Bu yazı, Prof. Dr. Nizamettin Kazancı'nın teşviki üzerine hazırlanmış olup kendisine katkıları için teşekkür ederim. Ayrıca, Dr. Fatih Köroğlu'na değerli yorumları için minnettarım. Makalenin ilk taslağı Prof. Dr. Erdinç Yiğitbaş tarafından incelenmiş olup, kendisinin detaylı incelemesi teknik notun kalitesini önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca üç isimsiz hakemden gelen yapıcı yorumlara teşekkür ederim.

*scale. From earthquake early warning systems to landslide susceptibility maps, from subsurface resource modeling to stratigraphic classification, AI models outperform traditional methods in terms of predictive performance in many areas. However, this technical success should not be equated with geological understanding.*

*High predictive accuracy does not imply geological consistency and causal inference; on the contrary, it should be carefully considered that if interpretive reasoning becomes marginalized, models may produce misleading results based on physically irrelevant proxies. This risk is even more pronounced in areas such as subsurface interpretation and disaster assessment, where observations are sparse, uncertainty is structural in nature, and ground truth is limited.*

*To overcome this problem, the proposed "assistant" role of AI positions AI not as an autonomous decision-maker but as an interpretive intermediary between data and geological reasoning. Without rejecting predictive modeling, this approach aims to preserve interpretation as an active and critical scientific practice.*

*Artificial intelligence will continue to reshape and transform the geosciences. Whether this transformation deepens understanding or merely accelerates pattern detection depends on the decisions made by researchers, editors, and institutions. Preserving interpretation as a fundamental scientific practice will help transform data-driven scientific advances into long-lasting and applicable geological foresight.*

## ACKNOWLEDGMENTS

*This paper was prepared with the encouragement of Prof. Dr. Nizamettin Kazancı, to whom I extend my thanks for his contributions. I am also grateful to Dr. Fatih Köroğlu for his valuable comments. The first draft of the manuscript was reviewed by Prof. Dr. Erdinç Yiğitbaş, whose detailed examination significantly improved the quality of the technical note. I also thank three anonymous reviewers for their constructive comments.*

## ORCID

Oğuz Mülayim  <https://orcid.org/0000-0003-3283-8070>

## KAYNAKÇA / REFERENCES

- Bergen, K. J., Johnson, P. A., de Hoop, M. V., Beroza, G. C. (2019). Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, 363, Article eaau0323.  
<https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
- Breiman, L. (2001). Statistical modeling: the two cultures. *Statistical Science*, 16(3), 199-231.
- Karpatne, A., Atluri, G., Faghmous, J. H., Steinbach, M., Banerjee, A., Ganguly, A., Shekhar, S., Samatova, N., Kumar, V. (2017). Theory-Guided Data Science: A New Paradigm for Scientific Discovery from Data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 29(10), 2318-2331.  
<https://doi.org/10.1109/TKDE.2017.2720168>
- Lary, D. J., Alavi, A. H., Gandomi, A. H., Walker, A. L. (2016). Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 3-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.003>
- Lundberg, S.M., Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765-4774.
- Molnar, C. (2022). *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable*. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/>
- Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., Prabhat, (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566, 195-204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Ribeiro, M. T., Singh, S., Guestrin, C. (2016). “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1135-1144.  
<https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>
- Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Luccioni, A., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Mukkavilli, S. K., Kording, K. P., Gomes, C., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., Bengio, Y. (2019). *Tackling Climate Change with Machine Learning*. arXiv:1906.05433.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.05433>
- Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1, 206-215.  
<https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>





**Remote Sensing of Listvenite Hydrothermal Alteration in Vezirler Mélange, Kula (Western Türkiye): Landsat-7 ETM+, Crosta-PCA and Band-Ratio Mapping**  
*Kula (Batı Türkiye) Vezirler Karmaşığındaki Listvenitik Hidrotermal Alterasyonunun Uzaktan Algılanması: Landsat-7 ETM+, Crosta-PCA ve Bant-Oranı Haritalaması*

**Semih Eski<sup>1,\*</sup> , Mehmet Akbulut<sup>1</sup> **

<sup>1</sup> Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Central Campus, 35390 İzmir, Türkiye

• Geliş/Received: 20.10.2025 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 29.12.2025 • Kabul/Accepted: 01.01.2026  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 22.02.2026 • Baskı/Printed: 30.04.2026

*Araştırma Makalesi/Research Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Abstract:** Listvenite-type silica-carbonate metasomatic alteration in the Vezirler ophiolitic mélange (northeastern Kula, western Türkiye) was screened using a lithology-masked Selective PCA workflow and complementary band-ratio indices applied to a cloud-free Landsat-7 ETM+ image. Masking reduced spectral mixing from vegetation, alluvium, and non-target lithologies and increased anomaly contrast within a field-verified ROI. Ferric-iron-sensitive PC2 anomalies cluster along carbonatized/silicified serpentinites (CS-Srp) and Fe-oxide-stained silica-carbonate caps (Fsc/Cnz), consistent with hematite coatings documented in the field. Ferrous-iron responses are comparatively subdued, indicating limited preservation of surface-expressed Fe<sup>2+</sup> signatures under pervasive oxidation and overprinting. Hydroxyl-related patterns delineate alteration halos but weaken over strongly silicified caps where diagnostic OH absorption is suppressed. Band-ratio maps (Fe<sup>3+</sup>: B3/B2; silica: B7/B5; OH: B5/(B5 + B7)), statistically segmented using  $\mu \pm \sigma$  thresholds, reproduce first-order PCA patterns and support repeatable anomaly ranking. The results demonstrate a rapid regional screening approach relevant to alteration targeting and natural mineral carbonation analogues, while recognizing inherent limitations of the 30 m resolution, such as false positives in shaded valleys due to topographic effects and spectral dilution from mixed-pixel responses along slope transitions. Future work may integrate ASTER TIR and archival ASTER SWIR scenes acquired prior to 2008, or modern SWIR/hyperspectral datasets, to improve mineral discrimination.

**Keywords:** Band ratios, Crosta-PCA, iron oxides, Kula, Landsat-7 ETM+, listvenite, silica-carbonate alteration, remote sensing.

**Öz:** Vezirler ofiyolitik melanjı (Kula'nın kuzeydoğusu, Batı Türkiye) içerisindeki listvenit tipi silis-karbonat metasomatik alterasyon, litoloji/ROI maskelemesi uygulanmış Seçimli PCA (Selective PCA) iş akışı ve tamamlayıcı bant-oranı indeksleri ile bulut içermeyen bir Landsat-7 ETM+ görüntüsü üzerinden taranmıştır. Maskeleme, bitki örtüsü, alüvyon ve hedef dışı litolojilerden kaynaklanan spektral karışımı azaltarak saha ile doğrulanmış ROI içinde anomali kontrastını artırmıştır. Ferrik demire duyarlı PC2 anomalileri, karbonatlaşmış/silisleşmiş serpantinler (CS-Srp) ile Fe-oksit boyalı silis-karbonat şapkalar (Fsc/Cnz) boyunca kümelenmekte ve arazide gözlenen hematitleşmiş kaplamalarla uyum göstermektedir. Fe<sup>2+</sup> tepkileri daha zayıftır ve yüzeyde ileri oksidasyon/overprinting koşullarında Fe<sup>2+</sup> imzalarının sınırlı korunduğunu düşündürmektedir. Hidroksil ile ilişkili desenler alterasyon halelerini işaret etse de kuvvetli silisleşmiş şapkalarda OH soğurmalarının baskılanması nedeniyle zayıflayabilmektedir. Bant-oranı haritaları (Fe<sup>3+</sup>: B3/B2; silis: B7/B5; OH: B5/(B5+B7)) ve  $\mu \pm \sigma$  ile istatistiksel sınıflama, PCA desenlerini doğrulayarak tekrarlanabilir hedef sıralaması sağlamıştır. Sonuçlar, gölgeli vadilerde

\* Correspondence / Yazışma: semih.eski@deu.edu.tr

*topoğrafya kaynaklı sahte anomaliler ve eğim geçişlerinde piksel-içi karışım nedeniyle oluşan spektral seyrelme gibi 30 m çözünürlüğe özgü sınırlılıkları dikkate alarak, bölgesel ölçekte hızlı alterasyon taramasını mümkün kılmaktadır. Gelecek çalışmalarda ASTER TIR ve 2008 öncesi arşiv ASTER SWIR sahneleri veya modern SWIR/hiperspektral veriler ile mineral ayrımı güçlendirilebilir.*

**Anahtar Kelimeler:** Bant oranları, Crosta-PCA, demir oksit, Kula, Landsat-7 ETM+, listvenit, karbonat alterasyonu, uzaktan algılama.

## INTRODUCTION

Remote sensing techniques have become essential tools for mineral exploration, particularly for the rapid identification of economically significant mineralization in large and often inaccessible terrain. One of the pioneering demonstrations of this potential was presented by Abrams et al. (1983), who successfully delineated porphyry copper-related alteration zones in southern Arizona using multispectral Landsat data. Subsequent studies have advanced these capabilities through refined image processing techniques and sensor improvements. For instance, Crosta and Moore (1989) significantly enhanced mineral detection capabilities by identifying specific eigenvector combinations in Thematic Mapper imagery that isolate ferric-iron and hydroxyl-bearing clay minerals, underscoring the importance of tailored principal components analysis (PCA) configurations for different geological settings.

The launch of Landsat 7 ETM+ in 1999 introduced shortwave infrared (SWIR) spectral bands particularly sensitive to distinguishing iron oxide and clay alteration minerals, enabling high-resolution mineralogical mapping at regional scale (Segal, 1982; Aydal et al., 2007; Khaleghi et al. 2020). Numerous studies have demonstrated that basaltic volcanic fields undergo intense chemical weathering of young basaltic lavas and tuffs, leading to the formation of iron oxide minerals, primarily hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), goethite ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), and limonite ( $\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) in surface or near-surface horizons. Deeper profiles often exhibit alteration of volcanic glass into clay minerals, notably smectite, illite, and kaolinite, which significantly influence soil properties

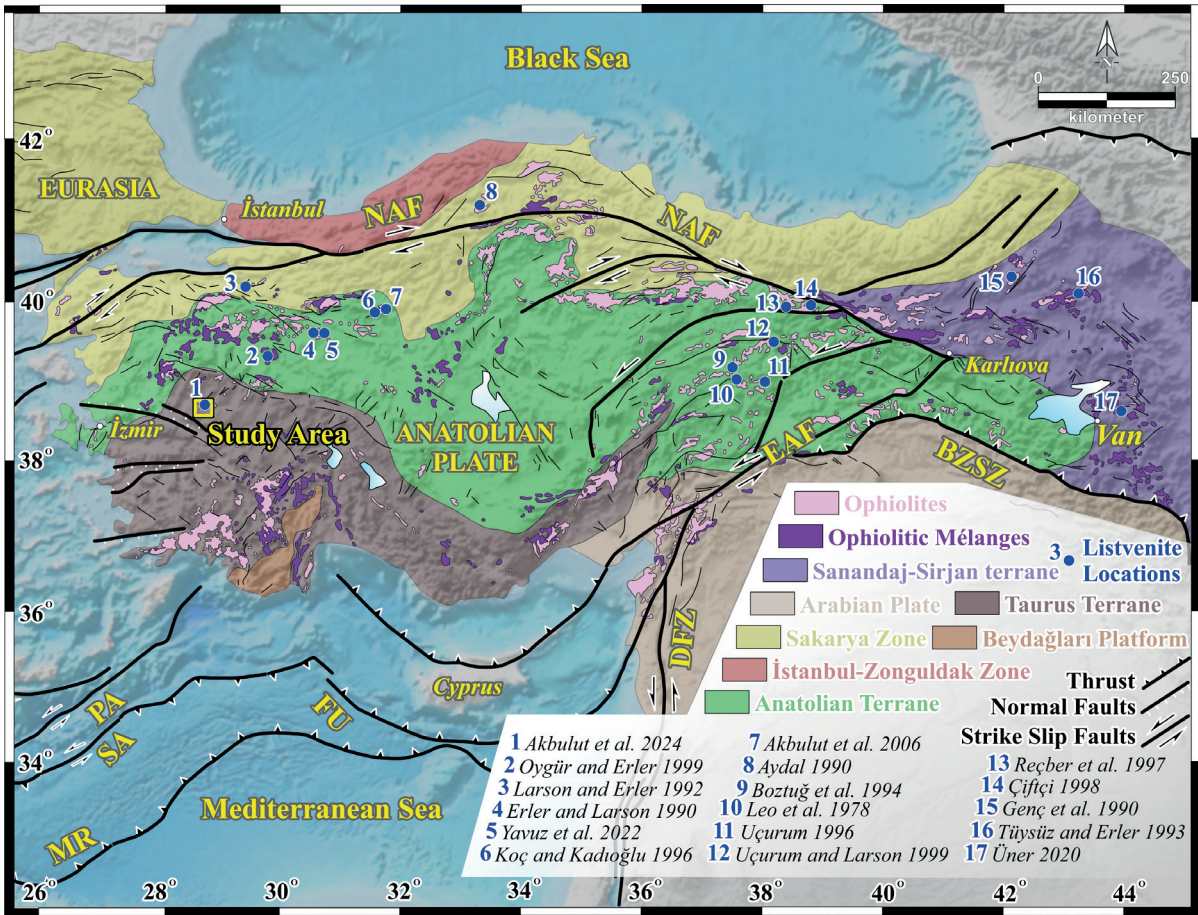
by enhancing water retention and swelling, directly impacting local erosion and agricultural productivity (Colman, 1982; Bishop et al., 1998; Gomboš, 2012; Silva et al., 2020). Such assessments from remote sensing imagery are also critical for mineral exploration campaigns, for remotely locating the main iron (and occasionally transitional metal) oxide +/- silica-rich zones, namely the gossans. Gossan zones occur through leaching of the buried sub-surface sulfide mineralization, due to the effects of oxidizing surficial and/or near-surface processes, and are considered as useful marker buoys for detecting a potential economic mineralization.

Extensive iron oxide-bearing weathering profiles and/or occurrence of gossan-like ferruginous and silica-carbonate alteration zones (listvenite – *sensu lato*) are also very significant for mantle rocks of the ophiolitic series. Mapping of the listvenite bodies is particularly important due to their potential for precious metal mineralization. Besides their potential economic importance listvenites also play another role in the current search for remedies to the global climate crisis. These occurrences are natural analogues of mineral carbonation that is being considered as a way of reducing atmospheric  $\text{CO}_2$  levels, and lately they are being studied in this respect (Akbulut et al., 2024 and references therein). For this, introduction of  $\text{CO}_2$ -bearing low-temperature hydrothermal fluids into a serpentinized peridotite host is essential.

The Kula region, situated at the western termination of Türkiye's east-west trending northern ophiolitic belt (Figure 1), benefits from

a unique geological setting hosting notable hot springs and well-preserved remnants of the Tethyan oceanic lithosphere. Located within the Kula-Salihli UNESCO Global Geopark, the area has been the subject of extensive geological investigations (e.g., Ercan, 1981; Ercan et al., 1992;

Şen, 2002; Binal and Ercanoğlu, 2010; Aytaç and Demir, 2023; Akbulut et al., 2024). Despite this rich geological understanding, systematic remote sensing-based mineral mapping efforts remain limited.



**Figure 1.** Tectonic map of Turkey and surrounding regions showing locations of the listvenites within serpentinites and serpentinite-matrix mélanges of northern and eastern Turkish ophiolites and the location of the study area. Listvenite locations and tectonic units were compiled based on Moix et al. (2008) and Akbulut et al. (2024) and the references therein. The neotectonic map was modified from Şengör et al. (1985), Barka (1992), Barbot and Weiss (2021), and Bozkurt (2001). Abbreviations: BZSZ – Bitlis-Zagros Suture Zone; DFZ – Dead Sea Fault Zone; EAF – East Anatolian Fault; FU – Florence Uplift; MR – Mediterranean Ridge; NAF – North Anatolian Fault; PA – Pliny Arc; SA – Strabo Arc.

**Şekil 1.** Türkiye ve çevresinin, kuzey ve doğu Türkiye ofiyolitlerindeki serpantiniter ve serpantin matrisli melanjlardan türeyen listvenitlerin konularını ve çalışma alanının yerini gösteren tektonik haritası. Listvenit konuları ve tektonik birimler Moix vd. (2008) ve Akbulut vd. (2024) ve orada sunulan referanslardan derlenmiştir. Neotektonik harita Şengör vd. (1985), Barka (1992), Barbot ve Weiss (2021) ve Bozkurt (2001)'den değiştirilerek hazırlanmıştır. Kısaltmalar: BZSZ – Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı; DFZ – Ölü Deniz Fay Zonu; EAF – Doğu Anadolu Fayı; FU – Florence Yükselimi; MR – Akdeniz Sırtı; NAF – Kuzey Anadolu Fayı; PA – Pliny Yayı; SA – Strabo Yayı.

This study aims to map and characterize the listvenite-type hydrothermal/metasomatic alteration minerals in the Kula volcanic field by applying Crosta PCA and band ratio techniques to Landsat 7 ETM+ imagery and to evaluate the spatial relationships between alteration mineral distributions and controlling tectono-volcanic structures in the Manisa-Kula region. The complex lithological assemblages, including serpentized peridotites with listvenite-type alteration, carbonatized serpentinites, and extensive Quaternary basaltic deposits, provide ideal conditions for spectral discrimination of listvenite-type alteration minerals through an integrated remote sensing approach. With this attempt, we hope to contribute to the literature about remote sensing applications for gossan and similar occurrences in these terrains.

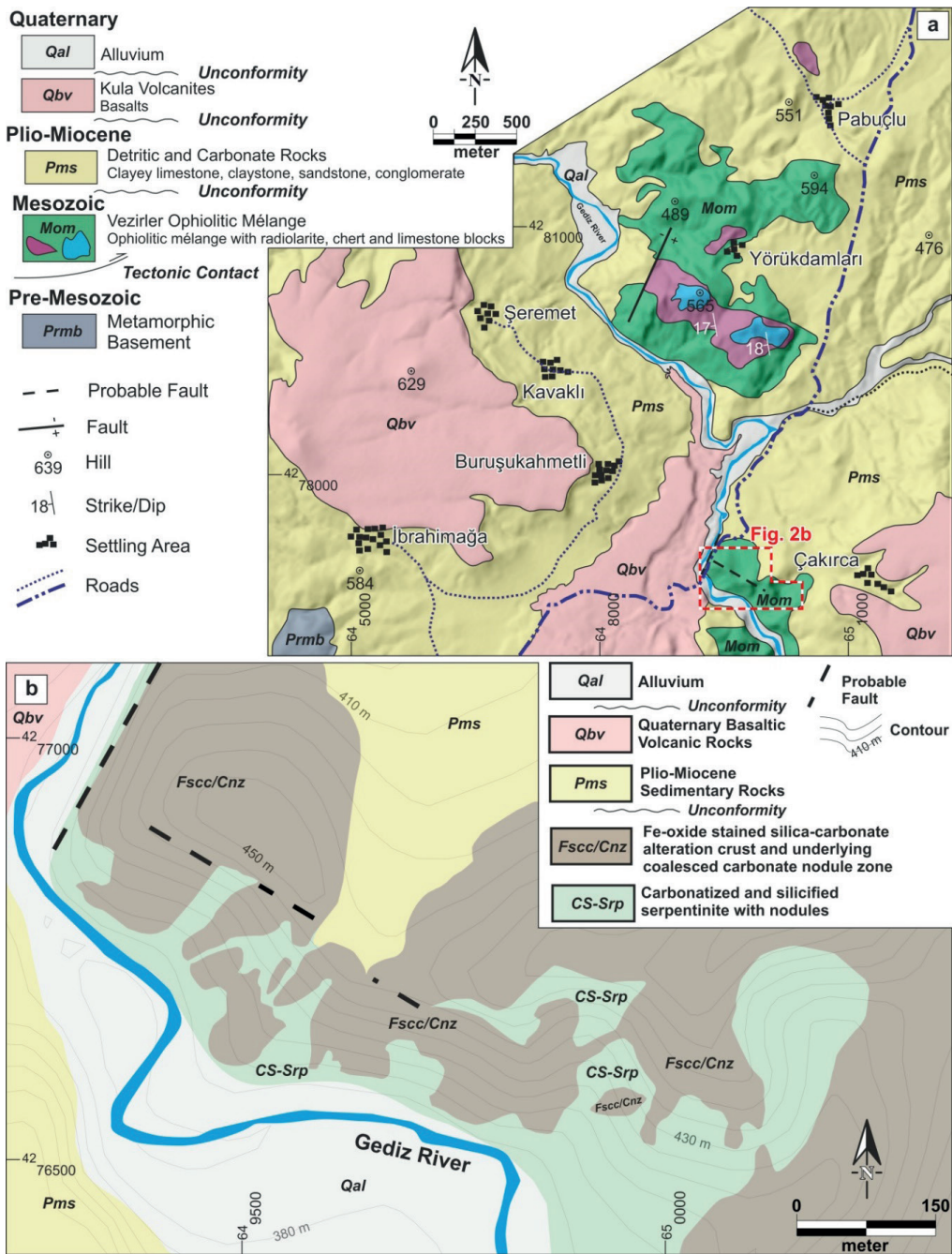
## **GEOLOGICAL SETTING AND THE STUDY AREA**

The Kula-Salihli UNESCO Global Geopark, situated in western Türkiye, is known for its unique Quaternary volcanic landscapes, historically described as “katakekaumene,” or “burnt lands” due to their distinct geomorphological features (Jones, 1929). Geologically, the area is located within the actively extending Gediz Graben system, characterized by significant tectono-stratigraphic complexity and a diverse suite of geological units ranging from ophiolitic mélanges to recent volcanic fields (Ercan and Öztunalı, 1982; Richardson-Bunbury, 1996) (Figure 2).

The study area is underpinned by the ophiolitic mélange, which primarily consists of the completely serpentized host peridotite unit. This ultramafic unit is locally altered into listvenite horizons, characterized by vertical zonation of a resistant ferruginous silica cap (F<sub>sc</sub>) grading downwards into a carbonatized zone (C<sub>nz</sub> and CS-S<sub>rp</sub>) (Figure 2). These basement rocks are unconformably overlain by Pliocene-Miocene sediments (P<sub>ms</sub>) comprising lacustrine limestone

and claystone. The youngest geological features include the Quaternary basaltic volcanics (Q<sub>bv</sub>) of the Kula Geopark and the recent Quaternary alluvium (Q<sub>al</sub>) deposits along the Gediz River channel.

The geological framework of the Kula region includes Pre-Mesozoic metamorphic basement rocks overlain tectonically by the Vezirler Mélange, comprising serpentized peridotites, radiolarites, cherty limestones, and mudstones of Late Cretaceous age (Ercan and Öztunalı, 1982). These ophiolitic rocks are unconformably covered by Pliocene fluvial and lacustrine sediments interbedded with calc-alkaline volcanic extrusions (Ercan and Öztunalı, 1982). The Vezirler Mélange, located in the northeastern part of the Kula region, presents a remarkable exposure of serpentized peridotites that have undergone extensive carbonatization and silicification, resulting in listvenite-type alteration assemblages (Akbulut et al., 2024) (Figure 2). According to Akbulut et al. (2024), the alteration profile in the northeastern part of the Kula region comprises three principal zones, arranged from bottom to top: a carbonatized and silicified serpentinite (CS-S<sub>rp</sub>), a coalesced carbonate nodule zone (C<sub>nz</sub>), and an iron-oxide-stained silica-carbonate alteration cap (F<sub>sc</sub>). At the basal levels, serpentinites exhibit a greenish-white hue and host variably sized carbonate nodules formed during progressive carbonation and silicification processes. The uppermost F<sub>sc</sub> zone is characterized by intense silicification and extensive accumulations of iron oxides-oxyhydroxides, primarily hematite and goethite. Within this horizon, carbonates occur as magnesite and dolomite, often preserving the original serpentine fabric. The widespread development of iron oxides and pervasive silicification within the cap are attributed to both intensive meteoric weathering under paleo-surface conditions and introduction of low temperature CO<sub>2</sub>-rich geothermal fluid.

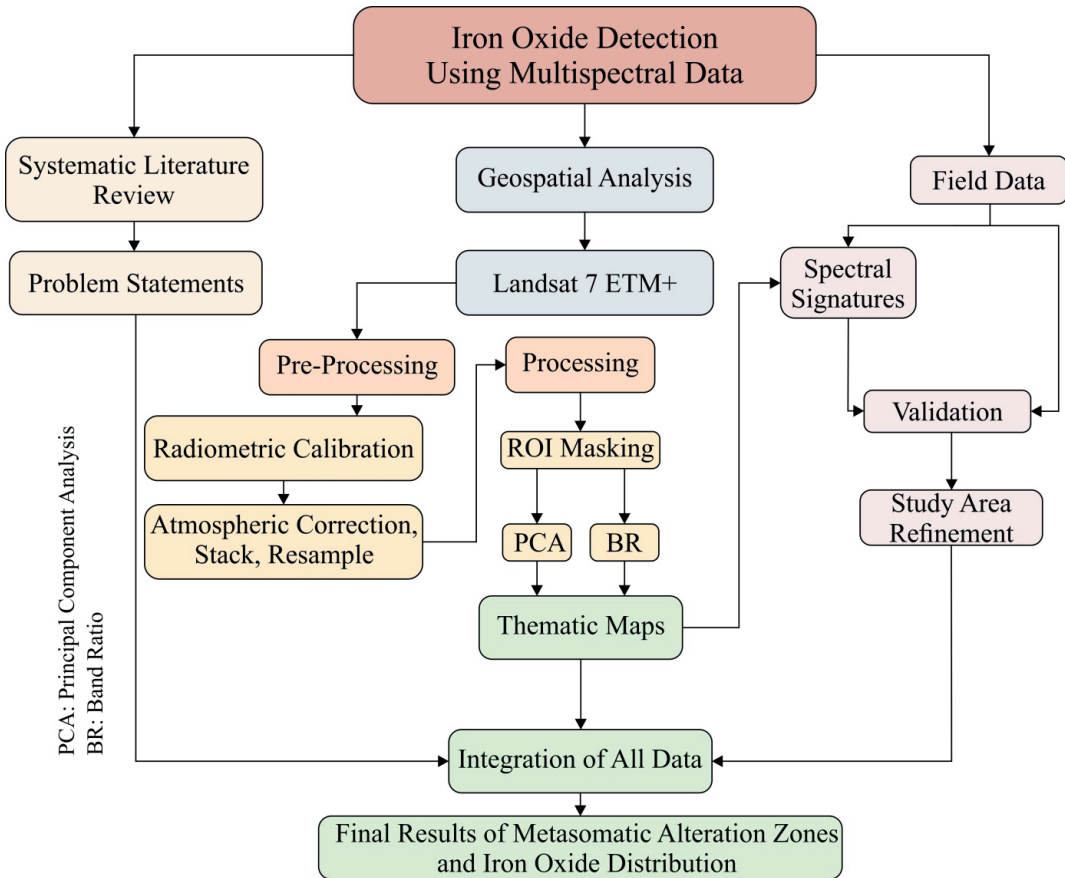


**Figure 2.** **a)** Geological map of the northeast of Kula, adapted from Akbulut et al. (2024) based on data from Ercan et al. (1980) and Kılıç et al. (2018). **b)** Detailed geological map of the studied outcrop and its surroundings, adapted from Akbulut et al. (2024). Note: The lithological abbreviations and unit codes defined in this figure are used consistently throughout the manuscript in Figures 4, 5, and 8).

**Şekil 2. a)** Ercan vd. (1980) ve Kılıç vd. (2018) verilerine dayanılarak Akbulut vd. (2024) 'ten uyarlanan, Kula 'nın kuzeydoğusuna ait jeoloji haritası. **b)** Akbulut vd. (2024) 'ten uyarlanan, çalışılan mostranın ve çevresinin ayrıntılı jeoloji haritası. Not: Bu şekilde tanımlanan litolojik kısaltmalar ve birim kodları, makale boyunca Şekil 4, 5 ve 8 'de tutarlı bir şekilde kullanılmıştır.

Quaternary basaltic volcanic extrusions, representing multiple volcanic episodes, dominate the upper stratigraphy, illustrating a regional topographic inversion due to uplift events postdating initial volcanic activity (Richardson-Bunbury, 1996; Tokçaer et al., 2005). Kula volcanism comprises Pliocene-Quaternary alkaline basaltic flows and scoria cones emplaced along structural weaknesses in the normal fault zones bounding the Gediz Graben. This system exhibits a monogenetic character (Şen, 2002). Radiometric dating indicates that eruptive activity commenced following extensional pulses in the early stage at ca. 1.7–2.0 Ma, while Holocene activity is recorded as having  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of  $311 \pm 15$  ka (Ar-4),  $274 \pm 13$  ka (Ar-3a), and  $240 \pm 18$  ka (Ar-3b) for three successive lava flows

(van Gorp et al., 2013). Moreover,  $^3\text{He}$  exposure ages from western block flows of  $1.5 \pm 0.3$  ka and  $2.5 \pm 0.4$  ka confirm at least two distinct late-Holocene events (Heineke et al., 2016), demonstrating multi-phase volcanism over the last  $\sim 70$  ky. Parallel footwall uplift along the rift axis accelerated from  $\sim 0.4$  mm yr $^{-1}$  in the early phase to  $\sim 14$  mm yr $^{-1}$  at present, reflecting increased eruptive volumes, and high geothermal heat fluxes ( $> 100$  mW m $^{-2}$ ) near the northeastern margin of the Gediz Graben corroborate sustained activity (Richardson-Bunbury et al., 2001; Erkan, 2015). This chronological and geodynamic framework indicates that Kula volcanism has evolved through multiple magmatic phases largely independent of regional rifting rates, late-Quaternary climatic fluctuations, and crustal thinning.



**Figure 3.** Workflow illustrating the integrated remote sensing approach adopted in this study.

**Şekil 3.** Bu çalışmada benimsenen bütünlük uzaktan algılama yaklaşımını gösteren iş akışı.

## **MATERIALS and METHODS**

Prior to any field-based investigation, a preliminary remote sensing assessment was conducted using Landsat 7 ETM+ imagery to evaluate the distribution of alteration minerals and iron oxide crust in the broader Kula region. This image-based mineral mapping provided a regional-scale perspective to narrow the study area by identifying zones with prominent spectral anomalies, particularly those indicating iron-bearing and phyllosilicate (hydroxyl bearing sheet silicates - e.g., kaolinite, smectite, serpentine, etc.) altered surfaces. The remote sensing workflow followed during this study is summarized in Figure 3.

To investigate listvenitic metasomatic alteration and iron oxide mineral distributions in the Kula region, Landsat 7 ETM+ imagery dated May 18, 2001, was acquired from the USGS Earth Explorer platform. This pre-2003 scan-line-corrector-on (SLC-on) dataset ensured complete spatial coverage without missing data artifacts. Although contemporary Landsat-8/9 OLI data provide higher radiometric fidelity, the preference for the 2001 Landsat-7 ETM+ dataset is primarily driven by the necessity to analyze lithological exposures prior to recent anthropogenic overprinting. A comparison with modern satellite imagery reveals that significant portions of the target alteration zones have been progressively obscured by expanding agricultural activity and infrastructure development over the last two decades. Consequently, the selected pre-2003 (SLC-on) imagery offers a more pristine spectral record of the geological surface, minimizing non-geological mixing artifacts (e.g., vegetation, man-made structures) that affect modern acquisitions, while ensuring gap-free spatial continuity. Landsat 7 remains widely used in mineral exploration due to its spectral range, including SWIR bands essential for detecting iron oxide and hydroxyl-bearing clay minerals (Van der Meer et al., 2012). The continued relevance of SWIR bands for

alteration mapping was also demonstrated in more recent studies utilizing advanced sensors. For example, Johnson and Koperski (2017) applied the 8-band SWIR configuration of the WorldView-3 satellite to successfully distinguish ferric iron and silica alteration zones in the Cuprite mining district, with mapping performance approaching that of hyperspectral AVIRIS data. These findings underscore the importance of SWIR sensitivity, even in multispectral systems such as Landsat 7, for identifying ferruginous and silica-bearing alteration anomalies in geologically complex terrains.

The downloaded Level-1 Terrain Corrected (L1T) imagery was processed in ArcGIS 10.8. First, radiometric calibration was performed to convert digital numbers (DN) to top-of-atmosphere (TOA) radiance using the rescale factors provided in the metadata. Subsequently, an atmospheric correction was applied using the dark object subtraction (DOS1) method (Chavez, 1996) to minimize path radiance effects and retrieve surface reflectance, assuming a uniform haze distribution over the scene. Following these corrections, standard RGB composites were generated by stacking Bands 3 (Red: 0.63–0.69  $\mu\text{m}$ ), 2 (Green: 0.52–0.60  $\mu\text{m}$ ), and 1 (Blue: 0.45–0.52  $\mu\text{m}$ ). These visual composites provided a preliminary basis for distinguishing volcanic units and sedimentary contacts based on color tone and texture. To enhance spatial detail for visual interpretation, the RGB composite was pan-sharpened using the 15 m panchromatic Band 8, yielding improved delineation of structural and lithological boundaries (Rencz and Ryerson, 1999). It should be noted that this pan-sharpened product was utilized solely for qualitative visualization; all subsequent quantitative analyses (PCA and band ratios) were performed on the original 30 m multispectral datasets to preserve spectral fidelity.

To delineate the listvenite alteration zones and isolate specific mineralogical anomalies, a

selective principal component analysis (selective PCA) approach adapted from the feature-oriented logic of the Crosta technique (Crosta and Moore, 1989) was employed alongside standard band ratio methods (Table 1). Unlike standard PCA applied to the entire band stack, this selective approach processes specific two-band subsets to maximize the spectral contrast between target mineral absorption and background reflectance. The selection of the specific principal component (PC) for alteration mapping was guided by the inspection of eigenvector loadings, following the Crosta technique (Crosta and Moore, 1989). In all selective PCA subsets (e.g., Bands 1+3, 4+5, 5+7), PC1 exhibited high positive loadings for both input bands, mapping standard scene brightness (albedo) and topography. In contrast, PC2 displayed eigenvector loadings with opposite signs, capturing the spectral variance attributable to mineralogical features. Consequently, PC2 was identified as the relevant component containing specific spectral information for  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , and hydroxyl-bearing minerals, respectively. Two separate selective PCA runs were conducted in this study. The first utilized a subset of Bands 5 (1.55–1.75  $\mu\text{m}$ ) and 7 (2.08–2.35  $\mu\text{m}$ ) to enhance responses from hydroxyl-bearing phyllosilicates such as kaolinite, smectite, and serpentine. In this configuration, the second principal component (PC2) captures the spectral contrast between the

high reflectance in Band 5 and the absorption features in Band 7. The second run used Bands 1 (0.45–0.52  $\mu\text{m}$ ) and 3 (0.63–0.69  $\mu\text{m}$ ) to highlight  $\text{Fe}^{3+}$  iron oxides like hematite and goethite, exploiting the strong charge-transfer absorption in the blue region (Band 1) versus high reflectance in the red region (Band 3).

To increase the sensitivity of PCA to localized alteration features and suppress spectral interference from non-target lithologies, a spatial masking strategy was implemented prior to statistics calculation. Individual spectral bands were first clipped using a field-verified region-of-interest (ROI) shapefile enclosing the host serpentinized peridotites and ferruginous outcrops. This spatial masking strategy was deliberately designed to exclude the Gediz River channel and adjacent agricultural lowlands; thereby functioning as an effective manual filter against water (NDWI) and vegetation (NDVI) spectral interference without the need for global statistical thresholding. This targeted approach, similar to the masking-based technique implemented by Liu et al. (2011), effectively reduced spectral dilution from surrounding vegetation and alluvium. Consequently, this step enhanced the anomaly contrast in the resulting PC2 images by limiting the statistical calculation to geologically relevant zones.

**Table 1.** Spectral indices and PCA configurations used for detecting listvenite-type alteration minerals based on Landsat 7 ETM+ imagery.

**Çizelge 1.** Landsat 7 ETM+ görüntülerine dayalı olarak listvenit-tipi alterasyon minerallerini saptamak için kullanılan spektral indeksler ve PCA konfigürasyonları.

Index Type	PCA	Band Ratio	Spectral Logic (ETM+)	Targets
Iron oxide ( $\text{Fe}^{3+}$ )	B1, B3	B3/B2	High Red reflectance (B3) vs. Green absorption wing (B2)	Hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), Goethite ( $\alpha\text{-FeOOH}$ )
Ferrous iron ( $\text{Fe}^{2+}$ )	B4, B5		Contrast between NIR (B4) and SWIR1 (B5) variance	Magnetite, Siderite
Phyllosilicate (OH)	B5, B7	B5/(B5 + B7)	High SWIR1 reflectance (B5) vs. SWIR2 Al-OH absorption (B7)	Kaolinite, Illite, Smectite, Serpentine
Silica alteration	B5, B7	B7/B5	Suppression of OH absorption; inverse of clay response	Silicified serpentinite, quartz veins

Complementing the PCA analysis, three specific spectral band-ratio indices were computed to map ferric iron, silica, and hydroxyl-bearing phases. These indices were selected based on the specific reflectance and absorption physics of the target minerals (Table 1). (1) Ferric Iron ( $Fe^{3+}$ ) Index (Band 3 / Band 2): This ratio highlights hematite and goethite by exploiting their characteristic high reflectance in the red region (0.63–0.69  $\mu m$ , Band 3) contrasted against the charge-transfer absorption wing present in the green region (0.52–0.60  $\mu m$ , Band 2) (Segal, 1982). (2) Hydroxyl ( $OH^-$ ) Index (Band 5 / (Band 5 + Band 7)): This formula targets phyllosilicates (e.g., kaolinite, smectite) by enhancing the high reflectance in SWIR1 (1.55–1.75  $\mu m$ , Band 5) relative to the diagnostic Al-O-H vibrational absorption feature centered in SWIR2 (2.08–2.35  $\mu m$ , Band 7) (Aydal et al., 2007). (3) Silica Index (Band 7 / Band 5): Used as a proxy for silicified zones, this ratio highlights areas where the diagnostic SWIR2 absorption of clays is absent or suppressed due to intense silicification, resulting in relatively higher Band 7 values compared to Band 5 (Kayadibi, 2008). In addition to enhancing spectral features, these band ratios were employed to mitigate varying illumination effects caused by the rugged topography, as the topographic slope factor tends to be cancelled out in the ratio calculation (Lillesand et al., 2015). It is important to note that a simple band ratio was not employed for ferrous iron ( $Fe^{2+}$ ) due to the spectral complexity and broad absorption features of ferrous minerals in the NIR-SWIR range; instead, this target was mapped exclusively using the selective PCA method (PC2 of Bands 4 and 5) to maximize subtle variance.

To facilitate objective interpretation and anomaly ranking, the resulting ratio maps were statistically segmented using mean ( $\mu$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ) thresholds derived exclusively from the masked image subsets within the field-verified region (Figure 2b). Specifically, pixels with values exceeding  $\mu + \sigma$  were categorized as high anomalies, those falling between  $\mu - \sigma$  and  $\mu + \sigma$  were defined as moderate anomalies (representing background variance), and values below  $\mu - \sigma$  were classified as low anomalies. This classification method, widely applied in alteration mapping (Tangestani and Moore, 2001; Enoh et al., 2021), allowed the pixel values to be categorized into distinct intensity classes as detailed in Table 2. The statistical parameters were calculated from a sample size of  $N = 925$  pixels (approximately 0.83  $km^2$ ). Sensitivity testing indicated that a narrower threshold ( $\mu \pm 0.5\sigma$ ) resulted in excessive background noise (false positives), while a stricter threshold ( $\mu \pm 1.5\sigma$ ) omitted verified peripheral alteration zones. Therefore, the  $\mu \pm 1.0\sigma$  interval was selected as the optimal discriminator for this geological setting.

Field investigations were conducted following the interpretation of satellite spectral data to validate alteration zones and refine geological boundaries. Spectral anomalies identified through PCA and band ratio analyses, particularly zones with strong  $Fe^{3+}$  responses or  $OH^-$  bearing signatures, were prioritized for ground verification (Figure 4). Field verification focused on the northeastern sector of the study area, where previous studies reported extensive silica-carbonate and iron oxide alteration in detail (Akbulut et al., 2024).

**Table 2.** Statistical classification thresholds for band ratio indices.

**Çizelge 2.** Bant oranı indeksleri için istatistiksel sınıflandırma eşikleri.

Index	Low Anomaly ( $\leq \mu - \sigma$ )	Moderate Anomaly ( $\mu \pm \sigma$ )	High Anomaly ( $> \mu + \sigma$ )	Interpretation
$Fe^{3+}$	< 1.01	1.01 – 1.15	> 1.15	Hematite–goethite enrichment, iron stained serpentinite
Silica	< 0.693	0.693 – 0.775	> 0.775	Silicification, quartz veins, silica-carbonate crusts
$OH^-$	< 0.563	0.563 – 0.591	> 0.591	Kaolinite–smectite alteration, clay-rich zones

The mineralogical identities of the mapped units (e.g., magnesite, dolomite, quartz, hematite) were cross-referenced with the detailed XRD and petrographic data provided in Akbulut et al. (2024) to ensure accurate spectral attribution. During fieldwork, outcrops exhibiting surface staining, pervasive silicification, or ferruginous coatings were examined. Field notes, photographs, and handheld GPS locations were recorded and imported into GIS to compare with remote sensing outputs. Additionally, lithological boundaries observed in the field such as the transition from

carbonatized serpentinite to overlying silica-iron alteration caps were digitized. This allowed refinement of unit contacts and the delineation of altered zones with higher positional accuracy. Observations of carbonate nodules, brecciated serpentinite, and weathered iron oxide-stained silica-carbonate crust supported the spectral interpretations derived from satellite models. This approach ensured that remotely sensed data were not only validated but also geologically meaningful within the regional tectonic and volcanic framework.



**Figure 4.** Field photographs showing vertical and lateral transitions between alteration zones in NE Kula: **a)** outcrop-scale contact between CS-Srp and FscC/Cnz, **b)** close-up of the Cnz-FscC boundary, and **c)** resistant FscC cap over friable Cnz and underlying serpentinitized bedrock.

**Şekil 4.** KD Kula'daki alterasyon zonları arasındaki düşey ve yanal geçişleri gösteren arazi fotoğrafları: **a)** CS-Srp ve FscC/Cnz arasındaki mostra ölçekli dokanak, **b)** Cnz-FscC sınırının yakından görünümü ve **c)** Ufalanabilir Cnz ve altındaki serpantinleşmiş temel kaya üzerindeki dirençli FscC şapkası.

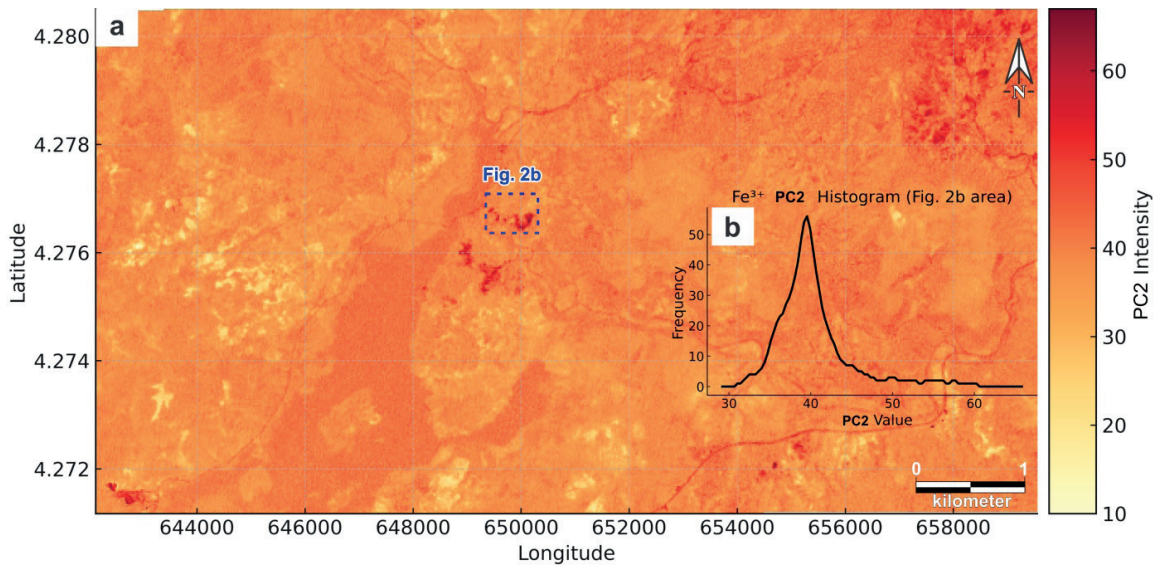
## RESULTS

### Landsat-Based Regional Alteration Patterns

The implementation of the exclusionary ROI mask significantly refined the spatial extent of the mapped anomalies. In preliminary unmasked processing, the Gediz fluvial corridor and vegetated northern slopes exhibited diffuse, noise-dominated spectral responses that obscured genuine geological features. The application of the mask effectively truncated these false positives, ensuring that the high-anomaly clusters described below are strictly associated with bedrock lithology rather than riparian vegetation or moisture-saturated alluvium. Within the masked domain, the  $Fe^{3+}$ -sensitive PC2 component (derived from Bands 1 and 3) reveals clear anomaly clusters associated with carbonatized and silicified serpentinites and iron oxide-bearing crust fragments, most prominently along the eastern margin of the ophiolitic outcrops (Figure 5a). These patterns agree with field observations

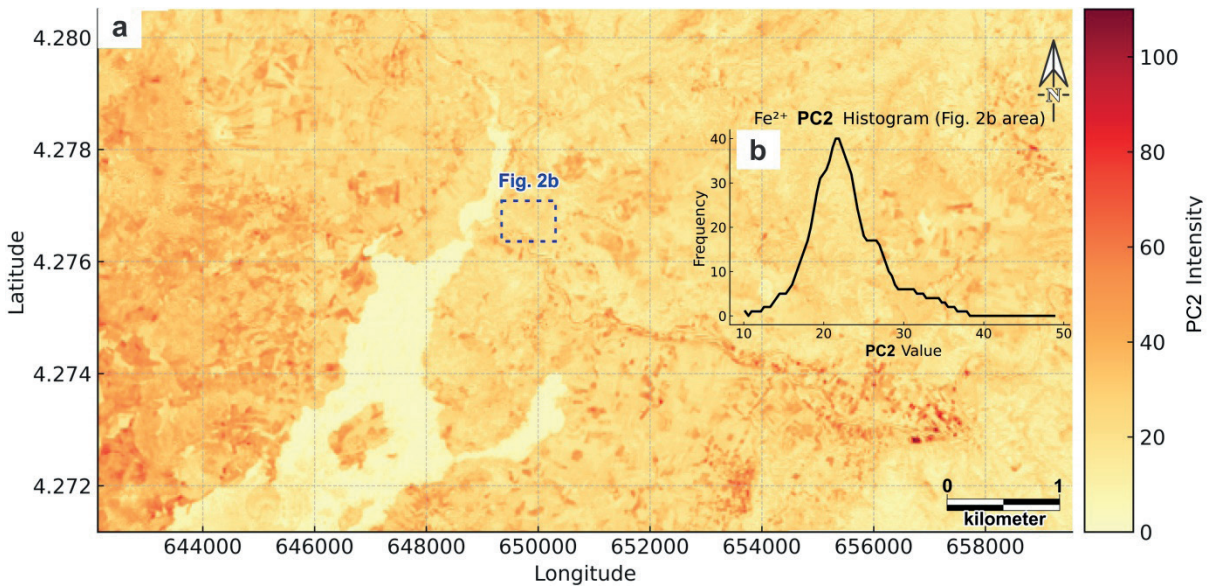
documenting pervasive ferric-iron staining and hematite-coated surfaces (Figure 4).

To validate the spectral results with ground observations, PC2 outputs were examined within the field-confirmed ROI (Figure 2b). In this zone, elevated PC2 values remain concentrated along ridge crests and resistant cap exposures, consistent with a localized alteration footprint. The ROI histogram shows a right-skewed distribution toward high PC2 values ( $\mu = 40.59$ ,  $\sigma = 5.24$ , Range: 29–66) (Figure 5b), supporting localized but spectrally intense ferric enrichment. A secondary anomaly south–southwest of the ROI (inset in Figure 5a) also coincides with serpentinite outcrops. The spectral intensity of this feature mirrors the response observed in the field-verified northern sector, suggesting the presence of a similar but previously unmapped iron-oxide bearing alteration zone. Therefore, rather than being a background artifact, this area is identified as a priority target for future ground-based exploration to verify the extension of the listvenite system.



**Figure 5. a)** Regional-scale masked PC2 map derived from Landsat-7 ETM+ Bands 1 and 3 ( $Fe^{3+}$ -sensitive PCA). (Acquisition Date: 18 May 2001; SLC-on). **b)** Histogram of PC2 values calculated specifically within the field-verified ROI (Fig. 2b).

**Şekil 5. a)** Landsat-7 ETM+ Bant 1 ve 3 kullanılarak türetilen ( $Fe^{3+}$ -duyarlı PCA) Bölgesel ölçekli Maskelenmiş PC2 haritası (Görüntü Tarihi: 18 Mayıs 2001; SLC-on). **b)** Arazi doğrulamalı ROI (Şekil 2b) içindeki PC2 değerlerinin histogramı.



**Figure 6. a)** Regional-scale masked PC2 map derived from Landsat-7 ETM+ Bands 4 and 5 ( $\text{Fe}^{2+}$ -sensitive PCA). (Acquisition Date: 18 May 2001; SLC-on). **b)** Histogram of PC2 values calculated specifically within the field-verified ROI (Fig. 2b).

**Şekil 6. a)** Landsat-7 ETM+ Bant 4 ve 5 kullanılarak türetilen ( $\text{Fe}^{2+}$ -duyarlı PCA) Bölgesel ölçekli Maskelenmiş PC2 haritası (Görüntü Tarihi: 18 Mayıs 2001; SLC-on). **b)** Arazi doğrulamalı ROI (Şekil 2b) içindeki PC2 değerlerinin histogramı.

Compared to the  $\text{Fe}^{3+}$  response, the  $\text{Fe}^{2+}$ -sensitive PC2 (derived from Bands 4 and 5) exhibits lower spectral contrast overall (Figure 6a). While scattered zones of enhanced response appear in mafic-rich domains, these features likely reflect mixed mafic mineralogy rather than distinct alteration, as spectral overlap limits discrimination at 30 m resolution. Within the field-confirmed ROI, PC2 values are notably subdued ( $\mu = 23.02$ ,  $\sigma = 5.02$ , Range: 10–49) (Figure 6b), suggesting that ferrous phases are largely oxidized or overprinted in the most altered surfaces.

The strongest patterns were obtained from the OH-sensitive PC2 (derived from Bands 5 and 7). This component delineates alteration halos compatible with hydroxyl-bearing phyllosilicate assemblages (e.g., kaolinite, smectite, serpentine) around listvenite crusts and volcanic edifices (Figure 7a). Notably, the field-confirmed ROI exhibits a relatively subdued OH response; this

is interpreted to reflect strong silicification and iron-oxide dominance that suppress diagnostic hydroxyl absorption features. Consequently, the ROI histogram appears broad and relatively flat ( $\mu = 27.74$ ,  $\sigma = 2.70$ , Range: 15–35) (Figure 7b), indicating spatially variable hydroxyl signatures in this highly altered domain.

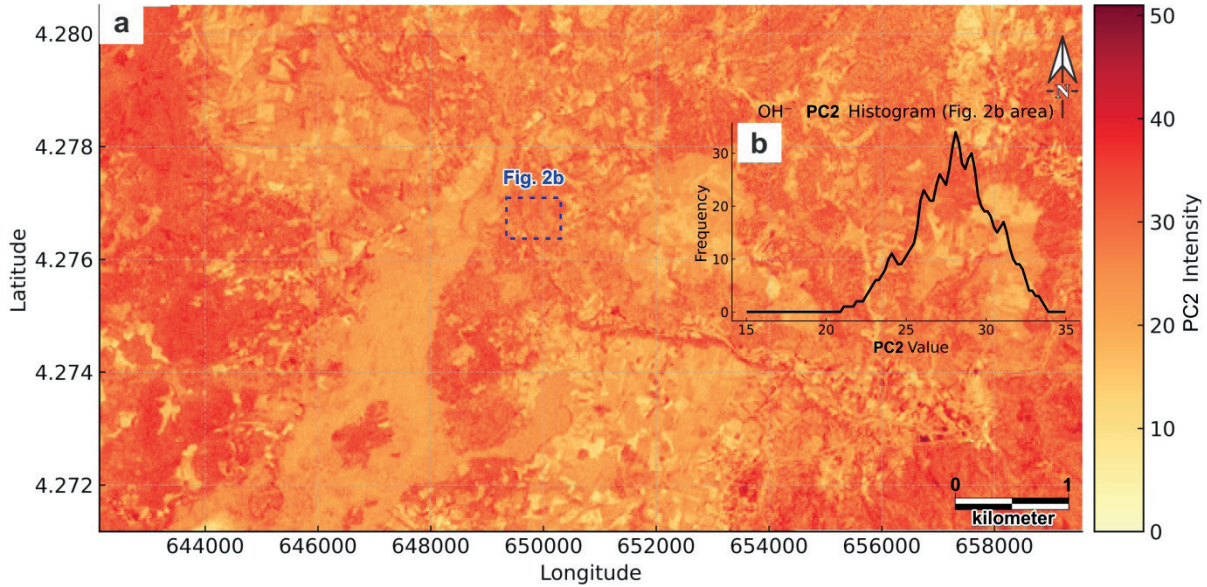
### Additional Indices Supporting PCA-Band Ratio

In addition to PCA analysis, three band-ratio indices were computed for the ROI to highlight spectrally distinct alteration features (Figure 8a–d). The  $\text{Fe}^{3+}$  index map ( $\text{B3}/\text{B2}$ ) emphasizes ferric-oxide contrast, with high values clustering along the eastern margins of the Fsc/Cnz unit and matching field-mapped hematitic coatings (Figure 8a). Lower index values in the sedimentary (Pms) and volcanic (Qbv) units differ from the

alteration zones, consistent with weaker oxidation signatures. The silica index (B7/B5) identifies zones of elevated SWIR2/SWIR1 contrast, with the highest values occurring along the southern boundary of F<sub>sc</sub>/C<sub>nz</sub> where quartz veinlets and siliceous crusts were observed (Figure 8b). The hydroxyl index [B5/(B5 + B7)] highlights clay-rich weathering fronts along the northwestern margins of the CS-Srp unit, whereas the siliceous F<sub>sc</sub>/C<sub>nz</sub> caps exhibit lower values due to the suppression of hydroxyl features (Figure 8c).

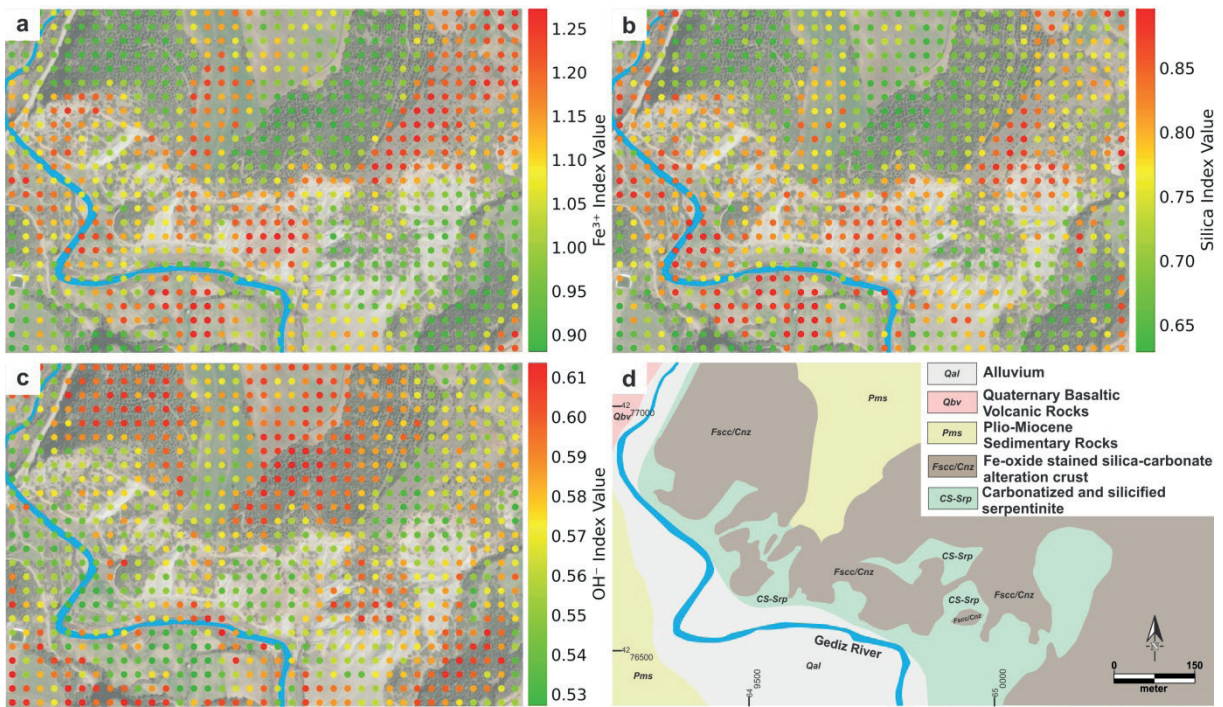
To enhance interpretability, ratio outputs were statistically segmented using mean ( $\mu$ ) and standard deviation ( $\sigma$ ) values derived from the ROI. Pixels above  $\mu + \sigma$  were classified as high anomalies and generally coincide with the most intense alteration surfaces mapped in the field, whereas pixels below  $\mu - \sigma$  represent background domains. When integrated with the lithological framework (Figure 8d), these segmented maps

confirm that spectral signatures are systematically constrained by the lithological and structural controls observed in the field. Quantitative zonal statistics derived from the PC2 datasets further validate this correspondence. For the ferric iron (Fe<sup>3+</sup>) component, the iron-oxide stained F<sub>sc</sub>/C<sub>nz</sub> unit exhibits a significantly elevated mean value ( $\mu = 46.81$ ), with approximately 58.8% of its area classified as high anomaly ( $> \mu + \sigma$ ). In sharp contrast, the underlying CS-Srp unit has a much lower mean response ( $\mu = 38.97$ ) with only 8.1% of pixels exceeding the anomaly threshold, quantitatively confirming the method's efficacy in discriminating the alteration cap from the host rock. Furthermore, the hydroxyl (OH<sup>-</sup>) response is slightly suppressed in the F<sub>sc</sub>/C<sub>nz</sub> unit (14.2% anomaly coverage) compared to the CS-Srp unit (17.9%), consistent with the masking of phyllosilicate features by intense silicification and iron-oxide coatings.



**Figure 7. a)** Regional-scale masked PC2 map derived from Landsat-7 ETM+ Bands 5 and 7 (OH<sup>-</sup>/phyllosilicate-sensitive PCA). (Acquisition Date: 18 May 2001; SLC-on). **b)** Histogram of PC2 values calculated specifically within the field-verified ROI (Fig. 2b).

**Şekil 7. a)** Landsat-7 ETM+ Bant 5 ve 7 kullanılarak türetilen (OH<sup>-</sup>/fillosilikat-duyarlı PCA) Bölgesel ölçekli Maskelenmiş PC2 haritası (Görüntü Tarihi: 18 Mayıs 2001; SLC-on). **b)** Arazi doğrulamalı ROI (Şekil 2b) içindeki PC2 değerlerinin histogramı.



**Figure 8.** Band-ratio index maps overlaid on Fig. 2b ROI: **a)**  $Fe^{3+}$  index ( $B3/B2$ ) (unitless), **b)** silica index ( $B7/B5$ ) (unitless), **c)**  $OH^-$  index ( $B5/(B5 + B7)$ ) (unitless), and **d)** geological map of the ROI with lithological boundaries and unit labels (adapted from Akbulut et al., 2024). (Landsat-7 ETM+ Acquisition Date: 18 May 2001; SLC-on).

**Şekil 8.** Şekil 2b ROI üzerinde bant-oranı indeks haritaları: **a)**  $Fe^{3+}$  indeksi ( $B3/B2$ ), **b)** silis indeksi ( $B7/B5$ ), **c)**  $OH^-$  indeksi ( $B5/(B5 + B7)$ ), **d)** ROI'nin litolojik sınırlarını ve birim etiketlerini gösteren jeoloji haritası (Akbulut vd. 2024'ten uyarlanmıştır).

## DISCUSSION AND CONCLUSION

Methodologically, the results confirm that targeted selective PCA plus  $\mu \pm \sigma$ -segmented indices is a robust, scalable approach for rapid screening in complex ophiolitic–volcanic terrains. ROI masking prior to PCA increases signal-to-noise by excluding non-diagnostic spectral variability, while ratio-based thresholds translate continuous gradients into operationally interpretable classes that can be ranked for field validation or geochemical sampling (Liu et al., 2011; Tangestani and Moore, 2001). Nevertheless, several limitations must be acknowledged. First, the Landsat 7 ETM+ sensor lacks a dedicated spectral band in the 0.9–1.0  $\mu m$  range (unlike ASTER Band 4), which significantly limits its sensitivity to the diagnostic crystal field absorptions of ferrous iron ( $Fe^{2+}$ ) minerals. Additionally, multispectral (30

m) spatial resolution promotes sub-pixel mixing in thin alteration veneers; strong  $Fe^{3+}$  coatings can spectrally dominate over  $Fe^{2+}$  and OH features, and shadow/moisture in valley floors can mask weak anomalies along the Gediz fluvial corridor. These caveats explain muted hydroxyl responses in the most silicified listvenite caps and the under-expression of  $Fe^{2+}$  where oxidation is advanced (van der Meer et al., 2012).

While this workflow offers a robust, zero-cost solution for regional exploration, practitioners must acknowledge that the spectral signatures can be masked by environmental factors such as dense vegetation cover, extensive lichen growth, or desert varnish on rock surfaces. In these scenarios, or where detailed mineralogical discrimination (e.g., distinguishing specific clay species) is required, the broad bandwidths of Landsat ETM+

may be insufficient. In these cases, sensors with higher spectral resolution, such as ASTER (SWIR/TIR) or commercial high-spatial-resolution platforms like WorldView-3, are preferable alternatives, albeit at the expense of data cost and processing complexity. Therefore, the proposed Landsat-based method is best utilized as a first-pass screening tool to prioritize targets for more capital-intensive follow-up surveys.

A sensor-to-sensor comparison using Landsat-8/9 OLI (and Sentinel-2) remains a logical next step for monitoring modern surface changes, but it requires sensor-specific selective PCA tuning and threshold re-derivation to ensure consistent PC behavior across instruments. Looking forward, pairing Landsat-class VNIR–SWIR coverage with higher spectral-fidelity SWIR/TIR (e.g., ASTER TIR and archival ASTER SWIR scenes acquired prior to 2008) or contemporary multispectral–hyperspectral assets would sharpen mineral discrimination (e.g., kaolinite vs. illite vs. serpentine; silica polymorphs) and further deconvolve ferric coatings from clay signatures. Recent workflows that merge Landsat-8 with ASTER exploit complementary bands to enhance alteration mineral mapping and lineament analysis, an approach well suited to the Kula domain (Orynassarova et al., 2025).

In conclusion, ROI-masked selective PCA isolated ferric-iron and hydroxyl-bearing anomalies that correspond closely with field-mapped Fsc/Cnz caps and CS-Srp units, whereas Fe<sup>2+</sup> responses were weak where oxidation is advanced (Tangestani and Moore, 2001). The  $\mu \pm \sigma$ -segmented Fe<sup>3+</sup> ( $> 1.15$ ), silica ( $> 0.775$ ), and OH<sup>-</sup> ( $> 0.591$ ) indices provided objective thresholds that validate PCA outputs and revealed additional targets for ground verification (Enoh et al., 2021). The mapped alteration architecture is consistent with listvenite formation pathways and highlights sites of potential economic and CCS-relevant interest in the Kula ophiolitic mélange (Uçurum, 2000; Akbulut et al., 2024).

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the reviewers for their constructive comments that enhanced the quality of the paper. We are also sincerely grateful to Onur Altun for his assistance with the remote sensing data processing and fieldwork.

## DATA AVAILABILITY STATEMENT

**Data Availability Statement** The satellite imagery data that support the findings of this study are openly available from the U.S. Geological Survey (USGS) EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>), specifically the Landsat 7 ETM+ scene acquired on 18 May 2001 (SLC-on). The vector data (ROI shapefiles), calculated zonal statistics spreadsheets, and the detailed processing parameters supporting the conclusions of this article are available from the corresponding author upon reasonable request.

## GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

*Bu çalışma, Batı Türkiye'deki Kula bölgesinde yer alan Vezirler ofiyolitik melanjündeki listvenit tipi silis-karbonat alterasyon zonlarını haritalamak amacıyla, düşük maliyetli ve bütünlük bir uzaktan algılama iş akışının etkinliğini değerlendirmektedir. Altun, gümüş ve kobalt gibi ekonomik potansiyellerinin yanı sıra küresel iklim krizi ile mücadelede doğal Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) süreçlerinin analogları olmaları sebebiyle bertaraf stratejilerinin geliştirilmesi için de önem taşıyan bu mineralizasyonların belirlenmesi ve haritalanması önemlidir. Çalışma, özellikle vejetasyon ve alüvyal örtüden kaynaklanan spektral karışıklıkları minimize ederek, demir oksit ve hidroksil içeren alterasyon şapkalılarını (demir şapkalıları) serpantinleşmiş yan kayaçlardan ayırt etmeyi hedeflemiştir.*

*Yöntem olarak, antropojenik bozulmanın en az olduğu dönemi temsil etmesi nedeniyle 18 Mayıs 2001 tarihli, tarama hatası içermeyen (SLC-on) bir Landsat-7 ETM+ görüntüsü kullanılmıştır. Ofiyolitik arazilerde sıkça karşılaşılan spektral*

gürültüyü gidermek amacıyla, Gediz Nehri koridorunu ve tarımsal alanları dışlayan litoloji tabanlı bir “İlgi Alanı (ROI)” maskeleyme stratejisi uygulanmıştır. Bu maskelenmiş veri seti üzerinde, Crosta Tekniğine dayalı Seçici Temel Bileşenler Analizi (Selective PCA) ve tamamlayıcı bant oranlama yöntemleri ( $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $OH^-$  ve Silis) uygulanmıştır. Elde edilen spektral anomaliler, arazi çalışmaları ve petrografik/XRD verileriyle (Akbulut vd., 2024) doğrulanmış; sonuçlar Ortalama  $\pm$  Standart Sapma ( $\mu \pm \sigma$ ) eşik değerleri kullanılarak istatistiksel olarak sınıflandırılmıştır. Hassasiyet analizleri,  $\mu \pm 1.0\sigma$  eşik değerinin, gürültü (yanlış pozitifler) ile gerçek jeolojik sınırları ayırmada en optimum aralık olduğunu göstermiştir.

Elde edilen bulgular, ROI maskeli Seçici PCA yönteminin alterasyon zonlarını ayırt etmede yüksek bir başarı sağladığını göstermektedir. Özellikle  $Fe^{3+}$  duyarlı PC2 bileşeni (Bant 1 ve 3'ten türetilen), arazide gözlenen hematit kaplı demirli silis şapkaları ( $F_{sc}/C_{nz}$ ) ile güçlü bir mekansal uyum sergilemiştir. Bölgesel istatistiksel analizler (Zonal Statistics), yöntemin başarısını nicel olarak da kanıtlamaktadır: Hedeflenen alterasyon şapkası ( $F_{sc}/C_{nz}$ ) ortalama  $\mu=46,81$  değeriyle alanın %58,8'inde “Yüksek Anomali” verirken, altere olmamış serpantin yan kayacında ( $CS-Srp$ ) bu oran sadece %8,1 olarak hesaplanmıştır. Aradaki bu belirgin fark, yöntemin hedef kütleyi yan kayaçtan başarıyla ayırdığını doğrulamaktadır. Buna karşın,  $Fe^{2+}$  anomalileri (Bant 4 ve 5), Landsat sensörünün spektral çözünürlük kısıtları ve yüzeydeki yoğun oksidasyon örtüsü nedeniyle daha sınırlı bir tespit başarısı göstermiştir. Hidroksil ( $OH^-$ ) haritalaması ise fillosilikatça zengin zonları belirlemiş, ancak yoğun silisleşmiş şapka kısımlarında kil minerallerinin bozulması veya maskelenmesi nedeniyle anomali değerlerinin beklendiği üzere düştüğü (%14,2) gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, dışlayıcı maskeleyme ve hedefe yönelik PCA teknikleriyle işlenen Landsat-7 verilerinin, yarı kurak ofiyolitik

kuşaklarda listvenit arama çalışmaları için sağlam ve maliyet etkin bir tarama aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Yöntem, özellikle demirce zengin alterasyon şapkalarını çevre kayalardan istatistiksel olarak anlamlı bir doğrulukla ayırabilmektedir. Çalışma, belirlenen spektral eşik değerlerinin saha çalışmalarını önceliklendirmek için objektif bir kriter sağladığını göstermekle birlikte; gelecekteki çalışmalarda spesifik kil türlerinin veya düşük tenörlü  $Fe^{2+}$  minerallerinin ayırımı için ASTER (SWIR/TIR) veya WorldView-3 gibi daha yüksek spektral çözünürlüklü sensörlerin entegre edilmesini önermektedir.

## ORCID

Semih Eski  <https://orcid.org/0000-0002-2526-2571>

Mehmet Akbulut  <https://orcid.org/0000-0002-4869-5249>

## REFERENCES / KAYNAKLAR

- Abrams, M. J., Brown, D., Lepley, L. & Sadowski, R. (1983). Remote sensing for porphyry copper deposits in Southern Arizona. *Economic Geology*, 78, 591-604. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.4.591>
- Akbulut, M., Pişkin, Ö. & Göncüoğlu, M. C. (2006). Genesis of the carbonatized and silicified rocks (listwaenites) as a result of alteration of ultramafics, Mihaliççık region, NW Turkey. *Geological Journal*, 41(5), 557-580. <https://doi.org/10.1002/gj.1058>
- Akbulut, M., Tokcaer, M. & Büçkün, Z. (2024). Carbonatization and silicification of peridotites within the Vezirler ophiolitic mélange (Kula-Manisa, Western Türkiye): A natural analogue for CO<sub>2</sub> sequestration. *Ofioliti*, 49(2). <https://doi.org/10.4454/ofioliti.v49i2.569>
- Aydal, D. (1990). Gold-bearing listwaenites in the Arac massif, Kastamonu, Turkey. *Terra Nova*, 2, 43-52. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1990.tb00035.x>
- Aydal, D., Vural, A., Taşdelen, İ. U. & Aydal, E. G. (2007). Alakeçi-Kısacık (Bayramiç-Balıkesir) Cevherleşme Bölgesinin Landsat 7 Etm+ Kullanılarak Crosta Tekniği ile İncelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 22(3), 29-40.

- Aytaç, A. S. & Demir, T. (2023). The Kula–Salihli UNESCO Geopark: Spectacular records of Quaternary volcanism, fluvial and landscape evolution and Quaternary environmental change. *Proceedings of the Geologists' Association*, 134(4), 416–431. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2022.08.002>
- Barbot, S. & Weiss, J. R. (2021) Connecting subduction, extension and shear localization across the Aegean Sea and Anatolia. *Geophysical Journal International*, 226(1), 422–445. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab078>
- Barka A. A. (1992). The north Anatolian Fault Zone. *Annales Tectonicae*, 6, 164–165.
- Binal, A. & Ercanoğlu, M. (2010). Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) Geopark Region. *Environmental Earth Sciences*, 61(7), 1361–1373. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0454-1>
- Bishop, J. L., Fröschl, H. & Mancinelli, R. L. (1998). Alteration processes in volcanic soils and identification of exobiologically important weathering products on Mars using remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, 103(E13): 31457–31476. <https://doi.org/10.1029/1998JE900008>
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey – a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 3–30. [https://doi.org/10.1016/S0985-3111\(01\)01066-X](https://doi.org/10.1016/S0985-3111(01)01066-X)
- Boztuğ, D., Harlavan, Y., Arslan, M. & Temizel, I. (1994). Geological setting, mineralogy and precious metal content of the listwaenitic rocks in the Alacahan region, SE Sivas. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture, Çukurova University, Special issue*, 163–177.
- Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 62(9), 1025–1035.
- Çiftçi, Y. (1998). Metalogeny of the ophiolites in the İmranlı–Refahiye area. In *Symposium of Geology and Geophysics of the First 50 Years of the Republic of Turkey* (Abstract, p. 91).
- Colman, S. M. (1982). Chemical weathering of basalts and andesites: Evidence from weathering rinds. *Geological Society of America Bulletin*, 93(4), 322–334. <https://doi.org/10.3133/pp1246>
- Crosta, A. P. & Moore, J. M. (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A prospecting case history in greenstone belt terrain. In *9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada. Ann Arbor (MI): ERIM*, 1173–1187.
- Enoh, M. A., Njoku, R. E. & Igbokwe, E. C. (2021). Geospatial interpretation of onshore hydrocarbon micro-seepage induced alterations in soils and sediments by spectral enhancement techniques. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 16(3), 307–313. <https://doi.org/10.18280/ijdne.160309>
- Ercan, T. (1981). *Kula Yöresinin Jeolojisi ve Volkanitlerin Petrolojisi [Geology of Kula Region and Petrology of Volcanics]* [Unpublished Doctoral Dissertation, Phd Thesis]. Istanbul University.
- Ercan, T. & Öztunalı, Ö. (1982). Characteristic features and “base surges” bed forms of Kula volcanics. *Türkiye Jeoloji Bülteni (Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni)*, 25(2), 117–125. [https://jmo.org.tr/resimler/ekler/ec31f2fd081e5a3\\_ek.pdf](https://jmo.org.tr/resimler/ekler/ec31f2fd081e5a3_ek.pdf)
- Ercan, T., Günay, E., Dinçel, A., Türkecan, A. ve Küçükayman, A. (1980). *Kula-Selendi Yörelerinin Jeolojisi ve Volkanitlerin Jeolojisi* (Rapor No: 6801). MTA Raporu.
- Ercan, T., Fujitani, T. & Matsuda, J-I. (1992). Kula (W. Anatolia) Quaternary volcanism: Petrology and geochemistry. *Geologica Balcanica*, 22(5), 45–56.
- Erkan, K. (2015). Geothermal investigations in western Anatolia using equilibrium temperature logs from shallow boreholes. *Solid Earth*, 6, 103–119. <https://doi.org/10.5194/se-6-103-2015>
- Erlar, A. & Larson, L. T. (1990). Genetic classification of gold occurrences of the Aegean region of Turkey. In M. Y. Savaşçın & A. H. Eronat (Eds.), *Proceedings of the International Earth Sciences Congress on Aegean Regions (IESCA-1990)* (Vol. 2, pp. 12–23). Dokuz Eylül University.
- Genç, Y., Aydın, N. & Tüysüz, N. (1990). Listwaenites related to Narman Hg–Sb mineralization in the

- eastern Pontides of NE Turkey. In *Proceedings of the International Earth Sciences Congress on Aegean Regions (IESCA-1990)* (Vol. 1, p. 399). Dokuz Eylül University.
- Gomboš, M. (2012). The Impact of Clay Minerals on Soil Hydrological Processes. In: Valášková, M. & Martynková, G.S. (Eds.), *Clay Minerals in Nature-Their Characterization, Modification and Application* (pp. 119–147). InTechOpen, Rijeka. <https://doi.org/10.5772/47748>
- Heineke, C., Niedermann, S., Hetzel, R. & Akal, C. (2016). Surface Exposure Dating of Holocene Basalt Flows and Cinder Cones in The Kula Volcanic Field (Western Turkey) Using Cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>10</sup>Be. *Quaternary Geochronology*, 34, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.04.004>
- Johnson, K. E. & Koperski, K. (2017). WorldView-3 SWIR land use land cover mineral classification: Cuprite, Nevada. Proceedings of Pecora 20 – Observing a Changing Earth; Science for Decisions Monitoring, Assessment, and Projection (Sioux Falls, SD, 13–16 November 2017). *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, 7 s.
- Jones, H. L. (1929). *Strabo: Geography, Volume VI (Books 13–14)*. Loeb Classical Library 223. Cambridge, MA: Harvard University Press; London: William Heinemann.
- Kayadibi, Ö. (2008). Mineral Haritalamada Bant Oranlama ve Crosta Metotları ile Elde Edilen Sonuçların Jeostatistiksel Olarak Karşılaştırılması. II. *Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2008)*, 13–15 Ekim, Kayseri (Erciyes Üniversitesi).
- Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A. & Calagari, A. A. (2020). Synergetic use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(2), 311–328. <https://doi.org/10.13168/agg.2020.0023>
- Kılıç, G., Aydoğan, M. S. & Kumral, M. (2018). Preliminary results of the radiolarian-chert hosted manganese deposit within the Vezirler ophiolitic mélange (Kula-Manisa, western Turkey): constraints on the origin, paleo-redox conditions, and depositional environments. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), Article 628. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3984-6>
- Koç, F. & Kadioğlu, Y. K. (1996). Mineralogy, geochemistry and precious metal content of Karacakaya (Yunusemre–Eskişehir) listwaenites. *Ofoliti*, 21(2), 125–130.
- Larson, L. T., & Erler, A. (1992). Geologic settings and geochemical signatures of twenty-two precious metal prospects in Turkey. In *International Symposium on Eastern Mediterranean Geology* (No. 20, pp. 9–28).
- Leo, G. W., Önder, E., Kılıç, M. & Avcı, M. (1978). *Geology and mineral resources of the Kuluncak–Sofular area (Malatya, K-39a1 and K-39a2 quadrangles), Turkey*. (U.S. Geological Survey Bulletin, 1429). U.S. Geological Survey.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Liu, L., Zhuang, D., Zhou, J. & Qiu, D. (2011). Alteration mineral mapping using masking and Crosta technique for mineral exploration in mid-vegetated areas. *International Journal of Remote Sensing*, 32(7), 1931–1944. <https://doi.org/10.1080/01431161003639678>
- Moix, P., Beccalotto, L., Kozur, H. W., Hochard, C., Rosselet, F. & Stampfli, G. M. (2008). A new classification of the Turkish terranes and sutures and its implication for the paleotectonic history of the region. *Tectonophysics*, 451(1–4), 7–39. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.044>
- Orynassarova, E., Ahmadi, H., Adebiet, B., Bekbotayeva, A., Abdullayeva, T., Beiranvand Pour, A., Ilyassova, A., Serikbayeva, E., Talgarbayeva, D. & Bermukhanova, A. (2025). Mapping alteration minerals associated with Aktogay porphyry copper mineralization in eastern Kazakhstan using Landsat-8 and ASTER satellite sensors. *Minerals*, 15(3), Article 277. <https://doi.org/10.3390/min15030277>
- Oygür, V. & Erler, A. (1999). Intra-plate related carbonatite-hosted bastnaesite-fluorite-barite deposits at the Kızılcaören carbonatite complex, NW Anatolia, Turkey. In *Proceedings of the fifth biennial SGA meeting and the tenth quadrennial IAGOD symposium* (Vol. 1, pp. 225–228).

- Reçber, A., Karakaya, N. & Yavuz, F. (1997). Opal occurrences in the listwaenites. In *10th annual meeting of the Mineralogical Society of Turkey* (Abstracts, p. 9).
- Rencz, A. N. & Ryerson, R. A. (1999). *Manual of Remote Sensing. Volume 3: Remote sensing for the Earth sciences* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Richardson-Bunbury, J. M. (1996). The Kula volcanic field, western Turkey: The development of a Holocene alkali basalt province and the adjacent normal-faulting graben. *Geological Magazine*, *133*(3), 275–283.
- Richardson-Bunbury, J. M., Hall, L., Anderson, G. J. & Stannard, A. (2001). The determination of fault movement history from the interaction of local drainage with volcanic episodes. *Geological Magazine*, *138*(2), 185–192. <https://doi.org/10.1017/S0016756801005271>
- Segal, D. (1982). Theoretical basis for differentiation of ferric-iron bearing minerals, using Landsat MSS data. In: *Proceedings of the Symposium for remote sensing of environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology*, Fort Worth, TX (pp. 949-951).
- Şen, E. (2002). Kula Bölgesi (*Batı Anadolu, Türkiye*) *Volkanizmasının Volkanolojik-Petrolojik Gelişiminin İncelenmesi* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Şengör, A. M. C., Görür, N. & Şaroğlu, F. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In Biddle, K. & Christie-Blick, N. (Eds.), *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, *37*, 227-264. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211>
- Silva, I. M. G., Moura, W. A., Correia, O. & Souza Neto, J.A. (2020). Early evidence of pyrometamorphism and a late hydrothermal alteration related to Albian volcanism in the Pernambuco sedimentary basin, northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, *104*, Article 102907. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102907>
- Tangestani, M. H. & Moore, F. (2001). Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: A case study, Meiduk area, Kerman, Iran. *Canadian Journal of Remote Sensing*, *27*(2), 176–182. <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854931>
- Tokçaer, M., Agostini, S. & Savaşçın, M. Y. (2005). Geotectonic setting and origin of the youngest Kula volcanics (Western Anatolia), with a new emplacement model. *Turkish Journal of Earth Sciences*, *14*(2), 143–166.
- Tüysüz, N. & Erler, A. (1993). Geochemistry and evolution of listwaenites in the Kağızman region (Kars, NE Turkey). *Chemie der Erde*, *53*, 315–329.
- Uçurum, A. (1996). *Geology, geochemistry and mineralization of the silica-carbonate alteration (listwaenite) from Late Cretaceous ophiolitic mélanges at Cüre–Divriği (Sivas Province) and at Güvenç, Karakuz–Hekimhan (Malatya Province), Central East Turkey* [Unpublished doctoral dissertation]. University of Nevada, Reno.
- Uçurum, A. (2000). Listwaenites in Turkey: Perspectives on formation and precious metal concentration with reference to occurrences in east-central Anatolia. *Ofioliti*, *25*(1), 15–29.
- Uçurum, A. & Larson, L. T. (1999). A gold-bearing listwaenite at the Kızıltepe ophiolite, SW Turkey. In *Proceedings of the fifth biennial SGA meeting and the tenth quadrennial IAGOD symposium* (Vol. 2, pp. 841–844).
- Üner, T. (2020). Listwaenitization and enrichment of precious metals in the hydrothermal mineralization zones of serpentinites in Sugeçer (Van, Eastern Anatolia, Turkey). *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, *20*(1), 68–79. <https://doi.org/10.1144/geochem2018-087>
- van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A., van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., van der Meijde, M., Carranza, E. J. M., de Smeth, J. B. & Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *14*(1), 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>
- van Gorp, W., Maddy, D., Bridgland, D. R., Demir, T. & Veldkamp, A. (2013). Fluvial response to

Holocene volcanic damming and breaching in the Gediz and Geren rivers, western Turkey. *Geomorphology*, 201, 430-448.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.016>

Yavuz, H., Demir, Y., Kasapçı, C., Uysal, İ. & Helvacı, C. (2022). Geology and genesis of the Silica-Listwaenite hosted Kaymaz gold deposit, Eskişehir, NW-Turkey: Implications from fluid inclusions and pyrite chemistry. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, Article 100104.

<https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100104>



**Güney Shetland Yayı (Batı Antarktika) Boyunca Çok Seviyeli Mafik Magma Yerleşimine Karşılaştırmalı Bir Örnek: Dee ve Cecilia İntrüzyonları**  
*A Comparative Example of Multi-Level Mafic Magma Emplacement Along The South Shetland Arc (West Antarctica): The Dee and Cecilia Intrusions*

**Alp Ünal\*** 

*İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
34469, Sarıyer, İstanbul, Türkiye*

• Geliş/Received: 25.12.2025 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 31.03.2026 • Kabul/Accepted: 02.04.2026  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 17.04.2026 • Baskı/Printed: 30.04.2026

*Araştırma Makalesi/Research Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Bu çalışma, Batı Antarktika’da Antarktik Yarımada’nın kuzeyinde yer alan Güney Shetland Adaları boyunca konumlanan Dee ve Cecilia adalarında yüzeyleyen gabroik intrüzyonların yerleşim koşullarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. İntrüzyonların kristallenme sıcaklıkları ve yerleşim basınçları, iki-piroksen jeotermobarometresi kullanılarak hesaplanmış ve bununla beraber Fe–Ti oksit çiftlerinden oksijen fugasitesi koşulları belirlenmiştir.

Petrografik olarak Dee intrüzyonları, plajiyoklaz, klinopiroksen, ortopiroksen ve olivin ve opak minerallerden oluşan, ince taneli ve holokristalen porfirik dokular ile temsil edilmektedir. Buna karşılık Cecilia İntrüzyonu, benzer mineralojik bileşime sahip olmakla birlikte, daha iri taneli holokristalen granüler dokular sergilemektedir. Dee intrüzyonlarında plajiyoklazlar baskın olarak normal zonlanma gösterirken, Cecilia İntrüzyonu’nda plajiyoklaz kristallerinde osilasyonlu ve yer yer ters zonlanmalar ile birlikte elek dokuları ve körfez yapıları izlenmektedir. Yapılan iki-piroksen jeotermobarometre hesaplamaları, Dee intrüzyonlarının yaklaşık 1030–1090 °C kristallenme sıcaklıkları ve 2,5–3,5 kbar basınç aralığı ile üst kabuk seviyelerinde görece sığ yerleşimine işaret etmektedir. Buna karşılık Cecilia İntrüzyonu, 1000–1170 °C aralığındaki kristallenme sıcaklıkları ve 4,5–6,5 kbar basınç değerleri ile orta–alt kabuk seviyelerinde daha derin bir sokulumla karşılık gelmektedir. Fe–Ti oksit barometresi sonuçları, her iki intrüzyonun da oksitleyici redoks koşulları altında kristallendiğini; Cecilia İntrüzyonu’nun Dee’ye kıyasla daha yüksek oksijen fugasitesi değerleri sergilediğini göstermektedir.

Saha, petrografi ve mineral kimyası verileri birlikte değerlendirildiğinde, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının Güney Shetland Yayı boyunca gelişen mafik magmatizmanın kabukta farklı seviyelere yerleşmiş olan üyelerini temsil ettikleri görülmektedir. İleride yapılacak olan yaşlandırma çalışmaları ile bu mafik intrüzyonların kabuk içerisindeki evriminin bölge tektonizması ile ilişkisinin araştırılması mümkün olabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Gabro, Güney Shetland Adaları, jeotermobarometre, mineral kimyası, petrografi.

**Abstract:** This study presents a comparative investigation of the emplacement conditions for gabbroic intrusions exposed on Dee and Cecilia islands, located along the South Shetland Islands to the north of the Antarctic Peninsula in Western Antarctica. Crystallization temperatures and emplacement pressures were calculated using two-pyroxene geothermobarometry, and oxygen fugacity conditions were additionally constrained based on Fe–Ti oxide pairs.

*Petrographically, the Dee intrusions are characterized by fine-grained, holocrystalline porphyritic textures composed of plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene, olivine, and opaque minerals. The Cecilia intrusion displays*

\* Yazışma / Correspondence: alp.unal@itu.edu.tr

*broadly similar mineral assemblage but coarser-grained holocrystalline granular textures. Plagioclase in the Dee intrusions predominantly exhibits normal zoning, whereas plagioclase crystals in the Cecilia intrusion commonly show oscillatory and locally reverse zoning, together with sieve textures and embayment structures. Two-pyroxene geothermobarometric calculations suggest that the Dee intrusions crystallized at temperatures of approximately 1,030–1,090 °C and pressures of 2.5–3.5 kbar, corresponding to relatively shallow upper-crustal emplacement. In contrast, the Cecilia intrusion yields crystallization temperatures of 1,000–1,170 °C and pressures of 4.5–6.5 kbar, consistent with deeper emplacement at mid- to lower-crustal levels. Fe–Ti oxide barometry indicates that both intrusions crystallized under oxidizing redox conditions, with the Cecilia intrusion recording systematically higher oxygen fugacity values relative to the Dee intrusions.*

*When field, petrographic, and mineral chemistry data are evaluated together, the Dee and Cecilia intrusions are interpreted to represent mafic magmatic bodies emplaced at different crustal levels within the South Shetland Arc magmatic system. Future geochronological studies will lead the investigation of the timing of emplacement and further assess the relationship between the crustal evolution of these mafic intrusions and the regional tectonic framework.*

**Keywords:** Gabbro, geothermobarometry, mineral chemistry, petrography, South Shetland Islands.

## GİRİŞ

Yakınlaşan levha sınırlarındaki magmatik etkinlikler, bölgelerin kabuksal evriminde önemli rol oynamaktadır (Ducea vd., 2015; Stern, 2015). Uzun süreli kıtasal yay gelişimi sırasında farklı aralıklarla gelişen magmatizma hem kıtasal kabuğun üst kesimlerine volkanik ürünlerin eklenmesine hem de farklı derinliklere intrüzif kayaçların yerleşimine sebebiyet vermektedir (ör. de Silva vd., 2015; Paterson ve Ducea, 2015). Bu magmatik ürünlerin kökensel ve evrimsel incelenmesinin yanı sıra yerleşim koşullarının belirlenmesi magmatizma-tektonizma ilişkisini anlamada önemli ipuçları sunmaktadır (ör. Schärer vd. 1995; Petford vd., 2000). Özellikle farklı kabuksal seviyelerde yerleşmiş intrüzif kütleler, tektonik olarak aktif bölgelerin kabuksal yapısını ve zaman içerisindeki evrimini ortaya koymada önemli göstergeler olarak değerlendirilmektedir (Annen vd., 2015; Paterson vd., 2016). Bu intrüzyonların yerleşim derinlikleri, kabuğun termal yapısı ve reolojik değişimleri hakkında doğrudan veriler sunmakta ve ilgili tektonik rejimde magmatik yerleşimin özellikle hangi kabuksal seviyelerde yoğunlaştığını ve bu baskın tektonik rejim tarafından nasıl denetlendiğini ortaya koymaktadır (Brown, 2013; Ducea vd., 2017). Dolayısıyla, intrüzif kütlelerin bileşimi ve yerleşim koşullarının birlikte değerlendirilmesi,

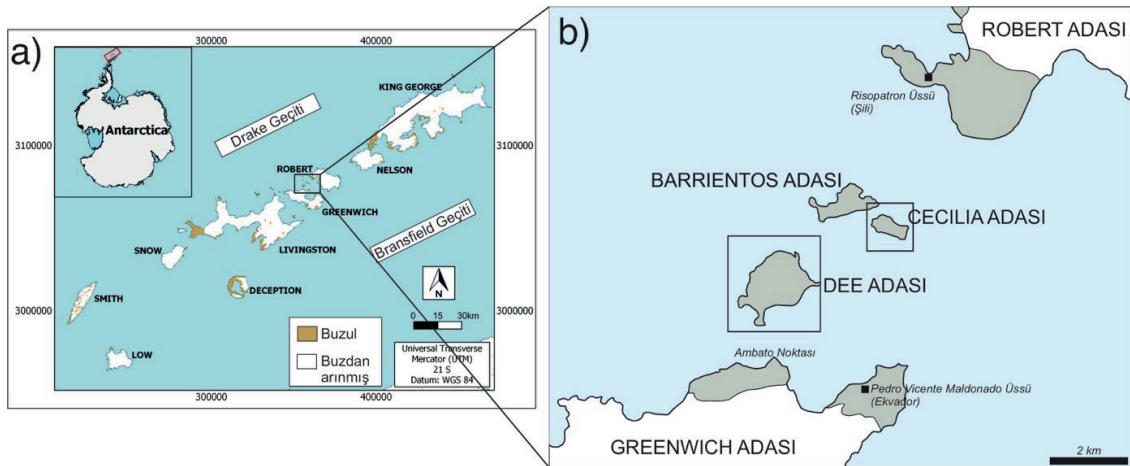
farklı tektonik süreçlerin kabuksal yapısı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında kritik önem taşımaktadır.

Antarktika kıtası, Batı ve Doğu Antarktika olmak üzere iki ana bölüme ayrılmakta ve bu iki bölüm Batı Antarktik Rift Sistemi tarafından birbirinden ayrılmaktadır. Doğu Antarktika, esas olarak Arkeyan–Proterozoik yaşlı metamorfik ve magmatik kayaçlardan oluşan, Prekambriyen’den beri kararlı bir kraton yapısına sahiptir (Jiang vd., 2009 ve oradaki referanslar). Buna karşın, Batı Antarktika ise tektonizma ve ilişkili magmatizma açısından daha hareketli bir geçmişe sahiptir (Jankowski ve Drewry, 1981; Dalziel ve Elliot, 1982; Smellie vd., 1984; Fitzgerald, 2002; Altunkaynak vd., 2018; 2019;2022). Bu çalışmaya konu olan Güney Shetland Adaları da Batı Antarktika’da Antarktik Yarımada’nın kuzeyinde yer alır ve yoğun gelişmiş magmatik etkinliğe ev sahipliği yapar (Şekil 1). Phoenix Levhası’nın Güney Shetland Çukuru boyunca dalması sonucunda uzun soluklu bir magmatik yay gelişmiş ve farklı aralıklarda volkanik ve intrüzif ürünler üretmiştir (ör. Smellie vd., 1984; Kamenov, 2008; Berrocoso vd., 2016; Smellie, 2020; 2021; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025). Bu magmatik ürünler çoğunlukla düşük-orta potasyumlu magmatik kayaçlardan oluşan aktif kıta kenarı tipi bir yay magmatizmasının

temsilci örneklerini oluşturmaktadır. Bölgede günümüze kadar derlenen jeokronolojik veriler, dalma-batma ile ilişkili magmatizmanın ~135 My'dan 23 My'a kadar farklı evreler halinde sürdüğünü ve magmatik etkinliğin Kretase'den sonra zirveye ulaştığını göstermektedir (Leat vd., 1995; Pankhurst ve Smellie, 1983; Riley vd., 2018; Smellie vd., 1984, 2021; Bastias vd., 2023; Altunkaynak vd., 2025; Karlı vd., 2025). Ayrıca geç Miyosen'den günümüze kadar uzanan dönemde, litosferik gerilme evresiyle ilişkili geç evre bazaltik magmaların da üretildiği öne sürülmüştür (Keller vd., 1992; Smellie vd., 2021).

Güney Shetland Adaları'nda son yıllarda tektonizma-magmatizma ilişkisini inceleyen çalışmalar artış gösterse de (ör. Haase vd., 2012; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025; Karlı vd., 2025), bölge boyunca yer alan adalarda bulunan jeokimyasal, izotopik ve jeokronolojik veri noksanlığı hala magmatik yayın evrimi üzerine farklı ve tartışmalı görüşlerin bulunmasına sebep olmaktadır. Bölgede mineral kimyası ve ilişkili magma odası süreçlerini inceleyen çalışmaların hemen hemen hiç olamaması da yine magmatik yay, bu magmatizma esnasında gelişen magma odası koşulları ve akabindeki kabuksal

evrimin anlaşılmasını güç kılmaktadır. Antarktika gibi ulaşımı zor ve saha çalışmalarının görece az yapılabildiği bölgelerden üretilen her analitik veri literatürdeki mevcut tartışmalara ışık tutmak açısından anahtar niteliğindedir. Bu eksikliğin bilincinde yapılan bu çalışmaya konu olan Dee ve Cecilia adaları da Güney Shetland Adaları boyunca yer alan iki büyük ada olan Robert ve Greenwich Adaları arasında konumlanmaktadır (Şekil 1). Literatürde Dee ve Cecilia adalarından herhangi bir jeokimya, jeokronoloji veya mineral kimyası verisi bulunmamaktadır. Yalnızca birkaç temel jeoloji çalışmalarına (Smellie vd., 1984; Dumont vd., 2006) ev sahipliği yapan Dee ve Cecilia adalarında baskın olarak intrüzif ürünler temiz mostralar sunmakta ve bunlara yer yer volkanik ve sınırlı alanlarda sedimanter kayalar eşlik etmektedir. Bu intrüzif kütleler buzdan arınmış, hemen hemen alterasyondan hiç etkilenmemiş ve farklı örneklerin derlenmesine müsaade eden bağımsız kütleler ile temsil olunmaktadır. Dolayısıyla bu kayalar üzerinde yapılacak olan petrografi ve mineral kimyası çalışmaları ve akabinde hesaplanacak olan yerleşim koşullarının belirlenmesi açısından temsilci bir bölge niteliğindedir.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritaları: a) Güney Shetland Adaları'nı gösteren harita (Petsch vd., 2022'den uyarlanmıştır); b) Dee ve Cecilia adalarının konumu

Figure 1. Location maps of the study area: a) map showing the South Shetland Islands (adapted from Petsch et al., 2022); b) location of Dee and Cecilia islands.

Bu çalışma ile ilk defa Dee ve Cecilia intrüzyonlarının detaylı saha, petrografik ve mineral kimyası verileri sunulmaktadır; (i) magmanın kristallenme sürecinde etkili olan sıcaklık, basınç ve oksijen fugasitesi koşullarının belirlenmesi ve (ii) bu verilerin jeolojik gözlemlerle birleştirilerek intrüzyonların yerleşim derinliklerinin belirlenmesi ve kabuk içerisinde geçirmiş oldukları evrime yaklaşımda bulunulması amaçlanmaktadır.

## BÖLGESEL JEOLJİ

Güney Shetland Adaları, Antarktik Yarımadası'nın kuzeybatısında, yaklaşık 300 km boyunca NE–SW doğrultusunda uzanan ve 11 büyük adadan oluşan bir ada zinciridir. Bu takımda, Phoenix Levhası'nın Güney Shetland Çukuru boyunca Antarktika levhasının altına dalması sonucu gelişmiş yay magmatizmasının ürünüdür. Bu dalma-batma süreci Geç Jura'dan itibaren etkin olmuş ve Tersiyer boyunca volkanik ve plütonik kayaların oluşumuna yol açmıştır (ör. Smellie vd., 1984; Kamenov, 2008; Haase vd., 2012; Berrocoso vd., 2016; Smellie, 2020; 2021; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025). Güney Shetland Adaları, yaklaşık 30 km kalınlığa sahip kıtasal kabuk üzerinde konumlanmakta ve Bransfield Çukuru gibi genişlemeyle ilişkili yapılarla sınırlanan Güney Shetland mikro-levhasının bir parçasını oluşturmaktadır (Guterch vd., 1985; Keller vd., 1992). Güney Shetland Adaları, metamorfik ve sedimanter temel kayaların üzerine gelen volkanik, hipabisal ve plütonik kayalar birliklerinden meydana gelir. Bölgedeki jeolojik kayıtlar, dalma-batma süreçleriyle ilişkili yay magmatizmasının yanı sıra, sonraki dönemlerde dilim gerilemesi (slab roll-back) ve litosferik genişleme ile ilişkili tektonik olayların izlerini de yansıtmaktadır (Keller vd., 1992; Haase vd., 2012).

Güney Shetland takımadalarının hemen hemen ortasında yer alan Dee ve Cecilia adaları, büyük iki ada olan Greenwich ve Robert

adalarının arasında konumlanmaktadır. Greenwich Adası'nın kuzeyinde, 62°25'G ve 59°47'B koordinatlarında yer alan Dee adası, yaklaşık 2 km<sup>2</sup>'lik bir yüzölçümüne sahiptir. Cecilia adası ise 62°24'G ve 59°42'B koordinatlarında yer alır ve yaklaşık 1 km<sup>2</sup>'lik yüz ölçümü ile Dee adasının hemen doğusunda konumlanır. Bu iki adada da magmatik ürünler yaygın olarak yer almaktadır. Bu ürünler baskın olarak intrüzif kayalar ile temsil edilmekte ve bunlara volkanik ürünler ve yer yer sedimanter kayalar da eşlik etmektedir. Literatürde Dee ve Cecilia adaları magmatik kayalarından herhangi bir radyometrik yaş verisi bulunmamaktadır. Güneyinde yer alan Greenwich Adası'ndan da radyometrik yaş tayinleri oldukça sınırlıdır. Mevcut yaş tayinlerinin büyük bir kısmı adanın batı ve doğu uçlarında yer alan volkanik kayalardan elde edilmiştir (ör. Pankhurst ve Smellie, 1983; Machado vd., 2005). Bununla birlikte, bölgedeki intrüzif kayalara yönelik herhangi bir yaşlandırma çalışması henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu limitli yaş verileri, K-Ar yöntemine göre Greenwich adası volkanik ürünlerinin yaşını 82-80 My olarak vermektedir (Pankhurst ve Smellie, 1983; Haase vd., 2012). Dee ve Cecilia adalarının hemen kuzeyine yer alan Robert Adası'ndan ise görece daha fazla yaş verisi bulunmaktadır. Hem volkanik ürünler hem de intrüzyonlar yaşlandırılmış olup elde edilen Ar-Ar ve K-Ar yaşları 96 ile 78 My arasında değişmektedir (Pankhurst ve Smellie, 1983; Smellie vd., 1984; Karlı vd., 2025). Bu yaşlar da Üst Kretase dönemine denk gelmektedir. Yakın tarihli bir çalışma olan Zheng vd., (2022) ise Robert Adası'nın doğusundan Erken Eosen yaşı elde etmiştir. Bu benzer Eosen yaşları, Greenwich Adası'nın güneyinde yer alan Livingston Adası'nın doğusundan da elde edilmiştir (Altunkaynak vd., 2025). Dee ve Cecilia adalarının konumuna bakıldığında, bölgesel korelasyon ile adalardaki magmatik ürünlerin Üst Kretase – Eosen aralığında gelişmiş olabileceği düşünülmektedir. Ancak net bir sonuç için güncel yöntemler ile yapılacak olan jeokronoloji çalışmaları önem teşkil etmektedir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

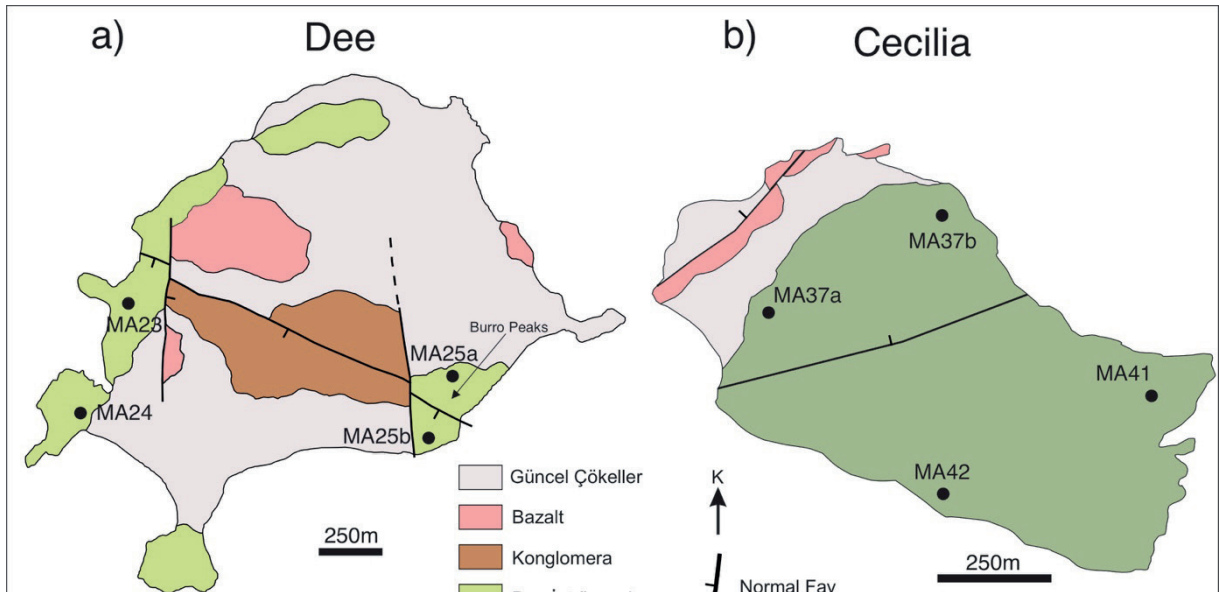
Saha çalışmaları 8. Ulusal Antarktika Bilim Seferi kapsamında Türkiye-Ekvador ikili iş birliği çerçevesinde 2024 Şubat ayında toplamda 15 günlük süre ile gerçekleştirilmiştir. Bu esnada Ekvador Pedro Vicente Maldonado Üssü'nde (Greenwich Adası) konaklanılarak çalışma alanları olan Dee ve Cecilia adalarına deniz yolu ile ulaşım sağlanmıştır. Alınan kayaç numuneleri de yazar tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne ulaştırılmıştır. Bu kayaçlardan alınan ince kesitler İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarı'nda hazırlanmış ve Leica ICC50 W model mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Mineral kimyası analizleri Ludwig-Maximilians Üniversitesi Üniversitesi Yer ve Çevre Bilimleri Bölümü'nde bulunan Cameca SX100 elektron prob mikroanalizörü (EPMA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, beş adet dalga boyu ayırımı dedektör (WDS) ile donatılmış olup, periyodik tablodaki çok sayıda elementin tahribatsız ve nicel analizine olanak sağlamaktadır. EPMA analizleri hem kütle matrisinde hem de inklüzyonlar, tane sınırları ve mikro bileşenler gibi mikro ölçekli fazlarda yüksek yanal çözünürlükte yürütülmüştür. Analiz koşulları, incelenen minerallerin özelliklerine bağlı olarak optimize edilmiştir. İnce taneli veya ışın duyarlılığı yüksek fazlarda, elektron demeti kaynaklı ısınma ve alkali element göçünü en aza indirmek amacıyla düşük ivmelendirme gerilimi ve düşük demet akımı kullanılmıştır. Özellikle alkali bakımından zengin silikat fazlarında, ölçüm sırasında element mobilitesini sınırlamak için düşük akım yoğunlukları tercih edilmiştir. Analizler, alkali kaybını en aza indirmek amacıyla 15 kV ivmelendirme voltajında, 10 µm çapında odak dışı elektron demeti ve 5 nA demet akımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için vollastonit (Ca), periklaz (Mg), hematit (Fe), doğal ortoklaz (Al, K) ve albit (Na, Si) standartları kullanılmıştır.

## BULGULAR

### Saha Özellikleri

Dee Adası'nda baskın olarak intrüzif kayaçlar yüzeylemektedir (Şekil 2a). Bu kayaçlar adanın özellikle güney doğu ve batı- güney batı uçlarında yer alan bağımsız intrüzyonlar ile karakterizedir. Bu intrüzyonlar, özellikle Antarktika koşulları göz önüne alındığında görece az alterasyon gösteren ve rahat örneklemenin yapılabildiği intrüzyonlardır. Adanın güney doğu ucunda yer alan intrüzyon yaklaşık olarak 100 m yüksekliğinde iki tepe oluşturmaktadır. Görece olarak yüksek olan bu yükselti Burro Peaks Yükseltisi olarak isimlendirilmektedir (Şekil 3a) ve çıplak gözle plajiyoklaz, piroksen ve olivin minerallerinin izlenebildiği ve holokristalen dokusunun tanımlanabildiği alterasyondan arınmış gabroik bir intrüzyon ile karakterize olmaktadır (Burro Peaks İntrüzyonu, Ünal, (2025)). Bu intrüzyon, uzaktan dahi belirgin olan iyi gelişmiş çatlak sistemleri sunmaktadır (Şekil 3b). Bu çatlaklar birbirlerine dik gelişmiş üç yönlü sistematik çatlaklar ile temsil edilirler ve yalnızca bu intrüzyonda gözlemlenmektedir. Dolayısıyla intrüzyonun yerleşimi esnasında gelişmiş olmaları muhtemeldir. İntrüzyonun dokanak ilişkilerine bakıldığında, yalnızca batı sınırı boyunca sedimanter kayaçlar ile dokanak halinde olduğu saptanmıştır. Yaklaşık K-G gidişli bir normal fay ile temsil edilmekte olan bu dokanak gabroik intrüzyon ile sedimanter kayaçları ayırmaktadır. Bu sedimanter kayaçlar kötü boylanmış ve tane destekli bir dokuya sahip olup, yarı yuvarlak- yarı köşeli volkanik lav kökenli litik çakıllardan oluşan konglomera ile temsil edilmektedir (Şekil 3c). İntrüzyonların dokanaklarının çoğunlukla faylı olması nedeniyle civarında gelişmiş olan muhtemel bir kontakt metamorfizma etkisi belirlenmemiştir. Benzer olarak Dee adasının batı- güney batı ucunda da göreceli olarak daha küçük intrüzyonlar yer almaktadır. Burro Peaks Yükseltisi'nde yer alan intrüzyon ile tamamıyla benzer mineralojik ve fiziksel özellikler sunmaktadır, ancak muhtemel bir geçmiş buzul evrimi ile civar kayaçlardan ayrılmıştır. Dolayısıyla dokanak ilişkileri belirsizdir.



**Şekil 2. a)** Dee Adası'nın jeoloji haritası (Smellie vd., 1984'ten değiştirilmiştir; **b)** Cecilia Adası'nın jeoloji haritası.  
**Figure 2. a)** Geological map of Dee Island (modified from Smellie et al., 1984); **b)** geological map of Cecilia Island.

Cecilia Adası'na bakıldığında adanın hemen hemen hepsinin tek bir intrüzyon ile temsil edildiği görülmektedir (Şekil 2b). Bu intrüzyon daha önce literatürde tanımlanmamış olup bu çalışmada ilk defa Cecilia İntrüzyonu olarak isimlendirilmiştir. Bu intrüzyon çıplak gözle plajiyoklaz, piroksen ve olivin minerallerinin izlenebildiği ve iri eş taneli holokristalen dokusunun tanımlanabildiği gabroik bir sokulum niteliğindedir. Dee intrüzyonlarından farklı olarak çoğunlukla tek yönlü yer yer ise iki yönlü çatlak düzlemleri sunarlar (Şekil 3d). İntrüzyonun ortasında ise intrüzyonu bir sil şeklinde kesen ince taneli bazaltik bir dayk bulunmaktadır (Şekil 3e). Cecilia İntrüzyonu Cecilia Adası'nın hemen hemen her kesimini kapsamaktadır; yalnızca güney kesimlerinde sınırlı alanda bazaltik lavlar gözlenmektedir (Şekil 3f). Ancak bu iki birim arasındaki dokanak izlenmemektedir.

### Petrografi

Petrografik açıdan Dee ve Cecilia intrüzyonları benzer bileşimsel fakat farklı dokusal özellikler

sergilemektedir. İncelenen örneklerin petrografik özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir. Dee intrüzyonları ince taneli holokristalen porfirik dokusu ile belirgindir. Ana mineraller plajiyoklaz (%45-60), ortopiroksen (%5-10), klinopiroksen (%10-15) ve olivin (%5-10) ile temsil edilmektedir (Şekil 4a). Aksesuar mineraller olarak da apatit, ilmenit ve magnetit içermektedir. Dee İntrüzyonu'na ait plajiyoklaz mineralleri öz ve yarı öz şekilli kristaller şeklinde bulunmaktadır. Plajiyoklazlar ikizlenme ve zonlanma göstermektedirler (Şekil 4b). İkizlenmeler çoğunlukla polisentetik ikizlenmeler ile temsil olunurken zonlanma baskın olarak normal zonlanma ile belirgindir (Şekil 4c; bkz. Mineral Kimyası başlığı). Plajiyoklazlar seyrek olarak elek dokusu göstermekte ve yer yer serisitleşmeler ve killeşmeler izlenmektedir. Ortopiroksenler ve klinopiroksenler öz ve yarı öz şekilli kristaller şeklinde bulunmaktadır. Olivinler ise daha seyrek olarak gözlemlenmekte ve baskın olarak antigoritleşme göstermektedir. Opak mineraller öz şekilsiz kristaller halinde yer yer intersitisyel yer yer de bireysel kristaller halinde bulunmaktadır.



**Şekil 3.a)** Dee adası intrüzyonu (Burro Peaks) ve konglomera biriminin uzaktan görünümü; **b)** Dee adası intrüzyonlarında gözlemlenen çatlak sistemleri; **c)** Dee Adası'nda bulunan konglomeranın yakından görünümü; **d)** Cecilia İnrüzyonu'nun mostra görünümü; **e)** Cecilia İnrüzyonu'nu kesen bazaltik dayk; **f)** Cecilia Adası batı ucunda yer alan volkanik kayaların uzaktan görünümü.

**Figure 3.a)** Distant view of the Dee Island intrusion (Burro Peaks) and the conglomerate unit; **b)** fracture systems observed in the Dee Island intrusions; **c)** close-up view of the conglomerate exposed on Dee Island; **d)** outcrop view of the Cecilia intrusion; **e)** basaltic dyke cutting the Cecilia intrusion; **f)** distant view of volcanic rocks exposed at the western part of Cecilia Island.

**Çizelge 1.** Dee ve Cecilia intrüzyonlarının petrografik özellikleri.**Table 1.** Petrographical features of the Dee and Cecilia intrusions.

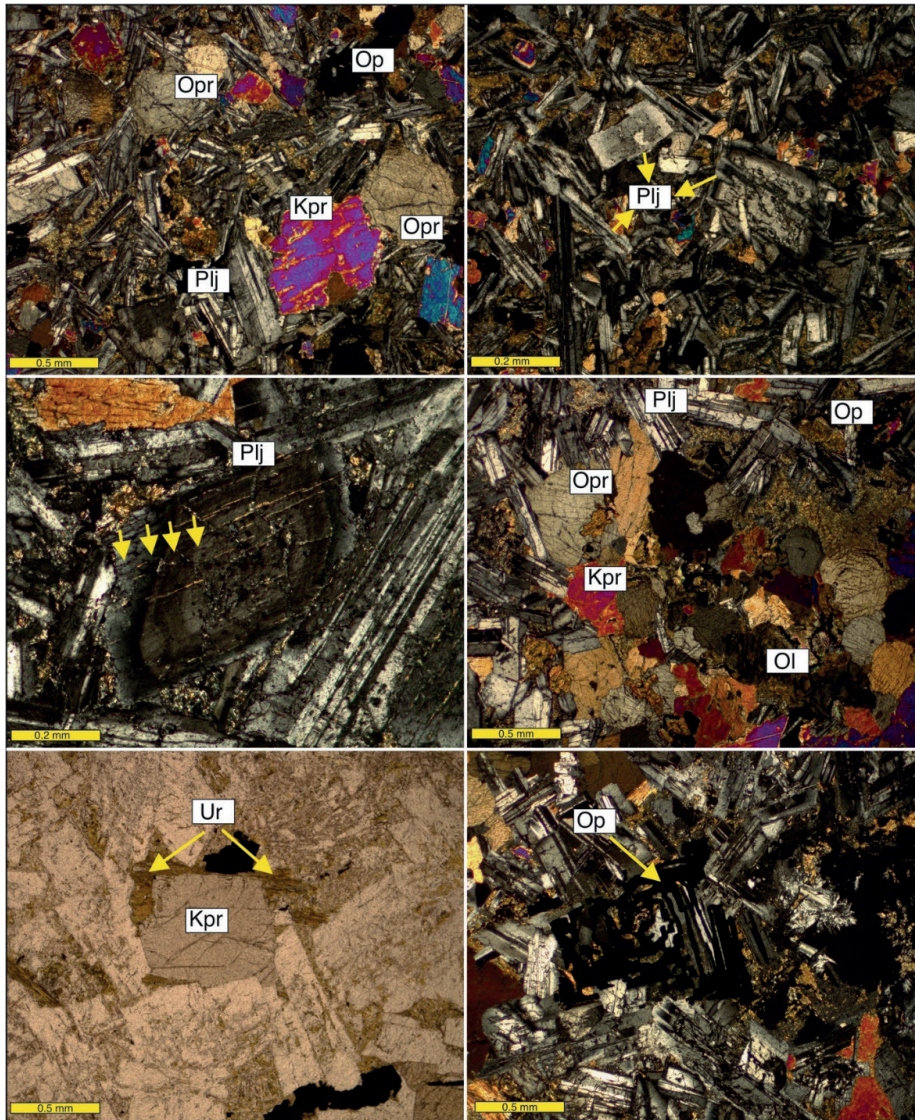
İntrüzyon Kesit No	DEE			CECILIA		
	MA 17a	MA 20	MA 25	MA 37	MA 39	MA 40
Doku	Holokristalen	İnce Taneli	Porfirik	Holokristalen	Orta Taneli	Granüler
Opak Min (%)	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5
Plajiyoklas (%)	45-50	55-60	45-50	45-50	50-55	50-55
Ortopiroksen (%)	5-10	5-10	5-10	5-10	3-8	5-10
Klinopiroksen (%)	10-15	10-15	10-15	10-15	12-18	10-15
Olivin (%)	5-10	0-5	8-10	10-15	15-20	10-15
İkincil Min (%)	-	0-5	-	-	-	0-5

Cecilia İntrüzyonu Dee intrüzyonları ile benzer mineralojik ancak farklı dokusal özellikler sunmaktadır. İntrüzyon görece daha kaba taneli holokristalen granüler doku sergilemektedir (Şekil 4d). Ana mineraller plajiyoklaz (%45-55), ortopiroksen (%3-10), klinopiroksen (%10-18) ve olivin (%10-15) ile temsil edilmektedir. Aksesuar mineraller olarak da apatit, ilmenit ve magnetit içermektedir. Cecilia İntrüzyonu'nda yer alan plajiyoklazlar öz şekilliden öz şekilsiz değişen kristallerden oluşmaktadır. Plajiyoklazlarda polisentetik ikizlenme ve zonlanmalar izlenir. Bu zonlanmalar da normal, osilasyonlu ve yer yer ters zonlanmalar ile temsil edilirler (bkznz. Mineral Kimyası başlığı). Plajiyoklaz kristalleri yer yer elek dokuları ve körfez yapıları sergilemektedir. Cecilia İntrüzyonu da Dee intrüzyonları gibi öz ve yarı öz şekilli kristallerden oluşan klinopiroksen ve ortopiroksen içermektedir (Şekil 4d). Piroksenler yer yer plajiyoklazları kapanım şeklinde dilinimleri boyunca barındırır. Bazı piroksen kristalleri de çeperlerinde sınırlı ve lokal amfibol gelişimleri ile tanımlanan uralitleşme gösterir (Şekil 4e). Olivinler ise Dee intrüzyonlarına görece daha iri taneli ve öz şekilli-

yarı öz şekillidir ancak hemen hepsi benzer olarak iddingsitleşme-serpantinleşme-antigoritleşme gösterirler. Opak mineraller örneklerin hepsinde yaygın olarak bulunmaktadır. Opak mineraller, hem plajiyoklaz, piroksen ve olivinler arasında interstisyel konumda hem de ayrık, öz-yarı öz şekilli bireysel kristaller halinde bulunmaktadır (Şekil 4f). Yer yer çatlaklar arasında dolgu olarak da gözlemlenirler.

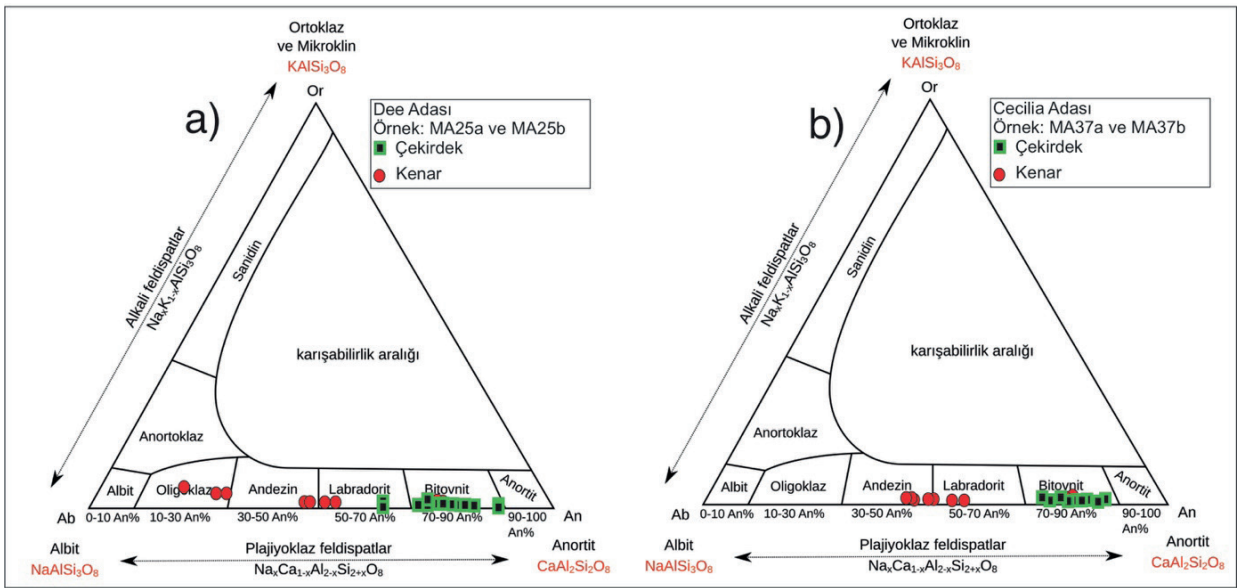
**Mineral Kimyası****Plajiyoklaz**

Dee ve Cecilia intrüzyonlarında en sık rastlanan mineral plajiyoklazdır. Plajiyoklazlar 0,1 ile 1 mm'yi aşan uzunluklarda öz şekilli ve yarı öz şekilli kristaller halinde bulunmaktadır. Plajiyoklaz kristalleri hem ikizlenme hem de zonlanma gösterir. Plajiyoklazlar üzerinde yapılan mikropob ölçümleri çekirdekten merkeze doğru olacak şekilde yapılmış ve noktaların % An değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5 ve 6). Örneklerin BSE (Back-scattered electron) görüntüleri de Şekil 6a ve b'de verilmektedir.



**Şekil 4.a)** Dee intrüzyonlarında gözlenen holokristalen ince taneli- porfrik doku (Plj: Plajiyoklaz; Opr: Ortopyroksen; Kpr: Klinopyroksen; Ol: Olivin, Op: Opak mineral, Çift Nikol); **b)** Dee intrüzyonlarında gözlenen zonlu ve ikizlenen plajiyoklazlar (Plj: Plajiyoklaz; Çift Nikol); **c)** Dee intrüzyonlarında gözlenen zonlu plajiyoklaz kristali (Plj: Plajiyoklaz; Çift Nikol); **d)** Cecilia İnrüzyonu'nda gözlenen holokristalen granüler doku (Plj: Plajiyoklaz; Opr: Ortopyroksen; Kpr: Klinopyroksen; Ol: Olivin, Op: Opak mineral, Çift Nikol); **e)** Cecilia İnrüzyonu'nda yer alan klinopyroksen kristalinde gözlenen uralitleşme (Kpr: Klinopyroksen, Ur: Uralitleşme; Tek Nikol); **f)** Cecilia İnrüzyonu'nda gözlenen opak mineral oluşumları (Op: Opak mineraller; Çift Nikol)

**Figure 4.a)** Holocrystalline fine-grained porphyritic texture observed in the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; Opx: Orthopyroxene; Cpx: Clinopyroxene; Ol: Olivine; Op: Opaque minerals; crossed polars); **b)** zoned and twinned plagioclase crystals observed in the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; crossed polars); **c)** zoned plagioclase crystal observed in the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; crossed polars); **d)** holocrystalline granular texture observed in the Cecilia intrusion (Pl: Plagioclase; Opx: Orthopyroxene; Cpx: Clinopyroxene; Ol: Olivine; Op: Opaque minerals; crossed polars); **e)** uralitization observed in a clinopyroxene crystal from the Cecilia intrusion (Cpx: Clinopyroxene; Ur: Uralitization; plane-polarized light); **f)** opaque mineral assemblages observed in the Cecilia intrusion (Op: Opaque minerals; crossed polars).



**Şekil 5.a)** Dee ve **(b)** Cecilia intrüzyonlarına ait feldispatların Ab-An-Or üçgen diyagramındaki (Smith ve Brown, 1988) yerleri.

**Figure 5.** Positions of feldspars from **(a)** the Dee intrusions and **(b)** the Cecilia intrusion on the Ab–An–Or ternary diagram (after Smith and Brown, 1988).

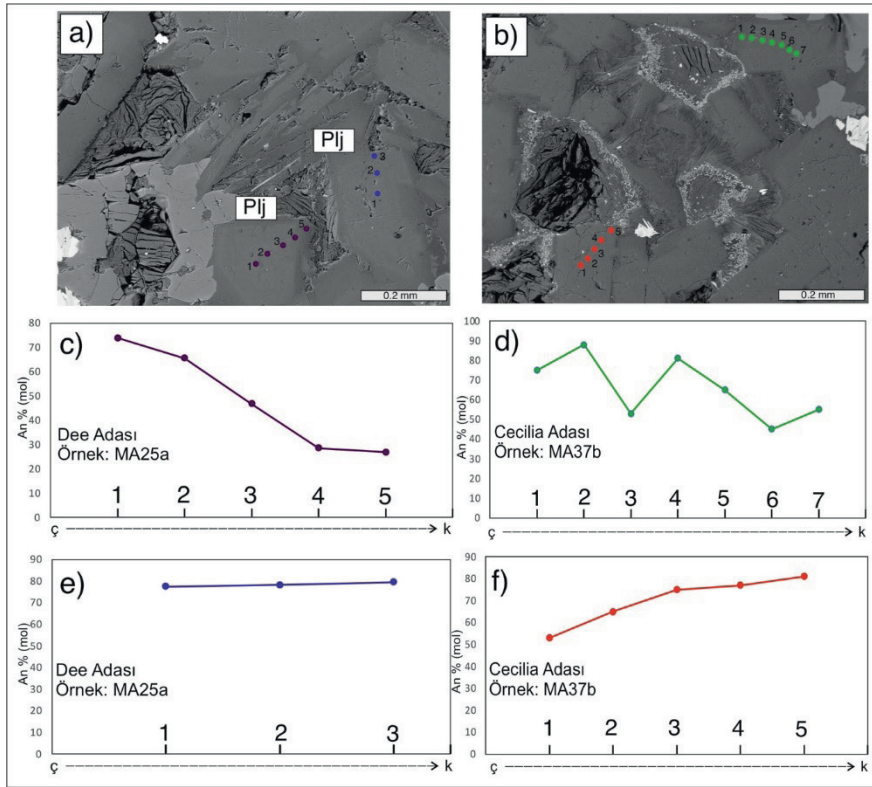
Yapılan ölçümlere göre Dee intrüzyonlarına ait zonlu plajiyoklazların çekirdek An % değerleri 88 ile 65 arasında değişirken kenar zonlarında bu değerler 55 ile 25 arasındadır (Şekil 5a). Özellikle çekirdekten merkeze yapılan çoklu nokta ölçümleri bu An değerlerinin çizgisel olarak azaldığını göstermektedir (Şekil 6c). Bir diğer deyişle merkezlerinde baskın olarak bitovnit bileşimi sergileyen plajiyoklazlar kenar zonlarında andezin- oligoklas bileşimleri gösterir (Şekil 5a). Bu da Dee intrüzyonlarına ait plajiyoklazların normal zonlanma gösterdiğine işaret etmektedir. İkizlenen kristallerde ise herhangi bir % An değişimi çekirdekten kenara saptanmamıştır (Şekil 6e).

Cecilia İntrüzyonu'nda ise plajiyoklazlar çekirdekte 86 ile 74 arasında değişen % An değerleri sunmakta ve kenar zonlarında bu değerler 58 ile 44 arasında yoğunlaşmaktadır (Şekil 5b). Çekirdekten merkeze doğru yapılan çoklu nokta ölçümlerine bakıldığında bazı plajiyoklaz

fenokristallerinin salınlımlı An değerleri gösterdiği (Şekil 6d) bazı kristallerde ise bu değerlerin kenar zonlarına doğru artış sergilediği saptanmıştır (Şekil 6f). Bu da Cecilia İntrüzyonu'nun yer yer osilasyonlu ve yer yer ise ters zonlanma gösteren plajiyoklazlar içerdiğini ortaya koymaktadır.

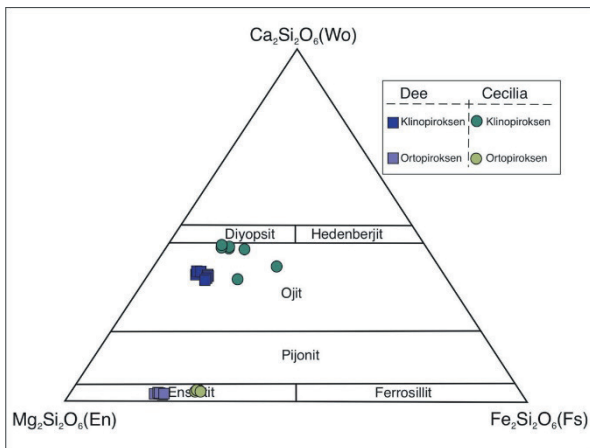
### Piroksen

Dee ve Cecilia intrüzyonları mafik mineral olarak yaygın piroksen kristalleri barındırmaktadır. Bu piroksenler hem ortopiroksenler hem de klinopiroksenler ile temsil edilmektedir. Dee intrüzyonları piroksenlerine bakıldığında klinopiroksenlerin hepsinin Wo-En-Fs üçgeninde ojit alanında kümelenedikleri görülmektedir (Şekil 7). Ortopiroksenler ise enstatit alanına iz düşmektedir. Benzer olarak Cecilia İntrüzyonu'na ait ortopiroksenler de enstatit alanında kümelenmektedir. Klinopiroksenler de ojit alanına ancak diyopsit bileşimine daha yakın bölgelere iz düşmektedir.



**Şekil 6.a)** Dee intrüzyonlarına ait MA25a numaralı örneğin ‘BSE (Back-scattered electron)’görünümü (Plj: Plajiyoklaz; 1-5: ölçüm noktaları); **b)** Cecilia İntrüzyonu’na ait MA37b numaralı örneğin ‘BSE (Back-scattered electron)’görünümü (Plj: Plajiyoklaz; 1-7: ölçüm noktaları); **c-f)** Dee ve Cecilia intrüzyonları plajiyoklazlarının çekirdek-kenar % An değişimleri (ç: Çekirdek; k: Kenar).

**Figure 6.a)** Back-scattered electron (BSE) image of sample MA25a from the Dee intrusions (Pl: Plagioclase; 1–5: analytical spots); **b)** BSE image of sample MA37b from the Cecilia intrusion (Pl: Plagioclase; 1–7: analytical spots); **c–f)** core-to-rim An% variations in plagioclase crystals from the Dee and Cecilia intrusions (c: core; r: rim).

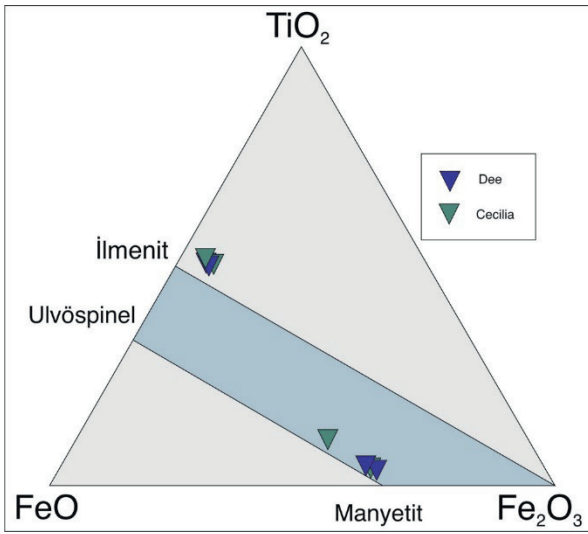


**Şekil 7:** Dee ve Cecilia intrüzyonları piroksenlerinin Wo-En-Fe diyagramındaki konumları.

**Figure 7:** Compositional positions of pyroxenes from the Dee and Cecilia intrusions on the Wo–En–Fs diagram.

### Fe- Ti Oksitler

Dee ve Cecilia intrüzyonlarını oluşturan kayalarda Fe- Ti oksit mineralleri yaygın olarak yer almaktadır. Çoğunlukla ince taneli fenokristaller halinde veya diğer mineral fazlarının içerisinde öz şekilsiz kapanımlar olarak izlenmektedir. İki intrüzyona ait Fe- Ti oksitler de benzer bileşimler sergilerler ve ilmenit- manyetit çiftleri ile temsil olunurlar (Şekil 8).



**Şekil 8.** Dee ve Cecilia intrüzyonları Fe-Ti oksitlerin ayırtman diyagramındaki (Bacon ve Hirschmann, 1988) yerleri.

**Figure 8.** Discrimination diagram showing the compositions of Fe-Ti oxides from the Dee and Cecilia intrusions (after Bacon and Hirschmann, 1988).

## TARTIŞMA

### Jeotermobarometre ve Oksijen Fugasitesi Hesaplamaları

İki piroksen jeotermobarometresi kullanılarak (Putirka, 2008) Dee ve Cecilia intrüzyonlarının kristallenme sıcaklıkları ve yerleşim basınçları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Putirka (2008) tarafından önerilen Denklem 36–37 (iki-piroksen termometreleri) ile Denklem 38–39 (iki-piroksen barometreleri) birlikte kullanılmıştır. Denklem 39, deneysel kalibrasyon kapsamının genişliği ve bazik sistemlere uygulanabilirliği nedeniyle basınç hesaplamalarında ana değerlendirme aracı olarak ele alınmıştır. Denklem 39 sıcaklık verisi kullanılarak hesaplandığından sıcaklık ve basınç değerleri Denklem 36–37 ve Denklem 38 kullanılarak iteratif olarak hesaplanmıştır. Yapılan tüm hesaplamalarda Putirka (2008)'de önerilen denge koşulları dikkate alınmış; Fe–Mg

değişim katsayısı (KD) değerleri belirgin şekilde denge aralığının dışında kalan klinopiroksen–ortopiroksen çiftleri termobarometrik hesaplamalara dahil edilmemiştir ve verilen tabloda “hesaplanmayan değer (h.d.)” ibaresi ile yalnızca karşılaştırma amacıyla sunulmuştur (Çizelge 2). Bununla beraber sıcaklıkları test etmek amacıyla Brey ve Köhler (1990) termometresi de hesaplanmıştır.

Dee intrüzyonlarından iki örneğin (MA25a ve b) jeotermobarometre hesaplamaları yapılmıştır. Bu iki örnekten bir tanesi (MA25a) Burro Peaks tepesinden alınmış olup diğer örnek olan MA25b de adanın batı ucunda yer alan intrüzyondan alınmıştır. Bu iki örnek tamamen benzer saha, petrografi ve mineral kimyası özellikleri sergilemektedir (bknz. Bulgular başlığı). Bununla beraber iki örneğin aşağıda sunulmakta olan jeotermobarometre hesaplamaları da birbirlerine benzerdir. Yapılan iki-piroksen termometresi hesaplamaları sistematik olarak yüksek sıcaklıklar vermekte olup Denklem 36 ve 37'ye göre kristallenme sıcaklıkları yaklaşık 1.030–1.090 °C aralığında yoğunlaşmaktadır. Brey ve Köhler (1990) termometresi ise sıcaklıkların yaklaşık 1.140 °C'ye ulaşabileceğini göstermektedir ancak aradaki fark kabul edilebilir seviyededir. Dee intrüzyonlarından hesaplanan KD (Fe–Mg) değerlerinin çoğunlukla 0,8–1,1 aralığında toplanması, klinopiroksen–ortopiroksen çiftlerinin magmatik denge koşullarına yakın kristallenmiş olduğunu ve elde edilen sıcaklıkların güvenilirliğini desteklemektedir. Barometre hesaplamaları ise Dee intrüzyonlarının yaklaşık 2,5–3,5 kbar basınç aralığında kristallendiğini göstermekte olup, bu değerler de ortalama kabuk yoğunluğu varsayımıyla yaklaşık 8-12 km aralığına, bir diğer deyişle üst kabuk değerlerine karşılık gelen nispeten sığ bir yerleşim derinliğine işaret etmektedir.

**Çizelge 2.** Dee ve Cecilia intrüzyonlarına ait örneklerin jeotermobarometre hesaplamaları (h.d.: hesaplanmayan değer)

**Table 2.** Geothermobarometry calculations for the Dee and Cecilia intrusions (h.d.: non-calculated value)

Plüton	Örnek	Brey ve Kohler (1990)		Putirka (2008) RiMG				Yerleşim Derinliği (km)
		T (°C)	K <sub>D</sub> (Fe-Mg)	Eqn 36	Eqn 37	Eqn 38	Eqn 39	
				T (°C)	T (°C)	P (kbar)	P (kbar)	
Cecilia	MA37a	1058,19	1,23	1037,12	1041,05	7,23	4,60	16,10
		1083,50	1,12	1088,92	1174,63	7,04	5,86	20,52
		1016,71	1,17	1001,47	977,55	5,98	5,06	17,71
		1082,02	1,11	1040,12	1067,12	7,90	5,88	20,59
		1023,81	1,96	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
	MA37b	1057,00	1,22	1036,62	1079,60	7,01	4,23	14,80
		1087,35	1,12	1092,09	1168,27	8,59	6,65	23,27
		1015,53	1,13	1016,88	987,62	6,22	5,53	19,36
		1016,71	1,97	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1023,73	1,98	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1027,97	1,99	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
Dee	MA25a	1127,17	0,85	1039,62	1078,52	8,37	3,52	12,32
		1126,46	0,87	1042,65	1079,08	8,28	3,77	12,82
		1127,90	0,80	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1130,02	0,76	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
		1126,99	0,81	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.	h.d.
	MA25b	1138,93	1,05	1044,98	1079,16	8,81	2,38	8,34
		1146,74	1,07	1053,96	1082,07	9,60	2,67	9,35
		1133,13	1,02	1043,75	1077,57	8,60	2,58	9,04
		1140,78	1,05	1052,28	1080,17	9,01	2,96	10,37
		1136,58	1,03	1047,26	1080,05	8,79	2,40	8,40

Cecilia İntrüzyonu'nda ise Putirka (2008) tarafından önerilen iki-piroksen termometresinden elde edilen sıcaklık değerleri yaklaşık 1000–1170 °C aralığında yoğunlaşmaktadır. Cecilia örneklerinde KD (Fe–Mg) değerlerinin 1,1'den 1,9'a kadar daha geniş bir aralıkta dağılması, iki-piroksen arasında kimyasal dengenin her ölçüm noktası çiftinde aynı derecede korunmadığını ve kristallenme sürecinin Dee'ye kıyasla daha karmaşık olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, Cecilia magmasının daha dengesiz koşullarda kristallenme süreçlerine maruz kaldığı bir ortamda gelişmiş olabileceğine işaret eder. Cecilia intrüzyonu için jeobarometrik

hesaplamalar yalnızca KD (Fe–Mg) değerleri denge aralığında olan klinopiroksen–ortopiroksen çiftleri kullanılarak yapılmıştır. Putirka (2008) tarafından önerilen denge aralığı ile uyumlu olan bu ölçümlere göre hesaplanan basınç değerleri, Cecilia intrüzyonunun yaklaşık 4,5–6,5 kbar basınç aralığında kristallendiğini göstermektedir. Bu basınç değerleri yaklaşık 15–23 km derinliklere karşılık gelmekte olup orta–alt kabuk seviyelerini işaret etmektedir. Buna karşılık daha yüksek KD değerleri iki piroksen fazı arasında kimyasal dengenin bozulduğunu göstermektedir. Bu nedenle söz konusu ölçümler jeotermobarometrik hesaplamalara dahil edilmemiştir.

İki piroksen jeotermobarometresine ek olarak Dee ve Cecilia intrüzyonları üzerinde Fe–Ti oksit oksit-barometresi hesaplamaları da yapılmıştır. Sauerzapf vd. (2008) formülizasyonuna göre hesaplanan oksijen fugasitesi değerleri her iki intrüzyonun da oksitleyici redoks koşulları altında kristallendiğini göstermektedir. Dee intrüzyonunda hesaplanan  $\Delta\text{NNO}$  değerleri yaklaşık +0,29 ile +1,7 arasında değişmekte olup, hafif ila orta derecede oksitleyici bir magmatik ortamı işaret etmektedir (Cao vd., 2018 ve oradaki referanslar). Cecilia intrüzyonu ise elde edilen  $\Delta\text{NNO}$  değerleri yaklaşık +2,7 civarında olup, Dee'ye kıyasla daha oksitleyici koşulların hâkim olduğunu göstermektedir. Mutlak  $\log f\text{O}_2$  değerleri kullanılan kalibrasyona bağlı olarak düşük (yaklaşık -14 ila -16) görünmekle birlikte, Sauerzapf vd. (2008)'de vurgulandığı üzere sıcaklığa duyarlı olduğundan karşılaştırmalı yorumlar için kullanılmamış, redoks koşullarının değerlendirilmesinde yalnızca  $\Delta\text{NNO}$  değerleri esas alınmıştır.

### Dengesizlik Koşulları

Plajiyoklaz mineral kimyası ve kristallerde gözlenen dokusal özellikler, Dee ve Cecilia intrüzyonları arasındaki kristallenme farklarını ortaya koyan önemli dengesizlik göstergeleri sunmaktadır. Mineral bileşimleri ve dokuların, magmanın sıcaklık, basınç ve bileşimindeki değişimlere duyarlı olduğu; soğuma, basınç değişimleri ve magma karışımı gibi süreçlerin kristallenme sırasında magmatik sistemleri dengeden uzaklaştırabildiği bilinmektedir (ör. Nixon, 1988; La Spina vd., 2016). Bu tür dengesizlikler özellikle plajiyoklaz kristallerinde normal, osilasyonlu ve ters zonlanma ile birlikte elek ve körfez dokuları şeklinde ortaya çıkmaktadır (Dungan ve Rhodes, 1978; Stimac ve Pearce, 1992).

Dee intrüzyonlarında plajiyoklazlar genel olarak normal zonlanma göstermekte olup,

anortit (An) bileşimleri çekirdekten kenara doğru sistematik olarak azalmaktadır. Bazı plajiyoklaz kristallerinin ise belirgin bir zonlanma göstermemesi, kristallerin görece kararlı bir eriyik bileşimi altında büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca belirgin dengesizlik dokularının gözlenmemesi, kristallenme sırasında eriyik bileşiminin önemli ölçüde bozulmadığına işaret etmektedir (Streck, 2008). İki-piroksen çiftlerinde hesaplanan  $\text{KD}(\text{Fe-Mg})$  değerlerinin büyük ölçüde Putirka (2008) tarafından önerilen denge aralığında bulunması da kristallenmenin kimyasal dengeye yakın koşullar altında gerçekleştiğini desteklemektedir. Bu dokusal ve kimyasal göstergeler, iki-piroksen jeotermobarometrisinden elde edilen yüksek kristallenme sıcaklıkları ve görece sığ yerleşim basınçları ile birlikte değerlendirildiğinde, Dee magmasının kabuk içinde kimyasal olarak daha kararlı bir ortamda kristallenmiş olabileceğini düşündürmektedir. Bu tür koşullar, magmanın kabuk içinde uzun süre karmaşık yeniden dengeleme süreçleri geçirmeden kristallenmesiyle, yani görece kısa magma bekleme (kristallenme) süreleriyle ilişkili magmatik sistemlerin özellikleriyle tutarlıdır (ör. Hawkesworth vd., 2000; Moreno-Alfonso vd., 2026).

Cecilia intrüzyonunda ise plajiyoklazlar osilasyonlu ve yer yer ters zonlanma ile birlikte elek ve körfez dokuları sergilemektedir. Mineral kimyasından elde edilen An değerlerinin kristal içlerinde ve kenarlarında geniş aralıklarda dalgalanması, eriyik bileşiminin kristallenme sırasında önemli ölçüde değiştiğine işaret etmektedir. Aynı kayaç içerisinde hem normal hem de ters zonlu plajiyoklazların birlikte bulunması, dengesiz kristallenmenin güçlü bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Bu dokusal ve bileşimsel özellikler, magma karışımı, daha sıcak magmanın magma odasına yeniden girişi veya derin seviyelerde uzun süreli kristallenme sırasında gelişen kısmi yeniden denge süreçleri ile açıklanabilir. Ancak elbette bu dengesizlik

koşullarından hangisinin baskın olduğunu belirlemek için detaylı jeokimyasal ve izotopik veriler ile petrolojik değerlendirme gerekmektedir.

Cecilia İntrüzyonu'ndaki plajiyoklaz dengesizlikleri, iki-piroksen jeotermobarometrisinden elde edilen daha yüksek yerleşim basınçları ve KD (Fe–Mg) değerlerindeki geniş saçılım ile tutarlı bir tablo sunmaktadır. Dolayısıyla burada tanımlanan denge–dengesizlik farklarının doğrudan yerleşim derinliğinin bir sonucu olarak değil, magmatik sistemlerin kabuk içinde maruz kaldığı termal ve bileşimsel dinamiklerin bir yansıması olarak değerlendirilmesi daha uygundur. Ancak bu çalışma çerçevesinde elde edilen veriler, Cecilia İntrüzyonu'nu oluşturan magmanın daha derin kabuksal seviyelerde daha uzun süre hapsedildiğini ve bu süre zarfında daha dinamik, çok evreli bir magma odası ortamında evrildiğini düşündürmektedir. Buna karşılık Dee intrüzyonlarının, daha sığ yerleşim, daha dar aralıkta gelişen KD değerleri,  $\Delta$ NNO değer aralığı ve görece daha dengeli dokusal özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, daha tek evreli ve dengeye yakın bir kristallenme sürecini temsil etmektedir. Bütün bu veriler, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının aynı bölgesel magmatik sistem içerisinde farklı kabuksal seviyelerde ve farklı denge–dengesizlik koşulları altında gelişmiş olduğunu ortaya koymaktadır.

### Bölgesel Çıkarımlar

Dee ve Cecilia intrüzyonlarının yerleşim derinlikleri, Güney Shetland Adaları boyunca tanımlanan uzun süreli ve çok evreli magmatik evrimçerçevesinde değerlendirilmelidir. Bölgedeki magmatizma, Phoenix Levhası'nın Mezozoyik'ten itibaren etkin olan dalma-batma rejimiyle ilişkili olarak gelişmiş, Kretase boyunca belirgin bir magmatik aktivite göstermiş ve daha sonraki dönemlerde farklı evrelerle yeniden canlanmıştır (ör. Smellie vd., 1984; Kamenov, 2008; Berrococo

vd., 2016; Smellie, 2020; 2021; Leat ve Riley, 2021; Altunkaynak vd., 2025). Bu bağlamda, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının konumsal olarak Robert Adası'na yakınlığı, özellikle adanın batı ve orta kesimlerinde literatürde rapor edilen Kretase yaşlı intrüzif ve volkanik kayaçlarla (Coopermine Formasyonu; Pankhurst ve Smellie, 1983) zamansal bir ilişki olasılığını akla getirmektedir. Ancak Güney Shetland yayı boyunca magmatik yaşların yalnızca adalar arasında değil, aynı ada içerisinde dahi belirgin şekilde değişkenlik göstermesi, bu tür bir korelasyonu temkinli ele almayı gerektirir. Nitekim Greenwich Adası'nın hemen güneyinde yer alan Livingston Adası'nda Kretase'den Paleojen'e uzanan geniş bir yaş aralığı tanımlanmış olup (Altunkaynak vd., 2025 ve oradaki referanslar), Robert Adası'nın batı ve doğu kesimlerinin farklı magmatik evrelere ev sahipliği yaptığına işaret eden veriler mevcuttur (Smellie vd., 1984; Pankhurst ve Smellie, 1983; Zheng vd., 2022; Karlı vd., 2025). Dolayısıyla Dee ve Cecilia intrüzyonları için sadece bölgesel bir korelasyon ile net bir yaş aralığı vermek mümkün olmamaktadır.

Bu zamansal belirsizlik çerçevesinde Dee ve Cecilia için iki temel senaryo öne çıkmaktadır. Eğer iki intrüzyon da Kretase yaşlı ya da birbirine yakın zamanlarda yerleşmiş ise, gözlenen farklı yerleşim derinlikleri aynı yay sistemi içerisindeki çok seviyeli bir magmatik yerleşimi yansıtıyor olabilir. Ancak bu durumda, Dee ve Cecilia intrüzyonları arasında hesaplanan yaklaşık 10–15 km'lik yerleşim derinliği farkının, günümüzde her iki intrüzyonun da birbirine yakın konumlarda ve benzer topoğrafik seviyelerde yüzeylenmesiyle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Böyle bir durumda Cecilia İntrüzyonu'nun Dee İntrüzyonu'na göre daha fazla yükselmiş ve aşınmış olması beklenir. Bu denli büyük ölçekte bir düşey fark ise büyük ölçekli bir faylanma ile ilişkili blok hareketi ile açıklanması mümkündür. Ancak, iki ada arasındaki alanın deniz altında kalması nedeniyle bu tür bir yapısal ilişkinin arazide

doğrudan izlenmesi mümkün olmamaktadır. Bölgedeki jeoloji haritalarında (Şekil 2) düşey bileşenli bazı faylar tanımlanmış olmakla birlikte, bunların büyük ölçüde görece genç yapılar olarak yorumlanması, intrüzyonların yerleşimi sırasında aktif olup olmadıklarının belirsiz kalmasına neden olmaktadır. Bir diğer olası senaryo ise intrüzyonların farklı yaşlara sahip olmasıdır. Bu durumda yerleşim derinliklerindeki fark, Güney Shetland yayı boyunca zaman içinde değişen kabuksal termal yapı, yükselim ve aşınma evreleri ile ilişkili olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla bu senaryo için Dee ve Cecilia magmatizması aynı sistemin farklı seviyelerinden ziyade, bölgesel magmatizmanın farklı evrelerini temsil eden iki ayrı intrüzyon olarak yorumlanabilir. Bu durumda Dee ve Cecilia intrüzyonlarının kabuk içerisine farklı dönemlerde yerleşmiş ve yükselme–aşınma süreçlerini birbirlerinden bağımsız olarak geçirmiş olmaları mümkündür.

Her iki senaryoda da Dee ve Cecilia intrüzyonları, Güney Shetland magmatik yayının evriminde kabuk içi magmatik depolanmanın ve yükselimin tekdüze olmadığını, aksine düşey yönde de farklı seviyelerde organize olabildiğini göstermektedir. Farklı yerleşim derinlikleri, yay magmatizmasının yalnızca magma üretimiyle değil, magmanın kabuk içerisindeki taşınımı, geçici depolanması ve evrimiyle de şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, Güney Shetland yayı boyunca tanımlanan uzun süreli ve çok evreli magmatik etkinliğin, kabuk içinde zamanla değişen bir magmatik yerleşim geçirdiğini ve aynı yay sistemi içerisinde farklı derinliklerde kristallenmiş intrüzyonların birlikte bulunmasının yay evriminin doğal bir sonucu olduğunu düşündürmektedir. Bu çıkarımların farklı sıcaklıkları temsil eden termokronolojik veriler yardımıyla kontrolü sağlandığında, hem Cecilia ve Dee intrüzyonlarının farklı yerleşim koşullarının hem de bölgedeki dalma-batma ilişkili magmatizmanın zamansal sürekliliği ve kabuksal depolanma düzeylerinin evrimi hakkında

daha ayrıntılı çıkarımlar yapılmasına olanak sağlayacaktır.

## SONUÇLAR

Saha gözlemleri, Dee Adası'nda baskın olarak gabroik intrüzyonların yüzelediğini bu kayalara yer yer sedimanter ve volkanik kayaçların eşlik ettiğini göstermektedir. Dee intrüzyonlarında, birbirine yaklaşık dik konumlanan ve üç yönlü olarak gelişmiş sistematik çatlaklar yaygın olarak izlenmektedir. Cecilia Adası'nda ise adanın büyük bölümünü kapsayan tek bir gabroik intrüzyon yüzelemekte olup, bu birime sınırlı alanlarda volkanik kayaçlar eşlik etmektedir. Cecilia İntrüzyonu'nda çatlaklar çoğunlukla tek yönlü, yer yer ise iki yönlü çatlak düzlemleri ile temsil edilmektedir.

Petrografi ve mineral kimyası verileri, Dee intrüzyonlarının plajiyoklaz (%45–60), ortopiroksen (%5–10), klinopiroksen (%10–15) ve olivin (%5–10) içeren ince taneli, holokristalen dokular sergilediğini göstermektedir. Dee intrüzyonlarına ait zonlu plajiyoklazlar çekirdeklerde yüksek anortit bileşimi ( $An_{88-65}$ ), kenar zonlarda ise daha düşük An değerleri ( $An_{55-25}$ ) ile belirgin normal zonlanma göstermektedir. Bu intrüzyonlarda klinopiroksenler ağırlıklı olarak ojit, ortopiroksenler ise enstatit bileşimleri ile temsil edilmektedir.

Cecilia İntrüzyonu, plajiyoklaz (%45–55), ortopiroksen (%3–10), klinopiroksen (%10–18) ve olivin (%10–15) içeren daha kaba taneli holokristalen dokular ile temsil edilmektedir. Bu intrüzyona ait plajiyoklazlar çekirdekte  $An_{86-74}$ , kenar zonlarda ise  $An_{58-44}$  aralığında bileşimler sunmakta; kristaller içerisinde osilasyonlu ve yer yer ters zonlanmalar kaydedilmektedir. Klinopiroksenler ojit–diyopsit alanına yakın, ortopiroksenler ise enstatit alanında yer almaktadır.

İki piroksen jeotermobarometresi hesaplamaları, Dee intrüzyonlarının yaklaşık

1.030–1.090 °C kristallenme sıcaklıkları ve yaklaşık 2,5–3,5 kbar basınç aralığında; Cecilia İntrüzyonu'nun ise 1.000–1.170 °C kristallenme sıcaklıkları ve yaklaşık 4,5–6,5 kbar basınç değerleri ile temsil edildiğini göstermektedir.

Fe–Ti oksit mineral kimyası sonuçları, Dee intrüzyonlarında hesaplanan oksijen fugasitesi değerlerinin  $\Delta\text{NNO} \approx +0,3$  ile  $+1,7$  aralığında değiştiğini; Cecilia İntrüzyonu'nda ise  $\Delta\text{NNO}$  değerlerinin yaklaşık  $+2,7$  civarında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Her iki intrüzyon da manyetit–ilmenit çiftleri ile temsil edilmekte olup, oksijen fugasitesi hesaplamaları oksitleyici redoks koşullarına işaret etmektedir.

Genel olarak, saha, petrografik, mineral kimyası verileri ve jeotermobarometre hesaplamaları birlikte değerlendirildiğinde, Dee ve Cecilia intrüzyonlarının Güney Shetland Yayı boyunca gelişen mafik magmatizmanın kabuk içerisinde farklı seviyelerde yerleşmiş temsilcileri olduğunu göstermektedir. Bu intrüzyonların zamansal ilişkilerinin ortaya konulması ile Güney Shetland Yayı boyunca gelişen kabuk evrimine yaklaşımda bulunmak mümkün olabilecektir.

## **EXTENDED SUMMARY**

*This study presents a comparative investigation of the emplacement conditions of gabbroic intrusions exposed on Dee and Cecilia islands, located in the northern part of the Antarctic Peninsula within the South Shetland Islands, West Antarctica. The South Shetland arc represents the products of long-lived arc magmatism related to the subduction of the Phoenix Plate beneath the Antarctic Plate, with magmatic activity persisting through multiple stages from the Late Jurassic to the Paleogene (Smellie et al., 1984; Leat et al., 1995; Smellie vd, 2021). However, mineral chemistry–based thermobarometric constraints remain limited for many islands along the arc (Haase et al., 2012; Altunkaynak et al., 2025). Dee and Cecilia islands are among the areas where such data are particularly scarce. In this*

*study, detailed field observations, petrographic characteristics, and mineral chemistry data from mafic intrusions exposed on these two islands are presented for the first time, and these data are used to evaluate crystallization temperatures, emplacement pressures, and oxygen fugacity conditions.*

*Dee and Cecilia islands are located in the central part of the South Shetland archipelago, between Robert and Greenwich islands (Smellie et al., 1984; Dumont et al., 2006). Magmatic rocks dominate both islands and are mainly represented by intrusive lithologies. On Dee Island, several compositionally gabbroic intrusions crop out as independent bodies, whereas Cecilia Island is characterized by a single gabbroic intrusion covering a large portion of the island. The intrusions on Dee Island are characterized by well-developed, approximately orthogonal, three-directional fracture systems, particularly around Burro Peaks High. These fractures are interpreted as brittle deformation features that may have developed during early emplacement and/or cooling of the intrusions. In contrast, fractures within the Cecilia intrusion are predominantly single-directional, locally forming two-directional planar systems. On both islands, intrusive contacts are only locally preserved, and evidence for contact metamorphism is limited.*

*Petrographic analyses indicate that, although the Dee and Cecilia intrusions share similar mineralogical compositions, they display pronounced textural differences. The Dee intrusions are characterized by fine-grained, holocrystalline porphyritic textures and consist mainly of plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene, and olivine. The Cecilia intrusion, on the other hand, exhibits coarser-grained, holocrystalline granular textures and differs from the Dee intrusions in terms of grain size and textural relationships, despite its broadly similar mineralogy. Accessory mineral phases in both intrusions include apatite, ilmenite, and magnetite.*

Plagioclase mineral chemistry provides important insights into the crystallization conditions of the intrusions. Plagioclase crystals in the Dee intrusions predominantly exhibit normal zoning, with a systematic decrease in anorthite (An) content from core to rim. These features are consistent with crystallization under relatively stable magmatic conditions (Dungan and Rhodes, 1978; Stimac and Pearce, 1992). In contrast, plagioclase crystals in the Cecilia intrusion display oscillatory and locally reverse zoning, together with sieve textures and embayed crystal margins. This compositional and textural variability suggests significant fluctuations in melt composition and physical conditions during crystallization (Nixon, 1988; La Spina et al., 2016).

Pyroxene mineral chemistry data indicate that both clinopyroxene and orthopyroxene are widespread in the intrusions. Clinopyroxenes from the Dee intrusions plot mainly in the augite field of the Wo–En–Fs diagram, while orthopyroxenes cluster within the enstatite field. Orthopyroxenes from the Cecilia intrusion show similar enstatitic compositions, whereas clinopyroxenes tend to plot closer to diopsidic composition within the augite field. These compositional characteristics indicate crystallization from mafic magmas in both intrusions.

Two-pyroxene thermobarometric calculations reveal that the Dee and Cecilia intrusions crystallized at different crustal levels. Estimated crystallization temperatures for the Dee intrusions range between approximately 1,030 and 1,090 °C, with corresponding emplacement pressures of 2.5–3.5 kbar, indicating emplacement at relatively shallow upper-crustal levels. In contrast, the Cecilia intrusion records crystallization temperatures of approximately 1000–1170 °C and emplacement pressures of 4.5–6.5 kbar, suggesting deeper emplacement within the middle to lower crust (Putirka, 2008; Brey and Köhler, 1990).

Fe–Ti oxide mineral chemistry and oxybarometric calculations indicate that both intrusions crystallized under oxidizing redox conditions. Calculated oxygen fugacity values for the Dee intrusions range between  $\Delta\text{NNO} \approx +0.3$  and  $+1.7$ , whereas values for the Cecilia intrusion cluster around  $\Delta\text{NNO} \approx +2.7$ . These results suggest that the Cecilia intrusion crystallized under relatively more oxidizing conditions compared to the Dee intrusions (Sauerzapf et al., 2008; Cao et al., 2018).

The collective evaluation of plagioclase zoning characteristics, pyroxene equilibrium relationships, and thermobarometric results indicate that the Dee and Cecilia intrusions crystallized under contrasting equilibrium and disequilibrium conditions. The narrow range of KD (Fe–Mg) values and the dominance of normal zoning in the Dee intrusions indicate a relatively equilibrated, single-stage crystallization history. In contrast, the wide dispersion of KD values in the Cecilia intrusion, together with oscillatory and reverse zoning, points to a more dynamic and multi-stage magmatic evolution. These disequilibrium features may be related to processes such as magma mixing, replenishment by hotter magma and/or prolonged magma storage at deeper crustal levels (Annen et al., 2015; Paterson et al., 2016).

There is no data in the literature about the absolute ages of the Dee and Cecilia intrusions; however, available regional geochronological data suggest that they most likely formed during the Late Cretaceous to Eocene interval (Pankhurst and Smellie, 1983; Smellie et al., 1984; Zheng et al., 2022; Altunkaynak et al., 2025). The significant variability of magmatic ages both between different islands and within individual islands along the South Shetland arc necessitates caution in making direct correlations. The intrusions may represent either different crustal-level intrusions of the same magmatic system or two distinct intrusive events related to separate stages of arc magmatism.

*In conclusion, the integration of field observations, petrographic analyses, mineral chemistry data, and geothermobarometric calculations demonstrate that the Dee and Cecilia intrusions represent mafic magmatic bodies emplaced at different crustal levels along the South Shetland arc. These results indicate that crustal magma storage and emplacement within the arc were vertically heterogeneous rather than uniform, and they may contribute to a more comprehensive understanding of the magmatic evolution of the South Shetland arc system with further studies in the future.*

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde, TÜBİTAK MAM KARE'nin koordinasyonunda TAE VIII. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler yazarın yürütücülüğünü yaptığı 125Y065 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında üretilmiştir. Mineral kimyası çalışmalarındaki destekleri sebebiyle sayın İbrahim Uysal ve Dirk Mueller'e teşekkürlerini sunmaktayım. Özellikle örnek hazırlama esnasındaki yardımları için Gökçenur Bayram ve Nisa Nur Sevinç'e de destekleri için teşekkür ederim. Bununla beraber, bu çalışma sırasında faydalı bilimsel fikir alışverişi ve tüm desteği nedeniyle sayın Şafak Altunkaynak'a minnetlerimi sunarım. Son olarak üç anonim hakeme ve sayın editör Erdiñ Yiğitbaş'a makaleye olan katkıları nedeniyle teşekkürlerimi iletirim.

## ORCID

Alp Ünal  <https://orcid.org/0000-0002-5078-9244>

## KAYNAKÇA / REFERENCES

Altunkaynak, Ş., Aldanmaz, E., Güraslan, I. N., Çalışkanoglu, A. Z., Ünal, A. & Nývlt, D. (2018).

Lithostratigraphy and petrology of Lachman Crags and Cape Lachman lava-fed deltas, Ulu Peninsula, James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula: Preliminary results. *Czech Polar Reports*, 8(1).  
<https://doi.org/10.5817/CPR2018-1-5>

Altunkaynak, Ş., Ünal, A., Howarth, G. H., Aldanmaz, E. & Nývlt, D. (2019). The origin of low-Ca olivine from ultramafic xenoliths and host basaltic lavas in a back-arc setting, James Ross Island, Antarctic Peninsula. *Lithos*, 342-343, 276-287.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.039>

Altunkaynak, Ş., Aldanmaz, E. & Nývlt, D. (2022). Effects of mantle hybridization by interaction with slab derived melts in the genesis of alkaline lavas across the back-arc region of South Shetland subduction system. *Journal of Petrology*, 63(11), Article egac111.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/egac111>

Altunkaynak, Ş., Aldanmaz, E., Velez, S., Forster, M. & Yang, J. H. (2025). Early Cretaceous to Eocene magmatic evolution of Livingston Island, South Shetland Archipelago: Geochronological and isotope geochemical constraints from intrusive suites. *Lithos*, 492-493, Article 107877.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107877>

Annen, C., Blundy, J. D., Leuthold, J. & Sparks, R. S. J. (2015). Construction and evolution of igneous bodies: Towards an integrated perspective of crustal magmatism. *Lithos*, 230, 206–221.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.008>

Bacon, C. R. & Hirschmann, M. M. (1988). Mg/Mn partitioning as a test for equilibrium between coexisting Fe–Ti oxides. *American Mineralogist*, 73(1–2), 57–61.

Bastías, J., Chew, D., Villanueva, C., Riley, T., Manfroi, J., Trevisan, C. ... & Jaña, R. (2023). The South Shetland Islands, Antarctica: Lithostratigraphy and geological map. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 1002760.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.1002760>

Berrocso, M., Fernández-Ros, A., Prates, G., García, A. & Kraus, S. (2016). Geodetic implications on block formation and geodynamic domains in the South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, 666, 211–219.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.10.023>

- Brey, G. P. & Köhler, T. (1990). Geothermobarometry in four-phase Lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, *31*(6), 1353–1378.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>
- Brown, M. (2013). Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*, *125*(7–8), 1079–1113.  
<https://doi.org/10.1130/B30877.1>
- Cao, M., Hollings, P., Cooke, D. R., Evans, N. J., McInnes, B. I., Qin, K. & Baker, M. (2018). Physicochemical processes in the magma chamber under the Black Mountain porphyry Cu–Au deposit, Philippines: Insights from mineral chemistry and implications for mineralization. *Economic Geology*, *113*(1), 63–82.  
<https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4544>
- Dalziel, I. W. D. & Elliot, D. H. (1982). West Antarctica: Problem child of Gondwanaland. *Tectonics*, *1*(1), 3–19. <https://doi.org/10.1029/TC001i001p00003>
- de Silva, S. L., Riggs, N. R. & Barth, A. P. (2015). Quickening the pulse: Fractal tempos in continental arc magmatism. *Elements*, *11*(2), 113–118.  
<https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.113>
- Ducea, M. N., Paterson, S. R. & DeCelles, P. G. (2015). High-volume magmatic events in subduction systems. *Elements*, *11*(2), 99–104.  
<https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.99>
- Ducea, M. N., Bergantz, G. W., Crowley, J. L. & Otamendi, J. (2017). Ultrafast magmatic buildup and diversification to produce continental crust during subduction. *Geology*, *45*(3), 235–238.  
<https://doi.org/10.1130/G38726.1>
- Dumont, J. F., Santana, E., Hervé, F. & Zapata, C. (2006). Regional structures and geodynamic evolution of North Greenwich (Fort Williams Point) and Dee Islands, South Shetland Islands. In Fütterer, D.K., Damaske, D., Kleinschmidt, G., Miller, H. & Tessensohn, F. (Eds.), *Antarctica, Contributions to Global Earth Sciences* (pp.: 255–260). Springer, Berlin, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/3-540-32934-X\\_31](https://doi.org/10.1007/3-540-32934-X_31)
- Dungan, M. A. & Rhodes, J. M. (1978). Residual glasses and melt inclusions in basalts from DSDP Legs 45 and 46: evidence for magma mixing. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *67*(4), 417–431. <https://doi.org/10.1007/BF00383301>
- Fitzgerald, P. G. (2002). Tectonics and landscape evolution of the Antarctic plate since the breakup of Gondwana, with an emphasis on the West Antarctic Rift System and the Transantarctic Mountains. In J. A. Gamble, D. N. B. Skinner & S. Henry (Eds.), *Antarctica at the Close of a Millennium, Royal Society of New Zealand Bulletin*, *35*, 453–469.
- Guterch, A., Grad, M., Janik, T., Perčuć, E. & Pajchel, J. (1985). Seismic studies of the crustal structure in West Antarctica 1979–1980—preliminary results. *Tectonophysics*, *114*(1–4), 411–429.  
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(85\)90024-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(85)90024-1)
- Haase, K. M., Beier, C., Fretzdorff, S., Smellie, J. L. & Garbe-Schönberg, D. (2012). Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *163*(6), 1103–1119.  
<https://doi.org/10.1007/s00410-012-0719-7>
- Hawkesworth, C. J., Blake, S., Evans, P., Hughes, R., Macdonald, R., Thomas, L. E., Turner, S.P. & Zellmer, G. (2000). Time scales of crystal fractionation in magma chambers-integrating physical, isotopic and geochemical perspectives. *Journal of Petrology*, *41*(7), 991–1006.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/41.7.991>
- Jankowski, E. J. & Drewry, D. J. (1981). The structure of West Antarctica from geophysical studies. *Nature*, *291*, 17–21. <https://doi.org/10.1038/291017a0>
- Jiang, W. P., E, D. C., Zhan, B. W. & Liu, Y. W. (2009). New model of Antarctic plate motion and its analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, *52*(1), 23–32. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1323>
- Kamenov, B. K. (2008). Multiepisodic dyke systems in Hurd Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands Volcanic Arc (Antarctica): Petrological and geochemical implications for their magma evolution. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, *46*, 103–142.
- Karlı, O., Moghadam, H. S., Kandemir, R., Aydın, F., Santos, J. F. & Demir, Y. (2025). Cretaceous arc magmatism in the Antarctic subduction system: Insights from major and trace element geochemistry and Sr–Nd–Hf–Pb isotopes. *Lithos*, *516–517*, Article 108277.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108277>

- Keller, R. A., Fisk, M. R., White, W. M. & Birkenmajer, K. (1992). Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin volcanism, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 111(2–4), 287–303. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90185-X)
- La Spina, G., Burton, M., de' Michieli Vitturi, M. & Arzilli, F. (2016). Role of syn-eruptive plagioclase disequilibrium crystallization in basaltic magma ascent dynamics. *Nature Communications*, 7, Article 13402. <https://doi.org/10.1038/ncomms13402>
- Leat, P. T. & Riley, T. R. (2021). Antarctic Peninsula and South Shetland Islands: Volcanology. *Geological Society, London, Memoirs*, 55(1), 185–212. <https://doi.org/10.1144/M55-2018-52>
- Leat, P. T., Scarrow, J. H. & Millar, I. L. (1995). On the Antarctic Peninsula batholith. *Geological Magazine*, 132(4), 399–412. <https://doi.org/10.1017/S0016756800021464>
- Machado, A., Lima, E. F., Chemale Jr., F., Morata, D., Oteiza, O., Almeida, D. P. M. & Urrutia, J. L. (2005). Geochemistry constraints of Mesozoic–Cenozoic calc-alkaline magmatism in the South Shetland arc, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(3–4), 407–425. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.11.011>
- Moreno-Alfonso, S. C., Okumura, S., Kilgour, G., Ubide, T., Iizuka, Y., Yasutake, M., Uesugi K., Jegal Y., Mead S. & Zellmer, G. F. (2026). Short crystal residence times and fast magma ascent prior to effusive eruptions at Mount Ruapehu, New Zealand. *Journal of Petrology*, 67(2), Article egag005. <https://doi.org/10.1093/petrology/egag005>
- Nixon, G. T. (1988). Petrology of the younger andesites and dacites of Iztaccihuatl volcano, Mexico: II. Chemical stratigraphy, magma mixing, and the composition of basaltic magma influx. *Journal of Petrology*, 29(2), 265–303. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.2.265>
- Pankhurst, R. J. & Smellie, J. L. (1983). K–Ar geochronology of the South Shetland Islands, Lesser Antarctica: Apparent lateral migration of Jurassic to Quaternary island arc volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 214–222. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90137-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90137-1)
- Paterson, S. R. & Ducea, M. N. (2015). Arc magmatic tempos: Gathering the evidence. *Elements*, 11(2), 91–98. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.2.91>
- Paterson, S. R., Memeti, V., Mundil, R. & Žák, J. (2016). Repeated, multiscale, magmatic erosion and recycling in an upper-crustal pluton: Implications for magma chamber dynamics and magma volume estimates. *American Mineralogist*, 101(10), 2176–2198. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5576>
- Petford, N., Cruden, A. R., McCaffrey, K. J. W. & Vigneresse, J. L. (2000). Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408(6813), 669–673. <https://doi.org/10.1038/35047000>
- Petsch, C., Rosa, K. K. D., Oliveira, M. A. D., Velho, L. F., Silva, S. L., Sotille, M. E. & Simões, J. C. (2022). An inventory of glacial lakes in the South Shetland Islands (Antarctica): Temporal variation and environmental patterns. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(Suppl. 1), Article e20210683. <https://doi.org/10.1590/0001-37652022020210683>
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Riley, T. R., Burton-Johnson, A., Flowerdew, M. J. & Whitehouse, M. J. (2018). Episodicity within a mid-Cretaceous magmatic flare-up in West Antarctica: U–Pb ages of the Lassiter Coast intrusive suite, Antarctic Peninsula, and correlations along the Gondwana margin. *Geological Society of America Bulletin*, 130(7–8), 1177–1196. <https://doi.org/10.1130/B31800.1>
- Sauerzapf, U., Lattard, D., Burchard, M. & Engelmann, R. (2008). The titanomagnetite–ilmenite equilibrium: New experimental data and thermo-oxobarometric application to the crystallization of basic to intermediate rocks. *Journal of Petrology*, 49(6), 1161–1185. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn021>
- Schärer, U., Kornprobst, J., Beslier, M. O., Boillot, G. & Girardeau, J. (1995). Gabbro and related rock emplacement beneath rifting continental crust: U–Pb geochronological and geochemical constraints for the Galicia passive margin (Spain). *Earth and*

- Planetary Science Letters*, 130(1–4), 187–200. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)00261-V](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)00261-V)
- Smellie, J. L., Pankhurst, R. J., Thomson, M. R. A. & Davies, R. E. S. (1984). The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, 87, 1–85.
- Smellie, J. L. (2020). The role of volcanism in the making of Antarctica. In Oliva, M, & Ruiz-Fernández, J. (Eds.), *Past Antarctica, Paleoclimatology and Climate Change* (ss. 69–87). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817925-3.00004-5>
- Smellie, J. L., Panter, K. S. & Geyer, A. (2021). Volcanism in Antarctica: 200 million years of subduction, rifting and continental break-up. *Geological Society of London Memoirs*, 55, 1–6. <https://doi.org/10.1144/M55>
- Smith, J. V. & Brown, W. L. (1988). *Feldspar minerals* (2. Edt.). Springer-Verlag.
- Stern, R. J. (2015). Magmatism at convergent plate boundaries. In *Encyclopedia of Marine Geosciences* (ss. 1–12). Springer.
- Streck, M. J. (2008). Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 595–622. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.15>
- Stimac, J. A. & Pearce, T. H. (1992). Textural evidence of mafic–felsic magma interaction in dacite lavas, Clear Lake, California. *American Mineralogist*, 77(7–8), 795–809.
- Ünal, A. (2025). Preliminary results on the geology and petrography of the Burro Peaks and Cecilia intrusions, South Shetland Islands (Antarctica). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (EGU25-10432).
- Zheng, G. G., Liu, X., Pei, J., Zhao, Y., Chen, H. & Li, J. (2022). Early Palaeogene mafic–intermediate dykes, Robert Island, West Antarctica: Petrogenesis, zircon U–Pb geochronology, and tectonic significance. *Geological Journal*, 57(6), 2209–2220. <https://doi.org/10.1002/gj.4402>



**Nadir Toprak Elementlerinin Jeolojik Oluşum Ortamları:  
Dünya ve Türkiye'den Örnekler**  
*Geological Formation Environments of Rare Earth Elements:  
Examples from Around the World and Türkiye*

**Okay Çimen<sup>1\*</sup> , Cahit Dönmez<sup>2</sup> **

<sup>1</sup> *Munzur Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, 62000, Tunceli, Türkiye*

<sup>2</sup> *MTA Uluslararası Madencilik A.Ş., 06530, Ankara, Türkiye*

• Geliş/Received: 19.12.2025 • Düzeltmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 24.02.2026 • Kabul/Accepted: 24.02.2026  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 13.04.2026 • Baskı/Printed: 30.04.2026

*Derleme Makale / Review Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Nadir toprak elementleri (NTE), başta NdFeB ve SmCo tipi kalıcı mıknatıslar olmak üzere savunma sanayi, enerji, elektronik, lazer ve sensör teknolojileri gibi stratejik alanlarda kullanılan kritik hammaddelerdir. 2000'li yıllardan itibaren küresel nadir toprak elementleri arzı, yüksek sermaye gereksinimleri ve çevresel düzenlemelerin getirdiği maliyetler nedeniyle Çin dışındaki üreticilerin rekabet gücünü yitirmesi sonucunda, madencilik, zenginleştirme ve ayırma süreçlerinde Çin'in baskın olduğu bir yapı kazanmıştır. Bu derleme çalışmasında, NTE'lerin jeolojik oluşum ortamları, yatak tipleri ve küresel rezerv-kaynak dağılımları bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır.

NTE mineralizasyonları, karbonatitler, alkalin magmatik sistemler ve Demir Oksit Bakır Altın (DOBA) yatakları gibi birincil jeolojik kaynaklar ile iyon-adsorpsiyon killeri, plaserler ve lateritik oluşumlar gibi ikincil kaynaklar içerisinde gelişmektedir. Birincil kaynaklar genellikle hafif NTE'lerce zengin ve yüksek maliyetli üretim süreçlerine sahipken, ağır NTE'ler çoğunlukla ikincil kaynaklardan elde edilmektedir. Dünya genelinde NTE rezervlerinin yaklaşık 90-120 Mt, potansiyel kaynakların ise ~480 Mt düzeyinde olduğu kabul edilmekte olup, Çin hem rezerv hem de kaynak bazında lider konumdadır. Avrupa'da Grönland, İsveç, Finlandiya, Norveç, Almanya ve Türkiye önemli NTE potansiyeline sahip bölgeler arasında yer almaktadır. Türkiye'de yatak ölçeğinde tanımlanmış başlıca NTE alanları Eskişehir-Kızılcaören (Beylikova) ve Malatya-Kuluncak sahalarıdır. Bu sahalar, alkalin magmatizma ile ilişkili olup özellikle Nd ve Pr (La ve Ce dışında) bakımından zengin karakter sergilemekte ve NdFeB mıknatıs üretimi açısından stratejik öneme sahiptir. Eti Maden tarafından yapılan son çalışmalar, Eskişehir-Kızılcaören sahasında yaklaşık 694 Mt büyüklüğünde ve %1,5-1,8 toplam NTE tenörüne sahip büyük ölçekli bir kaynak bulunduğunu göstermektedir. Eskişehir-Kızılcaören sahası Batı Anadolu'daki açılmalı tektonik rejimle ilişkiliyken, Malatya-Kuluncak sahası Orta Anadolu Kristalen Kompleksi'nde gelişen Geç Kretase-Erken Paleosen yaşlı çarpışma sonrası alkalin magmatizmasıyla ilişkilidir. Türkiye genelinde benzer alkalin sistemlerin varlığı, NTE aramacılığı ve kritik mineral stratejileri açısından önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Bu sentez, NTE arama stratejilerinin geliştirilmesine, küresel tedarik zincirlerinin çeşitlendirilmesine ve Türkiye'nin NTE potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik çalışmalara bütüncül bir jeolojik referans çerçevesi sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Alkalin magmatizma, birincil jeolojik kaynaklar, ikincil jeoloji kaynakları, kritik mineraller, lateritleşme, nadir toprak elementleri.

**Abstract:** Rare earth elements (REEs) are critical raw materials used in strategic fields such as defense, energy, electronics, lasers, and sensor technologies, and particularly in the production of permanent magnets including NdFeB and SmCo types. Since the early 2000s, the global supply of rare earth elements has become dominated by China for mining, beneficiation, and separation processes, as non-Chinese producers have lost competitiveness due to high capital requirements and the costs imposed by environmental regulations. This review addresses the geological formation environments, deposit types, and global reserve–resource distributions of REEs within an integrated framework.

REE mineralization occurs within primary geological sources such as carbonatites, alkaline magmatic systems, and iron oxide copper–gold (IOCG) deposits, as well as in secondary sources including ion-adsorption clays, placers, and lateritic formations. Primary sources are generally enriched in light REEs and are characterized by high-cost production processes, whereas heavy REEs are predominantly obtained from secondary sources. Globally, REE reserves are estimated to be approximately 90–120 Mt, while potential resources are on the order of ~480 Mt, with China occupying a leading position in terms of both reserves and resources. In Europe, Greenland, Sweden, Finland, Norway, Germany, and Türkiye are among the regions with significant REE potential. In Türkiye, the principal REE areas defined at the deposit scale are the Eskişehir–Kızılcaören (Beylikova) and Malatya–Kuluncak districts. These districts are associated with alkaline magmatism and display enrichment particularly in Nd and Pr (beyond La and Ce), rendering them strategically important for NdFeB permanent magnet production. Recent studies conducted by Eti Maden indicate that the Eskişehir–Kızılcaören area hosts a large-scale resource of approximately 694 Mt with total REE grades of 1.5–1.8%. The Eskişehir–Kızılcaören area is related to the extensional tectonic regime of Western Anatolia, whereas the Malatya–Kuluncak area is associated with post-collisional alkaline magmatism of Late Cretaceous–Early Paleocene age developed within the Central Anatolian Crystalline Complex. The presence of similar alkaline systems across Türkiye indicates significant potential for REE exploration and critical mineral strategies.

This synthesis provides a comprehensive geological reference framework for the development of REE exploration strategies, the diversification of global supply chains, and evaluation of Türkiye's REE potential.

**Keywords:** Alkaline magmatism, critical minerals, lateritization, primary geological resources, rare earth elements, secondary geological resources.

## GİRİŞ

Nadir toprak elementleri (NTE), periyodik tabloda atom numaraları 57-71 arasında yer alan ve lantanitler serisi olarak tanımlanan 15 elementten oluşan bir gruptur. Bu grup; lantanyum (La), seryum (Ce), praseodimiyum (Pr), neodimiyum (Nd), prometyum (Pm), samaryum (Sm), evropiyum (Eu), gadolinyum (Gd), terbiyum (Tb), disprosyum (Dy), holmiyum (Ho), erbiyum (Er), tulyum (Tm), iterbiyum (Yb) ve lütesyum (Lu) elementlerini kapsamaktadır. Kimyasal ve jeokimyasal özellikleri açısından lantanitlerle önemli benzerlikler gösteren skandiyum (Sc, 21) ve itriyum (Y, 39) elementleri, Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından nadir toprak elementleri grubuna dâhil edilmektedir. Bu iki element, özellikle üç değerlikli iyon durumlarında lantanitlerle benzer

iyonik yarıçaplara ve kimyasal davranışlara sahiptir. Nadir toprak elementleri, elektron konfigürasyonları ve atomik yarıçaplarındaki sistematik değişime bağlı olarak genellikle iki ana alt grupta sınıflandırılmaktadır. Buna göre hafif nadir toprak elementleri (HNTE) grubu La, Ce, Pr, Nd, Sm ve Eu elementlerini içerirken, ağır nadir toprak elementleri (ANTE) grubu Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb ve Lu elementlerinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, bazı araştırmalarda samaryum (Sm), evropiyum (Eu) ve gadolinyum (Gd) elementleri geçiş özellikleri göstermeleri nedeniyle orta nadir toprak elementleri (ONTE) başlığı altında ayrı bir alt grup olarak değerlendirilmektedir (Çimen, 2025).

NTE'ler, sahip oldukları özgün kimyasal ve fiziksel özellikler nedeniyle günümüzde birçok yüksek teknoloji uygulaması için vazgeçilmez

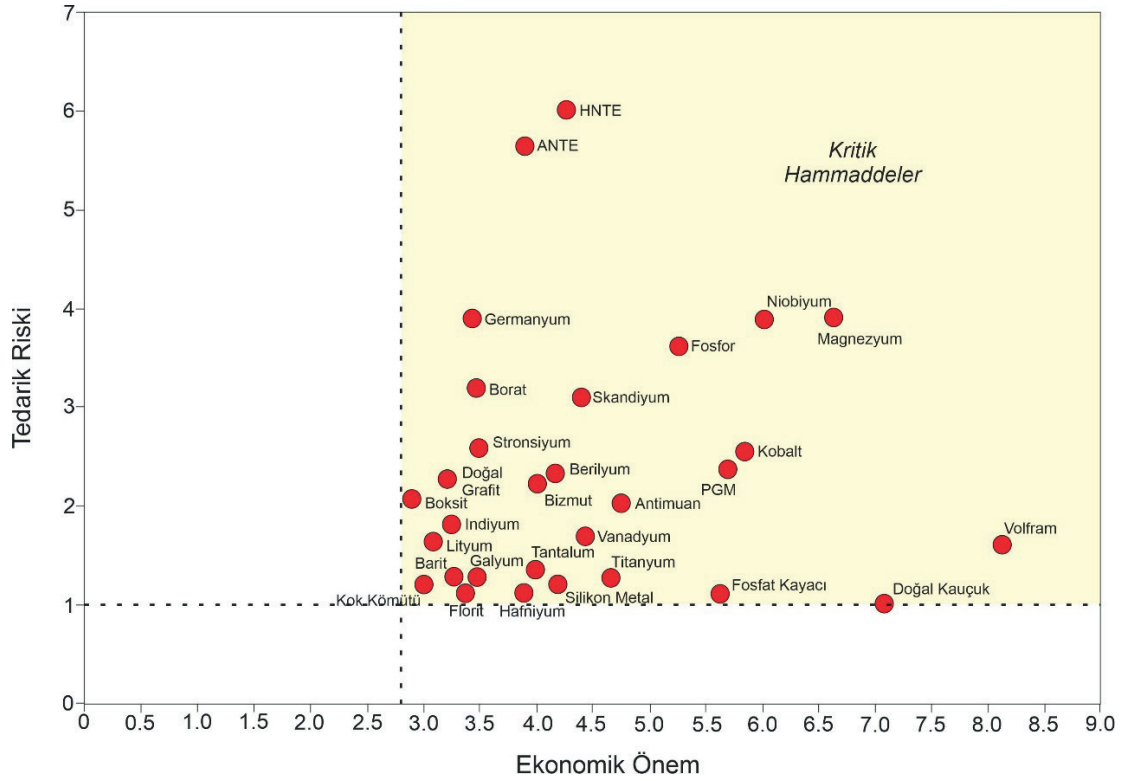
ve stratejik öneme sahip hammaddeler arasında yer almaktadır. Savunma sanayi, yenilenebilir enerji altyapıları, güneş enerjisi sistemleri, elektrikli araç teknolojileri ile bilgisayarlar ve akıllı telefonlar gibi ileri teknoloji ürünlerinin üretiminde NTE'ler kritik bileşenler olarak kullanılmaktadır (Goodenough vd., 2018). Nd, Dy ve Pr elementleri başta olmak üzere bazı NTE'ler, rüzgâr türbinleri, sabit disk sürücülerini ve elektrikli araç motorlarında kullanılan yüksek performanslı kalıcı mıknatısların üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Buna karşılık, Eu, Y, Tb, La ve Ce elementleri; fosfor esaslı floresan aydınlatma sistemleri, akıllı telefon ekranları ve batarya teknolojileri açısından kritik öneme sahip bileşenler arasında yer almaktadır (Guyonnet vd., 2015; Goodenough vd., 2018).

Küresel ölçekte NTE'lerin endüstriyel üretimi ilk kez 1952 yılında, Amerika Birleşik Devletleri'nde yer alan Mountain Pass yatağında başlamıştır. Bu elementlerin ticari ve endüstriyel kullanım alanları ise 1960'lı yılların başında, özellikle enformasyon teknolojileri ve petrol endüstrisi başta olmak üzere çeşitli sektörlerde yaygınlaşmaya başlamıştır. 1985 yılında Çin tarafından uygulamaya konulan ihracat vergisi indirimleri ve buna eşlik eden teşvik politikaları sonrasında, küresel NTE üretiminin ağırlık merkezi büyük ölçüde Çin'e kaymıştır. Küresel ölçekte zaman zaman yaşanan ekonomik dalgalanmalara ve krizlere rağmen, ileri teknoloji uygulamalarında NTE'lere duyulan ihtiyaç doğrultusunda bu elementlere yönelik talep artışı süreklilik göstermiş ve günümüze kadar kesintisiz biçimde devam etmiştir (Zhou vd., 2017). Tarihsel üretim verileri incelendiğinde, 1985-1995 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya ve Çin'in benzer NTE üretim paylarına sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık, özellikle 2005-2010 yılları arasında Çin'in üretim kapasitesini hızla artırmasıyla birlikte, küresel NTE arzında neredeyse tekel konumuna yükseldiği anlaşılmaktadır. Son yıllarda Çin'in küresel NTE üretimindeki baskın konumu kısmen azalmış

olmakla birlikte, yaklaşık %70 düzeyindeki payı ile hâlen ana üretici konumunu sürdürmektedir (Liu vd., 2023).

NTE'lerin yer kabuğundaki mutlak bolluklarının düşük olmasından ziyade, bu elementlerin zenginleştirilmesi ve birbirlerinden ayrılarak saflaştırılmasında karşılaşılan teknik ve ekonomik güçlükler bulunmaktadır. Yapay olarak üretilen ve radyoaktif özellik gösteren prometyum (Pm) dışında kalan NTE'ler, doğada yaygın olarak bulunmakta olup yer kabuğundaki ortalama bollukları yaklaşık 0,3 ppm ile 163 ppm arasında değişmektedir. Bununla birlikte, bu elementlerin yüksek ergime sıcaklıkları (yaklaşık 798 °C–1663 °C) ve benzer kimyasal davranışları, metalürjik ve kimyasal işlem süreçlerini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır (EuRare, 2018). Günümüzde ileri teknoloji uygulamalarının vazgeçilmez bileşenleri arasında yer alan NTE'ler, sahip oldukları görece yüksek ekonomik değer ve daha da önemlisi yüksek tedarik riski nedeniyle stratejik öneme sahip hammadde grupları arasında değerlendirilmektedir. Bu artan stratejik önem doğrultusunda, Avrupa Birliği tarafından 2011 yılından itibaren üçer yıllık periyotlarla yayımlanan Kritik Hammaddeler Listesi'nde NTE'ler, sürekli olarak en yüksek tedarik riski taşıyan hammaddeler arasında yer almaktadır (EC, 2020; Çimen, 2025; Şekil 1).

Yüksek teknoloji uygulamalarında NTE'lerin kullanımının zorunlu hâle gelmesi ve buna karşılık hammadde tedarikinde önemli risklerin bulunması, NTE madenciliğine yönelik talep artışının önümüzdeki dönemde de devam edeceğine işaret etmektedir. Bu doğrultuda, küresel ölçekte NTE potansiyelinin ortaya konulmasına yönelik arama ve keşif projeleri son yıllarda hız kazanmıştır. Bu çalışma kapsamında, NTE'lerin jeolojik oluşum ortamları ayrıntılı biçimde ele alınmakta; farklı yatak tipleri çerçevesinde dünya genelinden ve Türkiye'den seçilmiş örnekler sunularak NTE oluşumlarının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmaktadır.



**Şekil 1.** Kritik Hammaddeler içerisinde NTE'lerin pozisyonu (HNTE: Hafif NTE'ler, ANTE: Ağır NTE'ler, PGM: Platin Grubu Metaller, Avrupa Komisyonu, 2020; Çimen, 2025).

**Figure 1.** Position of REEs among critical raw materials (LREE: Light REEs, HREE: Heavy REEs, PGM: Platinum Group Metals; European Commission, 2020; Çimen, 2025).

## JEOLJİK OLUŞUM ORTAMLARI

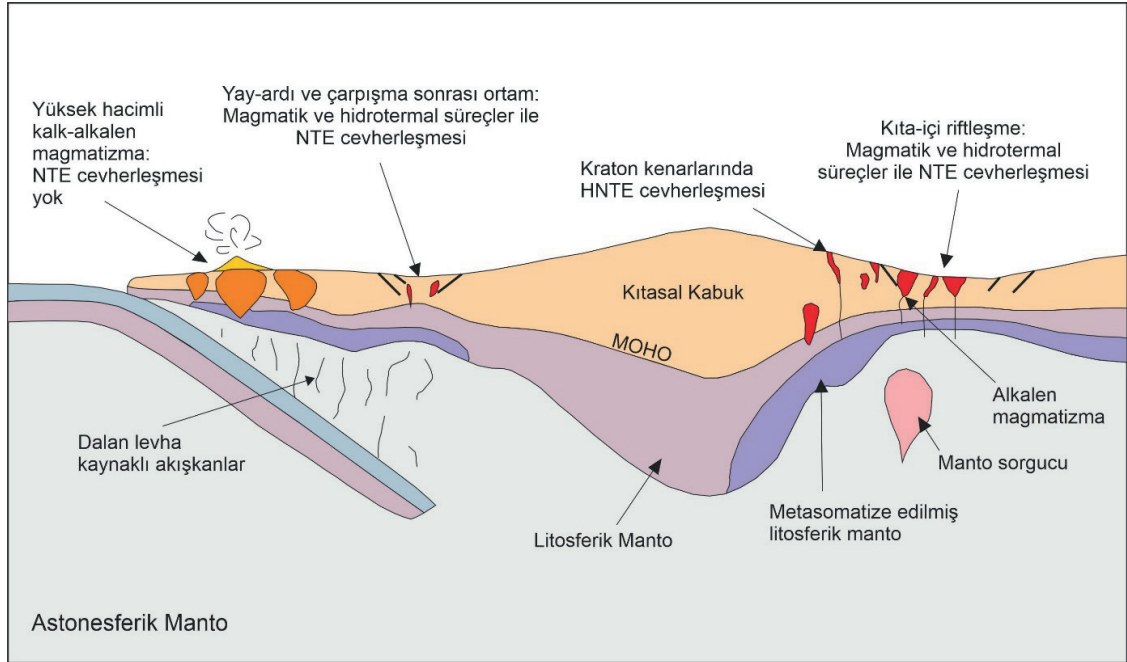
### Birincil ve İkincil Jeolojik Kaynaklar

NTE'lerin cevherleşme ortamları, oluşum süreçleri temel alınarak birincil magmatik sistemler ve ayrışma, aşınma, taşınım ve depolanma süreçleri sonucunda gelişen ikincil sistemler olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir. Küresel ölçekte yüksek tenör ve büyük rezerv potansiyeline sahip NTE yatakları çoğunlukla birincil magmatik sistemlerle ilişkili olup, başta karbonatitler ve alkalen kompleksler olmak üzere, yer yer demir-oksit bakır-altın (DOBA) yatakları ile birlikte bulunmaktadır (Zhou vd., 2017). Buna karşılık, genellikle daha sınırlı rezerv ve tenör değerlerine sahip olmakla birlikte, madencilik ve zenginleştirme açısından nispeten daha elverişli olan plaser yatakları, iyon absorpsiyon killeri,

lateritik oluşumlar ve fosforitler, NTE açısından ikincil sistemleri temsil etmektedir (Cocker, 2012). Birincil magmatik sistemlerle ilişkili NTE cevherleşmelerinin geliştiği jeolojik ortamlar incelendiğinde, bu tür oluşumların çoğunlukla kıta-içi riflleşme, yay-ardı ve çarpışma sonrası tektonik ortamlarda gerçekleşen magmatik ve hidrotermal süreçlerle ilişkili olduğu görülmektedir. Buna karşın, yüksek hacimli kalk-alkalen magmatizmanın baskın olduğu aktif yay ortamlarında ekonomik öneme sahip NTE cevherleşmelerine genellikle rastlanmamaktadır (Şekil 2; Goodenough vd., 2016). Birincil magmatik sistemlerde NTE cevherleşmeleri çoğunlukla bastnazit, monazit, ksenotim, ödialit, allanit, zirkon ve apatit gibi minerallerde yoğunlaşmakta; buna daha nadir gelişen farklı NTE mineralleri eşlik edebilmektedir (Cocker, 2012).

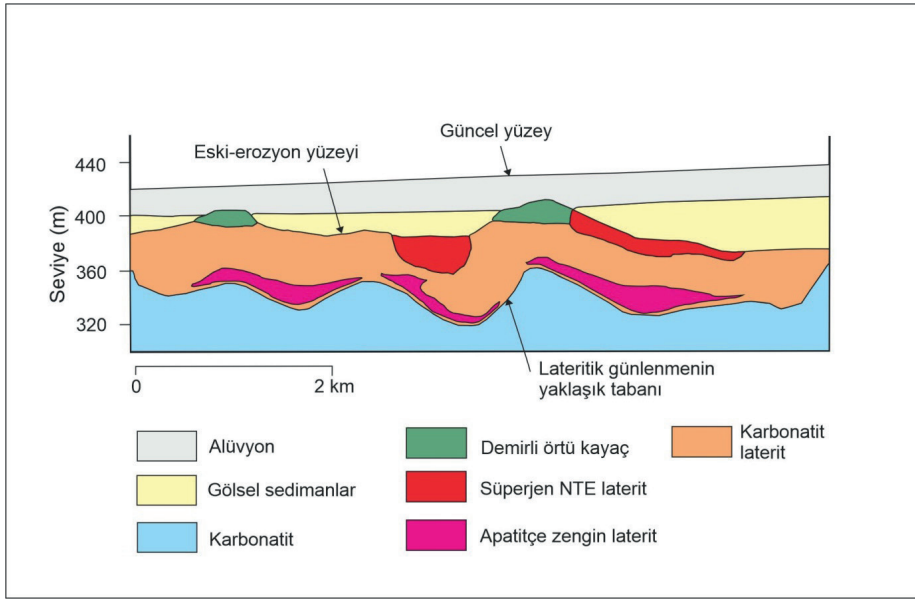
Sıcak ve nemli iklim koşulları altında gelişen yoğun kimyasal ayrışma süreçleri sonucunda oluşan lateritler, ekonomik ölçekte NTE içerebilen önemli ikincil cevherleşme ortamları arasında yer almaktadır (Şekil 3, Cocker, 2012). Bu tür ortamlarda gerçekleşen ileri derecedeki günlenme süreçleri, birincil ana kayalardan türeyen Al, Fe, Mn, Ni, Au, P ve Nb gibi elementlerin belirgin biçimde zenginleşmesine olanak sağlamaktadır. Söz konusu elementlerin, normal koşullar altında birincil minerallerden (örneğin Ni'nin olivinlerden, Al'un mika, kil veya feldispatlardan) doğrudan ve ekonomik olarak kazanılması genellikle güçtür. Lateritleşme süreci, kayaların mineralojik bileşimini ve buna bağlı olarak mineraller içerisindeki kimyasal bağ yapısını köklü biçimde değiştirmektedir. Bu süreç sonucunda Al içeren mikalar ve killer boksitlere, olivin ise garniyerit, Ni-zengin smektit veya Ni içeren götit gibi ikincil minerallere dönüşmektedir.

Bu tip sistemlerde NTE potansiyeli taşıyan alkalen kimyaya sahip kayaların uzun süreli fiziksel ve kimyasal ayrışmaya uğraması sonucunda NTE'ler mobilize olmakta ve özellikle kil minerallerinin yüzeylerinde adsorbe olarak NTE birikimi için elverişli jeokimyasal koşulları sağlamaktadır (Zhu vd., 2022). Bu mineralojik dönüşüm, metal kazanımını teknik ve ekonomik açıdan daha elverişli hâle getirmektedir. Asya, Avustralya, Afrika ve Güney Amerika'da, seviyelerde NTE içeriğine sahip çok sayıda lateritik oluşum tanımlanmıştır (Cocker, 2012). Özellikle Güneydoğu Çin'de lateritleşmiş granitik kayalar, 1980'li yıllardan itibaren ANTE'lerin başlıca kaynaklarından biri olarak işletilmektedir ve dünya ANTE rezervlerinin %80'den fazlasının bu bölgede bulunduğu kabul edilmektedir. Benzer şekilde, Avustralya'daki Mt. Weld yatağı da lateritik sistemlere dayalı NTE üretimine örnek teşkil etmektedir.



Şekil 2. Alkalem magmatik kayalar ve karbonatitler ile ilişkili NTE cevherleşmelerine ait jeolojik ortamlar (Goodenough vd., 2016'dan değiştirilmiştir).

Figure 2. Geological settings of REE mineralization associated with alkaline igneous rocks and carbonatites (modified after Goodenough et al., 2016).



**Şekil 3.** İkincil lateritik sistemlerle ilişkili NTE cevherleşmesine bir örnek (Mt. Weld-Avustralya, Cocker, 2012'den değiştirilmiştir).

**Figure 3.** An example of REE mineralization associated with secondary lateritic systems (Mt Weld, Australia; modified after Cocker, 2012).

### Jeolojik Oluşum Ortamının Metalurjik Süreçlere Etkisi

NTE'lerin zenginleştirilmesi ve saflaştırılmasına yönelik proseslerde mineralojik bileşim, süreç verimliliğini belirleyen en kritik parametrelerden biri olarak değerlendirilmektedir; zira her bir mineral fazı, kendine özgü teknik yaklaşımlar ve işlem akış şemaları gerektirmektedir (Jordens vd., 2013). Bu bağlamda, odialit, zirkon ve allanit gibi silikat yapıları ve refrakter özellik gösteren minerallerden NTE kazanımı hem teknik zorluklar hem de yüksek işlem maliyetleri nedeniyle sınırlayıcı bir unsur oluşturmaktadır. Buna ek olarak, ANTE'lerin, HNTE'lere kıyasla zenginleştirilmesi ve saflaştırılması süreçleri, daha karmaşık kimyasal davranışları nedeniyle önemli ölçüde daha zahmetlidir. Lateritik ve iyon absorpsiyon sistemlerinde ise NTE'ler çoğunlukla mineral yüzeylerine hidrasyon katyonları veya hidroksil-hidrasyon katyonları biçiminde zayıf bağlarla adsorbe edilmiş durumda bulunmaktadır. Bu özellik, inorganik tuzlarla iyon değişimi, zayıf

hidroklorik asit liçi ve solvent ekstraksiyonu gibi yöntemler aracılığıyla NTE kazanımının, birincil silikatlı sistemlere kıyasla daha kolay ve düşük maliyetli biçimde gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır (Cocker, 2012).

Dünya genelindeki başlıca NTE yataklarının tenör ve rezerv değerleri incelendiğinde, Bayan Obo (Çin), Strange Lake (Kanada), Zandkopsdrift (Güney Afrika), Mountain Pass (ABD) ve Bear Lodge (ABD) gibi birincil magmatik sistemlerle ilişkili NTE cevherleşmelerinde toplam nadir toprak oksit ( $\Sigma$ NTO) tenörlerinin yaklaşık %1,16 ile %8,24 arasında değiştiği görülmektedir (Çizelge 1). Buna karşılık, lateritik ayrışma ve zenginleşme süreçleriyle ilişkili sistemlerde NTE tenörleri daha geniş bir aralıkta dağılmakta olup, yaklaşık %0,035 ile %11,7 arasında değişmektedir. İkincil sistemlerde NTE'lerin zenginleştirilmesi ve saflaştırılması süreçlerinin, birincil magmatik sistemlere kıyasla daha basit ve düşük maliyetli olması nedeniyle, bu tür ortamlarda nispeten düşük tenörler dahi ekonomik

olarak işletilebilir kabul edilmektedir (örneğin %0,4 ve üzeri). Çin'de yer alan Jianghua sahası bu genellemeye bir istisna oluşturmaktadır. Çizelge 1'de de gösterildiği üzere, bu saha dünya genelinde nadir bulunan ve birim fiyatları daha yüksek olan ağır nadir toprak elementleri (ANTE) bakımından zengin içeriği sayesinde, toplam NTE tenörü daha düşük olmasına rağmen ekonomik olarak değerlendirilebilir niteliktedir. Güneydoğu Çin'deki granitik kayaçların lateritik günlenmesi sonucu gelişen bu tür ekonomik NTE cevherleşmeleri, literatürde iyon absorpsiyon tipi yataklar olarak tanımlanmaktadır. Sahada yaklaşık %0,03 tenöre sahip 13,5 milyon ton hafif NTE ile %0,5 tenöre sahip 2,13 milyon ton ağır NTE rezervi rapor edilmiştir. Cevher zonlarının kalınlığı yaklaşık 0,3 m ile 20 m arasında değişmektedir (Cocker, 2012).

### Önemli NTE Yataklarının Jeolojik Özellikleri

NTE üretimi açısından dünyanın en önemli cevherleşme alanı olarak kabul edilen Bayan Obo (Çin) sahasında ortalama NTE tenörü %6, rezerv

miktarı ise yaklaşık 48 Mt olarak rapor edilmiştir (Çizelge 1). Toplam kaynak miktarının yaklaşık 100 Mt düzeyinde olduğu ve ANTE oranının %1,13 seviyesinde bulunduğu belirtilmektedir (Liu vd., 2023). Sahada NTE üretiminin yanı sıra demir ve florit üretimi de gerçekleştirilmekte olup, cevherleşme önemli miktarda Nb içeriğiyle de dikkat çekmektedir. Yatak içerisindeki cevher kütleleri mercek şekilli olup yaklaşık doğu-batı (D-B) doğrultuludur ve güneye eğimlidir. Bu kütleler, D-B uzanımlı dolomitler içerisinde konumlanmaktadır. Karbonatit plütunu ile yan kayaçlar (metamorfik temel ve sedimanter birimler) arasındaki temas zonunda yoğun alkali hidrotermal alterasyon gelişmiştir (She vd., 2025). Yatakta gözlenen NTE mineralizasyonunun karbonatit magmatizması ile ilişkili olduğu görüşü literatürde büyük ölçüde kabul görmektedir (Li vd., 2025 ve içerisindeki referanslar). Bununla birlikte, cevherleşmenin yaşına ilişkin olarak 1800 My ile 390 My arasında değişen çok sayıda yaş verisi yayımlanmış olup, henüz kesin bir görüş birliği sağlanamamıştır (Fan vd., 2016 ve içerisindeki referanslar).

**Çizelge 1.** Bazı büyük NTE yatakları için tenör ve rezerv bilgileri ( $\Sigma\text{NTO}=\text{NTO}+\text{Y oksit}$ , Cocker, 2012).

**Table 1.** Grade and reserve information for some major REE deposits ( $\Sigma\text{REO} = \text{REO} + \text{Y}_2\text{O}_3$ ; Cocker, 2012).

Yatak Adı	Ülke	Kaynak Kayacı	Lateritleşme	Tenör	Rezerv (Mt)
Ngulla	Tanzanya	Karbonatit	Evet	%2,24 NTO	170
Bayan Obo	Çin	Demir Oksit-bakır-altın (IOCG)	Hayır	%6 $\Sigma\text{NTO}$	48
Strange Lake	Kanada	Alkale kompleks	Hayır	%1,16 NTO	36,53
Mt. Weld	Avustralya	Karbonatit	Evet	%7,9-11,7 NTO	23,94-9,7
Zandkopsdrift	Güney Afrika	Karbonatit	Hayır	%2,32 NTO	22,92
Tantalus	Madagaskar	Granit	Evet	%1,52 NTO	14,4
Mt. Pass	ABD	Karbonatit	Hayır	%8,24 NTO	13,6
Bear Lodge	ABD	Alkale kompleks	Hayır	%3,6 NTO	10,7
Dong Pao	Vietnam	Granit	Evet	%5,22 NTO	7,4
Araxa	Brezilya	Karbonatit	Evet	%5 $\Sigma\text{NTO}$	6,34
Jianghua	Çin	Granit	Evet	%0,035 $\Sigma\text{NTO}$	0,012
Mabounie	Gabon	Karbonatit	Evet	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Madeira	Brezilya	Karbonatit	Evet	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Pitinga	Brezilya	Apogranit	Evet	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Stromberg	Avustralya	Altere tüflü kumtaşı	Evet	%0,43 $\Sigma\text{NTO}$	Bilinmiyor

Bu geniş yaş aralığı, çok fazlı bir mineralizasyon sisteminin varlığına işaret etmektedir. Çin sınırları içerisinde Bayan Obo dışında öne çıkan diğer önemli NTE yatakları arasında Maoniuping (Sichuan), Weishan (Shandong), Xunwu ve Longnan (Jiangxi) ile Longyan (Fujian) yer almakta olup, bu yataklar karbonatitler, kuvars siyenitler ve alkali granitlerle ilişkili olarak gelişmiştir (Wu vd., 1996).

Diğer bir NTE üretimi yapılan önemli cevherleşme sahası ABD'nin Californiya Eyaletinde bulunan Mountain Pass yatağıdır. Bu yatak ihtiva etmiş olduğu %8,24 NTE tenörü ve 13,6 Mt'luk rezervi ile Çin dışında NTE madenciliği yapılan en önemli sahalardan biridir (Çizelge 1). Yatak tipik bir HNTE baskın cevherleşmeyi ihtiva etmektedir ve ANTE oranı %0,49 düzeyindedir (Liu vd., 2023). Mountain Pass karbonatiti ve ilişkili alkali kayaçlar, yaklaşık 130 km uzunluğa sahip dar bir alkali kayaç kuşağı içerisinde yer almaktadır ve NTE cevherleşmesini barındıran Sulphide Queen karbonatiti, orta derecede eğimli ve tabakamsı bir intrüzyon niteliğindedir. Bu kütle, yaklaşık 1400 My yaşında, benzer boyut ve doğrultuya sahip alkali plütonlarla birlikte gelişmiş olup, bölgede yaygın olarak gözlenen karbonatit ve alkali dayklarla mekânsal ve genetik ilişki göstermektedir (Castor, 2008). Bölgedeki Sulphide Queen karbonatiti iki ana karbonatit grubundan oluşmaktadır: a) Cevher tipleri, bastnazit-barit-sovit bileşimli kalsit karbonatitler ile bastnazit-barit-dolomit bileşimli dolomit karbonatitleri ve bunların karışımlarını içermektedir. b) Diğer tipler ise, parasit ve monazit gibi mineraller içeren hem kalsit hem de dolomit karbonatitlerden oluşmaktadır (Qasim vd., 2024). Cevher kütlesi mekansal olarak sınırlı bir yayılıma sahip olsa da (en geniş kesimde yaklaşık 700 m genişliğe ve en fazla 150 m kalınlığa ulaşmaktadır), yüksek tenörü sayesinde ekonomik açıdan oldukça değerli bir yatak niteliği taşımaktadır (Castor, 2008).

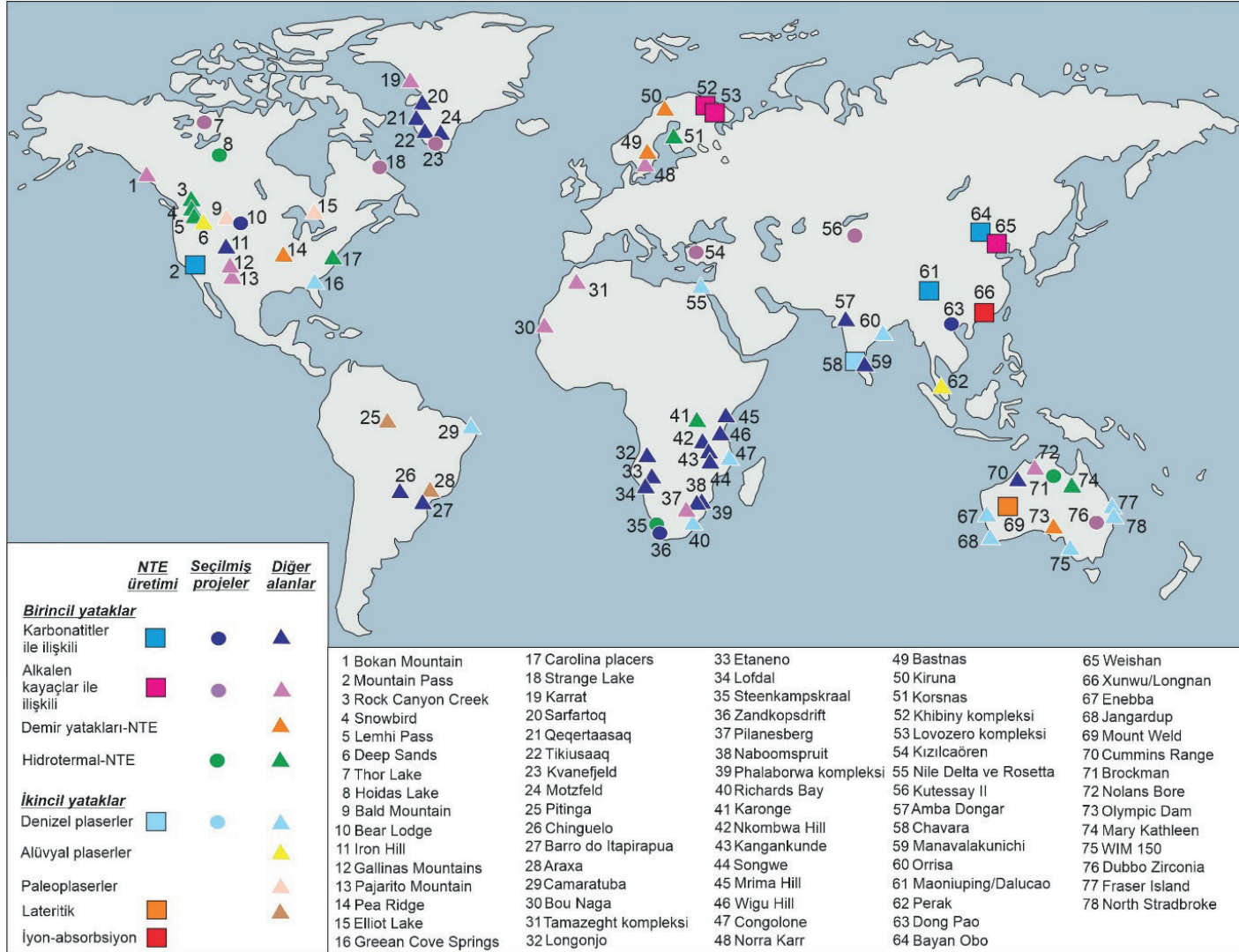
İkincil sistemlere iyi bir örnek olan Mount Weld yatağı (Batı Avustralya), dünya ölçeğinde bir NTE yatağı olup, 2011 yılında işletmeye açılmasından bu yana küresel REE arzında önemli bir kaynak haline gelmiştir. Yatak içerisindeki tenör oranı %7,9-11,7 arasında değiştirmektedir ve 23,94 Mt seviyesinde rezerve sahiptir (Çizelge 1). İlgili sahanın ANTE oranı ise %3,97 seviyesindedir (Liu vd., 2023). Mount Weld yatağı, intrüzif bir karbonatit stokunun ayrılmış üst zonu içerisinde yer almaktadır (Lottermoser, 1990). Yatakta ortalama NTE tenörü %9,8 düzeyinde olup, NTE içerikleri yer yer %45 seviyesine kadar ulaşmaktadır. Bu yüksek tenör değerleri, Mount Weld'i dünya üzerindeki en zengin NTE yatakları arasına yerleştirmektedir (Zhukova vd., 2021 ve içerisindeki referanslar). Mount Weld, dünya genelindeki Ngualla (Tanzanya), Bonga (Angola), Chilwa Island ve Mirima Hill (Malavi) gibi diğer karbonatit kompleksleriyle benzer litolojik özellikler sergilemektedir. Bu tip komplekslerde yaklaşık 600 m çapında merkezi bir magnezyokarbonatit-ferrokarbonatit birimi bulunmakta; bu çekirdek, yaklaşık 1,2 km genişliğinde bir kalsiyokarbonatit halkası ile çevrelenmektedir. Tüm sistem ise dış kesimde gelişmiş bir fenitleşme zonu ile kuşatılmıştır (Chandler vd., 2024). Mount Weld karbonatitinden elde edilen monazit-(Ce) üzerinde gerçekleştirilen Th-Pb yaşı ( $2056 \pm 67$  Ma), birincil mineralizasyonun yaşı için Paleoproterozoik döneme işaret etmektedir (Zhukova vd., 2021). Yatak içerisinde NTE'ler, çeşitli demir oksit, hidroksit ve oksihidroksitler (özellikle götit ve limonit) içerisinde ince taneli olarak yayılmış ikincil NTE-fosfat mineralleri bünyesinde bulunmaktadır ve bu mineralojik özellik, yataktaki REE zenginleşmesinin büyük ölçüde süperjen alterasyon ve ayrışma süreçleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir (Cook vd., 2023 ve içerisindeki referanslar). İkincil sistemlere örnek olarak diğer bir önemli NTE yatak türü olan iyon-adsorpsiyon tipi yataklar başlıca

Çin'in Jiangxi, Guangxi, Guangdong ve Fujian gibi güney eyaletlerinde yoğunlaşmıştır. Bu bölgeler, küresel ANTE üretiminin büyük kısmını karşılamakta olup, özellikle ayrılmış granitler üzerinde gelişen kil mineralleri yüzeylerine adsorbe olmuş NTE'ler ile karakterize edilmektedir (Guo vd., 2024). Örneğin, Jianghua yatağı 12.000 t civarında bir rezerv ile 350 ppm oranında bir tenöre sahiptir (Çizelge 1). Tüm bölgelerin 200 ppm NTE içeriği ile 8,4 Mt'luk bir kaynak potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir ve ANTE oranı %51,1 seviyesindedir (Liu vd., 2023). Bu tarz sistemlerde uygun ana kayalar arasında alkali mafik ve ultramafik kayalar, NTE bakımından zengin granit, siyenit, riyolit ve çeşitli metamorfik kayalar yer almaktadır ve bunların uzun süreli fiziksel ve kimyasal ayrışma süreçlerine maruz kalması ile NTE'lerin serbestleşmesi ve özellikle kil mineralleri üzerinde adsorpsiyon yoluyla zenginleşmesi için elverişli bir ortam oluşturmaktadır (Zhu vd., 2022). Jiangxi, Guangdong ve Fujian gibi bölgelerde iyon-adsorpsiyon tipi NTE yatakları, genellikle düşük rakımlı (100-300 m), hafif eğimli ve iyi drene olmuş tepelik alanlarda gelişmektedir. Ancak, daha yüksek rakım ve enlemlerde de Hedi sahası (Zhejiang Eyaleti) gibi benzer yataklar tanımlanmıştır ve bu tür oluşumların daha yüksek topoğrafik ve kuzey konumlu alanlarda da gelişebildiğine işaret etmektedir (Guo vd., 2024 ve içerisindeki referanslar). Örneğin, Qingyuan iyon-adsorpsiyon tipi NTE yatağının ana kayacını oluşturan biyotit monzogranit porfirinin, geç Yanshaniyen (135 My) döneminde Zhejiang ile Fujian eyaletleri arasındaki sınır bölgesinde olduğu öne sürülmüştür (Chen vd., 2020). Yatağın kil minerali içerikleri %4 ile %47 (ağırlıkça) arasında değişmekte olup, tanımlanan kil mineralleri başlıca kaolinit (yer yer halloysit formunda) olup, buna ikincil düzeyde illit ve iz

miktarda gibsit eşlik etmektedir (Guo vd., 2024). Özetle, yüksek NTE içeriğine sahip granitik kayalar, metamorfik ya da magmatik-hidrotermal süreçler, sıcak ve nemli iklim koşulları, düşük eğimli topoğrafya, geniş alanlı yayılım ve kalın granitik regolit gelişimi gibi parametrelerin varlığı iyon-adsorpsiyon tipi NTE yataklarının oluşumu açısından son derece önemlidir (Zhu vd., 2022).

## **DÜNYA GENELİ REZERV VE KAYNAK DURUMU**

Günümüzde dünya genelinde aktif olarak NTE madenciliği yapılan maden yatağı sayısı sınırlı olup yaklaşık 9 saha ile temsil edilmektedir. Bununla birlikte, küresel ölçekte NTE potansiyeline sahip çok sayıda cevherleşme alanı tanımlanmış durumdadır ve bu alanların bir kısmı, NTE madenciliği amacıyla geliştirilmekte olan yeni hedef sahalar konumundadır (Şekil 4; Walters vd., 2011). Barakos vd. (2015) tarafından, halen NTE üretimi yapılan yataklar jeolojik oluşum türlerine göre birincil ve ikincil yataklar olarak sınıflandırılmıştır. Söz konusu sınıflandırma çerçevesinde, gerek birincil magmatik sistemlerle ilişkili yatakların gerekse ikincil süreçler sonucunda gelişen cevherleşmelerin, ekonomik açıdan işletilebilir düzeyde rezerv ve tenör değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Dünya NTE ihtiyacı hâlen büyük ölçüde Güneydoğu Asya'daki madencilik faaliyetleriyle karşılanmaktadır. Buna karşılık, potansiyel NTE cevherleşme alanlarının başta Avustralya, Güney Afrika ve Kuzey Amerika olmak üzere belirli kıtalarda yoğunlaştığı dikkat çekmektedir (Şekil 4). Buna ek olarak, dünya genelinde tanımlanmış 11 NTE cevherleşme alanı için işletmeye yönelik geliştirme ve fizibilite çalışmaları sürdürülmekte olup, bu sahaların orta ve uzun vadede küresel NTE arzına katkı sağlaması beklenmektedir.

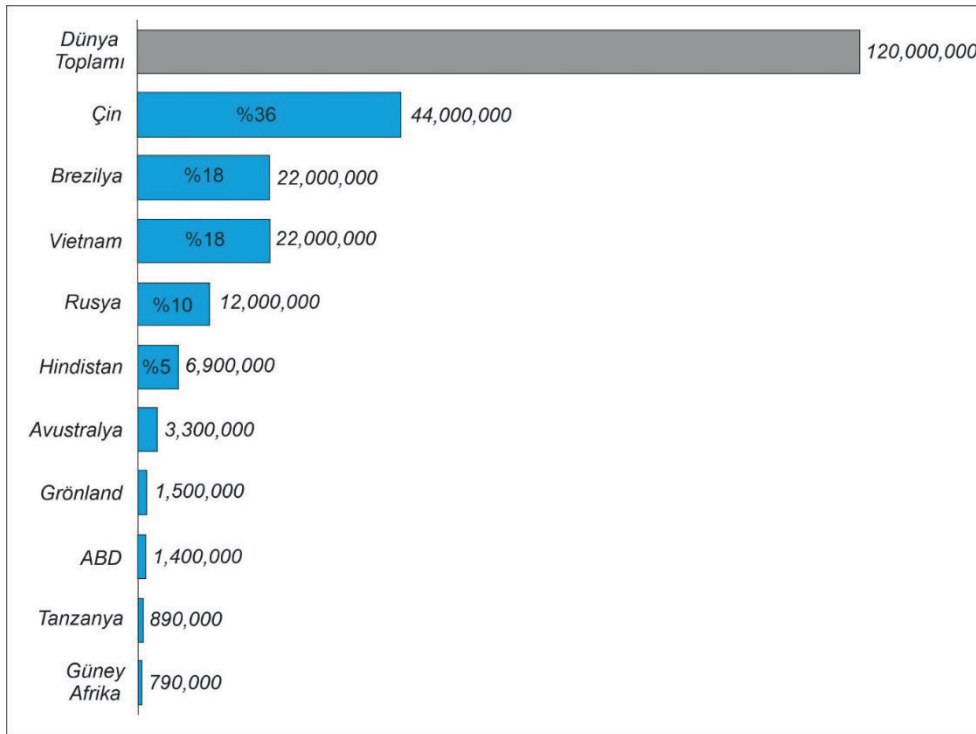


Şekil 4. Dünya genelinde NTE üretimi yapılan, seçilmiş önemli projeler ve diğer cevherleşme alanlarını gösteren lokasyonlar (Walters vd., 2011 ve Barakos vd., 2015'ten değiştirilmiştir).

Figure 4. Locations of selected major REE production projects and other significant mineralized areas worldwide (modified after Walters et al., 2011 and Barakos et al., 2015).

Küresel ölçekte toplam NTE rezervinin yaklaşık 120 milyon metrik ton (Mt) düzeyinde olduğu kabul edilmektedir (Şekil 5). Ülke bazında değerlendirildiğinde, Çin, yaklaşık 44 Mt rezervi ile dünya genelinde en yüksek NTE rezerv payına sahip ülke konumundadır. Çin'i, 22 Mt rezerv büyüklüğü ile Brezilya ve Vietnam izlemekte olup, Rusya ise yaklaşık 12 Mt rezerviyle önemli bir paya sahiptir. Bunlara ek olarak, Hindistan (6,9 Mt), Avustralya (3,3 Mt), Grönland (1,5 Mt), Amerika Birleşik Devletleri (1,4 Mt), Tanzanya (0,9 Mt) ve Güney Afrika (0,8 Mt) da dikkate değer NTE rezervlerine sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Mevcut veriler ışığında, Çin'in dünya genelindeki toplam NTE rezervlerinin yaklaşık %36'sını bünyesinde barındırdığı görülmektedir. Buna karşılık, Brezilya ve Vietnam, her biri yaklaşık %18'lik payları ile küresel ölçekte öne çıkan diğer iki önemli ülkeyi temsil etmektedir.

Uluslararası ölçekte NTE tedarik zincirlerinin çeşitlendirilmesi ve yeniden yapılandırılmasına yönelik çalışmalarda, burada sunulan rezerv büyüklükleri ile bu rezervlerin küresel yüzdelik dağılımları kritik bir değerlendirme ölçütü olarak dikkate alınmalıdır (Şekil 5). Amerikan Jeolojik Araştırmalar Merkezi (USGS) tarafından yayımlanan 2024 ve 2025 tarihli raporlarda, küresel ölçekte toplam NTE rezervi sırasıyla yaklaşık 110 Mt ve >90 Mt olarak rapor edilmiştir. Bu veriler, farklı değerlendirme yaklaşımları ve güncelleme dönemleri nedeniyle küresel toplam NTE rezerv büyüklüğüne ilişkin kesin ve tekil bir değer bulunmadığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut literatür ve resmi raporlar birlikte değerlendirildiğinde, dünya genelindeki toplam NTE rezervinin yaklaşık 90-120 Mt aralığında olduğu öngörülmektedir.

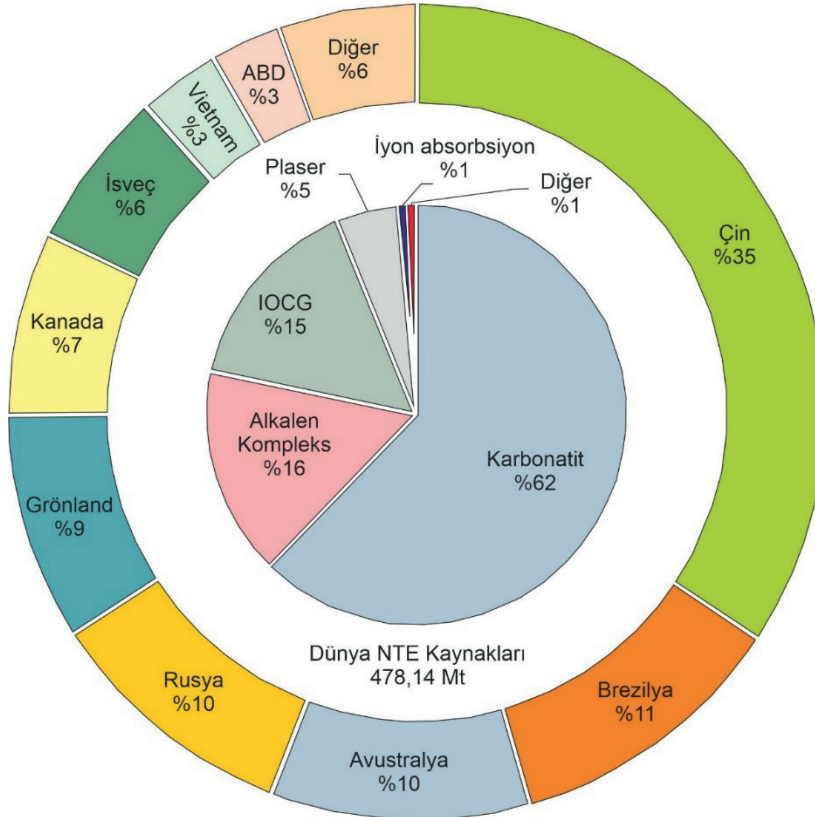


Şekil 5. Dünya geneli ülkeler bazında NTE rezervleri (mt=metrik ton, www.statista.com).

Figure 5. Global REE reserves by country (Mt = metric tons; source: www.statista.com).

Yukarıda sunulan küresel ölçekteki NTE rezerv verilerine ek olarak, ülkeler bazında NTE kaynak dağılımları da Şekil 6’da gösterilmektedir (Zhou vd., 2017). Mevcut değerlendirmelere göre, dünya genelindeki NTE rezervlerinin yaklaşık 90-120 Mt seviyesinde olduğu kabul edilirken, potansiyel NTE kaynaklarının ise yaklaşık 478 Mt düzeyine ulaştığı öngörülmektedir. Bu bağlamda, rezerv büyüklüklerinden bağımsız olarak, Kanada (%7) ve İsveç (%6) sahip oldukları NTE kaynak potansiyeli ile dikkat çeken ülkeler arasında yer almaktadır. Buna ilaveten, henüz uluslararası standartlarda bir rapor açıklanmamasına rağmen Türkiye’de Eskişehir-Kızılcasöğüt (Beylikova) sahasında yürütülen çalışmalar sonucunda yaklaşık 12 Mt NTE oksit içeren 694 Mt’luk bir

kaynağın tespit edildiği ifade edilmiştir (MİA, 2025). NTE kaynaklarının jeolojik cevherleşme türleri ile ilişkisi incelendiğinde, cevherleşmelerin yaklaşık %62’sinin karbonatitlerle ilişkili olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla alkale komplekslere bağlı NTE cevherleşmeleri (%16) ve DOBA tipi sistemler (%15) izlemektedir. Daha sınırlı oranlarda olmak üzere, plaser (%5), iyon absorpsiyon tipi (%1) ve diğer cevherleşme türleri (%1) de NTE kaynakları içerisinde yer almaktadır (Zhou vd., 2017). Bu dağılım açıkça göstermektedir ki, karbonatitler ve alkale kompleks sistemler hem rezerv büyüklükleri hem de kaynak potansiyelleri açısından NTE cevherleşmeleri için en umut vadeden jeolojik ortamlar konumundadır.



Şekil 6. Küresel NTE kaynaklarının ülkelere ve cevherleşme türüne göre dağılımı (Zhou vd. 2017’den değiştirilmiştir).

Figure 6. Distribution of global REE resources by country and deposit type (modified after Zhou et al., 2017).

NTE madenciliğinde, fiziksel ve kimyasal zenginleştirme işlemlerine geçilmeden önce cevher bünyesindeki NTE minerallerinin doğru ve ayrıntılı biçimde tanımlanması, en kritik aşamalardan biri olarak kabul edilmektedir (Goodenough vd., 2016). Uygulanacak fiziksel ve kimyasal zenginleştirme proseslerinin seçimi, doğrudan cevherleşme ortamında bulunan NTE minerallerinin türüne ve mineralojik özelliklerine bağlıdır. Başka bir ifadeyle, bünyesinde farklı NTE minerallerini barındıran bir cevherleşme sahasında, tek tip bir zenginleştirme yaklaşımı yerine, her mineral fazına özgü farklı fiziksel ve kimyasal işlem yöntemlerinin birlikte veya ardışık

olarak uygulanması gerekmektedir. Çizelge 2'de, ekonomik açıdan önem arz eden ve bünyelerinde yüksek düzeyde NTE içeren başlıca mineraller sunulmaktadır. Söz konusu NTE mineralleri, kimyasal bileşimleri ve kristal kimyaları dikkate alındığında, genel olarak silikat, oksit, karbonat ve fosfat grubu mineraller olmak üzere dört ana sınıf altında toplanmaktadır. Küresel ölçekte NTE madenciliği faaliyetleri ağırlıklı olarak bastnazit, monazit ve ksenotim mineralleri üzerinde yoğunlaşmakta olup, bu mineraller sırasıyla yaklaşık %76, %71 ve %61 oranlarında nadir toprak elementi içeriğine sahiptir (Çizelge 2; Goodenough vd., 2016).

**Çizelge 2.** NTE içeren önemli mineraller veya mineral grupları (Goodenough vd. 2016'dan değiştirilmiştir).

**Table 2.** Major minerals and mineral groups hosting REEs (modified after Goodenough et al., 2016).

NTE Mineralleri veya Mineral Grupları	Genelleştirilmiş Formülü	NTO İçerikleri (%wt)	Cevherleşme Türü
Aeskinit	$NTE(Ti,Nb)_2(O,OH)_6$	36	Hidrotermal
Allanit	$(NTE,Ca)_2(Al,Fe)_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$	30	Alkalen Kompleks
Ankilit	$HNTE(Sr,Ca)(CO_3)_2(OH).H_2O$	46	Karbonatit
Bastnazit	$NTE(CO_3)F$	76	Karbonatit, Hidrotermal
Britolit	$(NTE,Ca)_3(SiO_4)_3(OH,F)$	62	Hidrotermal
Brokit	$(Ca,Th,Ce)(PO_4).H_2O$	24	Hidrotermal
Burbankit	$(Na,Ca)_3(Sr,Ba,HNTE)_3(CO_3)_5$	11	Karbonatit
Serit	$(HNTE,Ca)_3(Mg,Ca,Fe^{3+})(SiO_4)_3(SiO_3OH)_4(OH)_3$	75	Hidrotermal
Dollasit	$CaHNTE(Mg,Al)[Si_2O_7][SiO_4]F(OH)$	32	Hidrotermal
Öksenit	$(NTE,Ca,Th,U)(Nb,Ta,Ti)_2O_6$	40	Alkalen Kompleks
Fergusonit	$NTENbO_4$	47	Alkalen Kompleks
Floserit	$NTEF_3$	32	Hidrotermal
Gadolinit	$NTE_2Fe^{2+}Be_2O_2(SiO_4)_2$	52	Hidrotermal, Alkalen Kompleks
Monazit	$NTE(PO_4)$	71	Karbonatit, Hidrotermal, Alkalen Kompleks, Plaser
Parisit	$CaHNTE_2(CO_3)_3F_2$	63	Karbonatit
Perierit	$NTE_4(Mg,Fe,Ti)_4O_8(Si_2O_7)_2$	40	Plaser
Piroklor	$(Na,Ca)_2Nb_2O_6(OH,F)$	3	Karbonatit
Stinstrupin	$Na_4HNTE_6Mn_2Fe^{3+}_2Zr(PO_4)_7Si_{12}O_{36}(OH)_2 \cdot 3H_2O$	30	Alkalen Kompleks
Sinçisit	$CaNTE(CO_3)_2F$	51	Karbonatit, Hidrotermal
Vastmandanlit	$Ce_3CaMg_2Al_2Si_5O_{19}(OH)_2F$	26	Hidrotermal
Ksenotim	$(Y,HREE)PO_4$	61	Hidrotermal, Alkalen Kompleks, Plaser

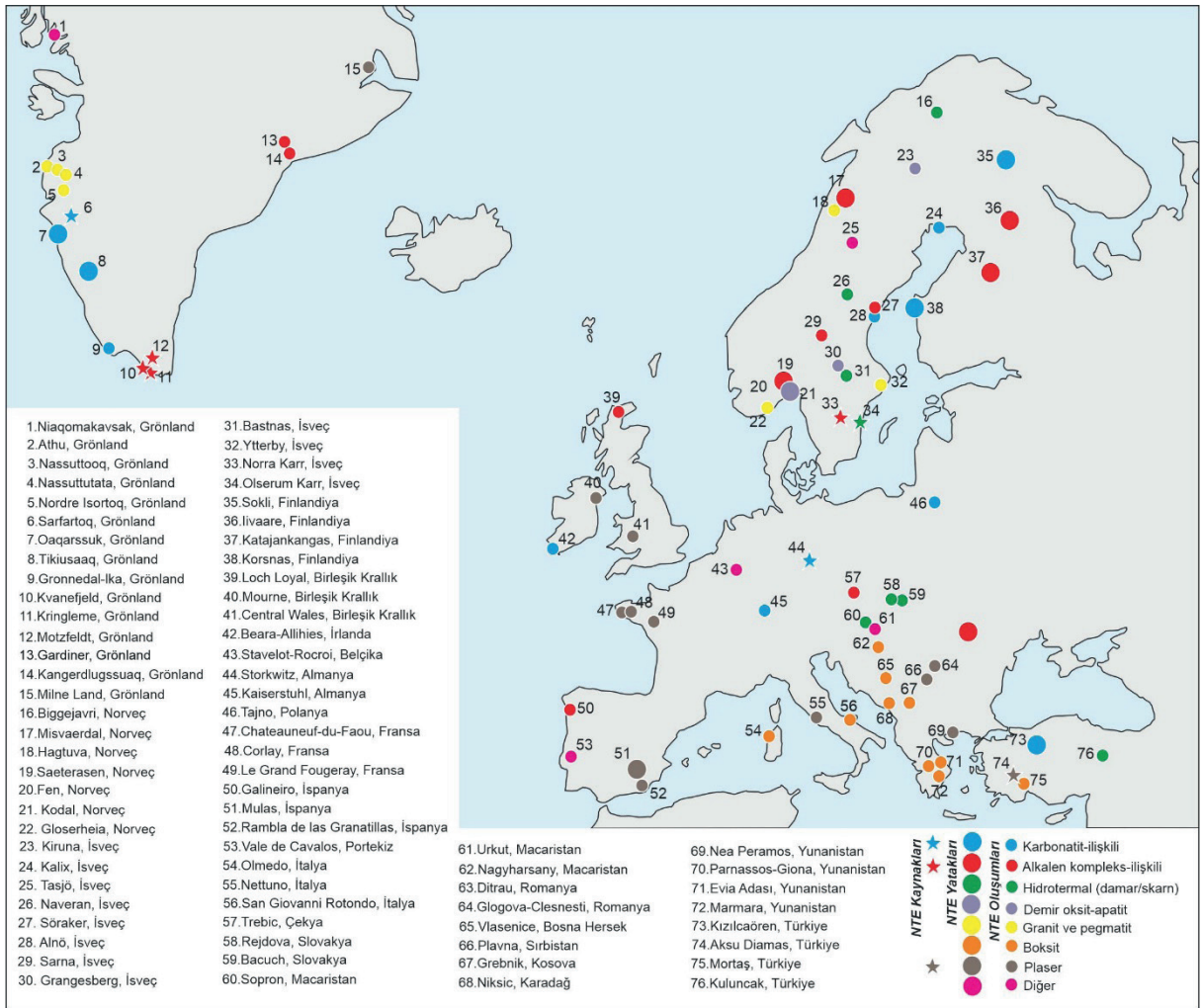
## AVRUPA GENELİ POTANSİYEL ALANLAR

NTE tedarik zincirinin büyük ölçüde Çin'in kontrolünde olması, küresel ölçekte zaman zaman beklenmedik arz kesintileri ve tedarik risklerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu risklere karşılık olarak, Avrupa Komisyonu, NTE arz güvenliğini artırmaya yönelik çeşitli stratejik önlemleri hayata geçirmeye başlamıştır. Bu kapsamda, Avrupa Birliği sınırları içerisinde ve yakın çevresinde yer alan NTE cevherleşme alanlarının potansiyelinin daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi amacıyla, 2014-2018 yılları arasında "EuRare" ve 2016-2020 yılları arasında "HiTech AlkCarb" başlıklı araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) projeleri desteklenmiştir. Söz konusu projeler, Avrupa'nın NTE kaynaklarını tanımlamayı, karakterize etmeyi ve sürdürülebilir şekilde değerlendirmeyi hedefleyen bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Söz konusu projeler kapsamında, birincil jeolojik kaynaklardan NTE'lerin teminine yönelik olarak öncelikli çalışma alanları tanımlanmış, cevherleşme mekanizmaları ayrıntılı biçimde incelenmiş ve potansiyel sahalar sistematik olarak sınıflandırılmıştır (EuRare, 2018). Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, Şekil 7'de özetlenmekte olup, Türkiye'nin de dâhil edildiği bu değerlendirmeler çerçevesinde, NTE yataklarının büyük ölçüde İskandinavya ülkeleri ve Grönland coğrafyasında yoğunlaştığı ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, Türkiye'de yer alan Eskişehir-Kızılcıören (diğer ismi Beylikova) sahası da Avrupa ölçeğinde değerlendirilen önemli NTE alanları arasında ele alınmıştır. Ayrıca, çok sayıda NTE oluşumu ve potansiyel kaynak alanının da haritalama çalışmalarına dâhil edildiği görülmektedir (Şekil 7). Avrupa genelinde ekonomik düzeyde NTE içeren yatakların jeolojik özellikleri incelendiğinde, bu sahaların büyük oranda karbonatitler ve alkalin komplekslerle ilişkili olduğu dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, daha sınırlı sayıda olmak

üzere demir-oksit-apatit ve plaser tipi NTE cevherleşmelerinin de tanımlandığı bilinmektedir. Şekil 7'de sunulan NTE oluşumlarının, hemen hemen tüm cevherleşme türleriyle ilişkili olabildiği görülmekte olup, bu oluşumların gerçek potansiyellerinin ortaya konulabilmesi için ayrıntılı jeolojik, jeokimyasal ve mineralojik çalışmalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır.

Avrupa'daki NTE cevherleşme alanlarının, Prekambriyen'den Senozoyik dönemlerine kadar kapsayan geniş bir jeolojik zaman aralığında oluştuğu görülmektedir (Goodenough vd. 2016). Türkiye sınırları içerisinde ise günümüze kadar tanımlanmış NTE cevherleşmelerinin ağırlıklı olarak Mesozoyik-Senozoyik NTE kuşağı içerisinde yer aldığı anlaşılmaktadır (Şekil 8). Bu çalışmada Türkiye'ye ilişkin sunulan veriler, mevcut sınırlı literatür bilgilerine dayanmaktadır. Buna karşın, Avrupa Kıtası genelinde tanımlanmış daha yaşlı NTE kuşakları dikkate alındığında, Türkiye'de özellikle Prekambriyen ve Paleozoyik yaşlı jeolojik birimlerle ilişkili potansiyel NTE oluşumlarının ortaya konulabilmesi amacıyla arama ve araştırma faaliyetlerinin artırılması gerekmektedir. Çizelge 3'te, Avrupa genelinde yüksek potansiyele sahip nadir NTE sahaları sunulmaktadır. Bu dağılım incelendiğinde, sırasıyla Grönland, İsveç, Finlandiya, Almanya, Norveç ve Türkiye sınırları içerisinde yer alan alanların öne çıktığı görülmektedir. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, Burdur-Çanaklı yöresinde yer alan ve Aksu-Dimas olarak adlandırılan plaser tipi cevherleşme alanının, yaklaşık 700 ppm düzeyinde nispeten düşük NTE tenörüne sahip olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşın, söz konusu sahada rapor edilen yaklaşık 494 milyon tonluk kaynak potansiyeli, alanın stratejik önemini artıran temel unsur olarak dikkat çekmektedir. Bu saha hâlihazırda Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından ruhsatlandırılmış olup, önümüzdeki dönemde daha ayrıntılı NTE prospeksiyon ve değerlendirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

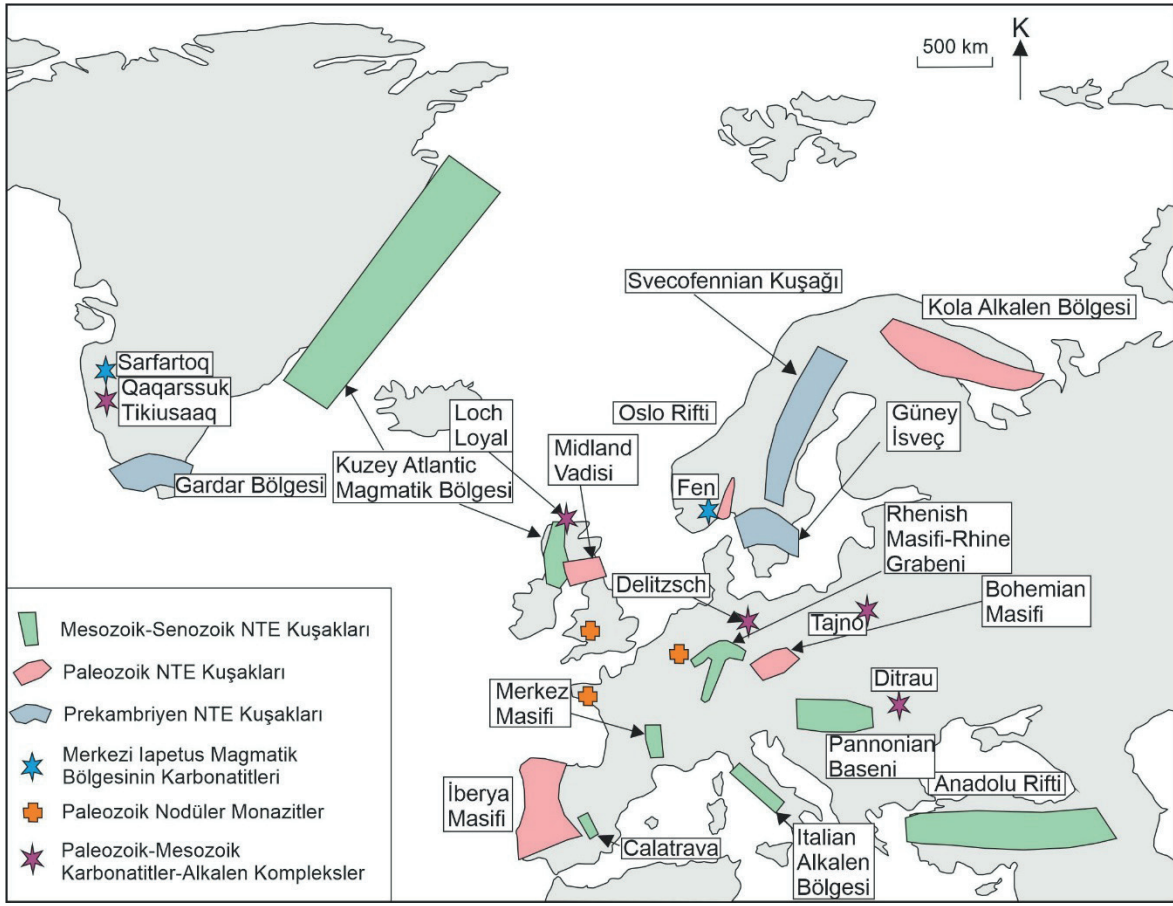


Şekil 7. Avrupa Kıtası üzerindeki NTE cevherleşme alanları (EuRare, 2018'den değiştirilmiştir).

Figure 7. REE mineralization in the European continent (modified after EuRare, 2018).

EuRare (2018) verilerine göre, Avrupa sınırları içinde rezerv ve tenör verileri açısından yüksek düzeyde doğrulanmış tek NTE sahası, Grönland'daki Kvanefjeld olarak görülmektedir. Bu saha, yaklaşık %1,21  $\Sigma$ NTO tenörüne ve 143 Mt kaynak büyüklüğüne sahiptir (Çizelge 3). Avrupa'daki diğer NTE sahalarında ise arama, tanımlama ve kaynak geliştirme çalışmaları hâlen sürmekte olup, bu alanların gerçek potansiyellerinin önümüzdeki dönemde daha net biçimde ortaya konulması beklenmektedir. Şekil 9'da, Avrupa'daki potansiyel NTE cevherleşme

alanları; dünya genelinde ekonomik olarak işletilen NTE yatakları ile tenör ve cevher miktarları temel alınarak karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu karşılaştırma kapsamında, Rusya'da bulunan ve alkalen komplekslerle ilişkili Lovozero sahası dışında, Avrupa'daki potansiyel NTE alanlarının büyük çoğunluğunun, küresel ölçekte işletilen yataklara kıyasla tenör bakımından daha düşük, cevher miktarı açısından ise değişken özellikler sergilediği anlaşılmaktadır (Goodenough vd., 2016).



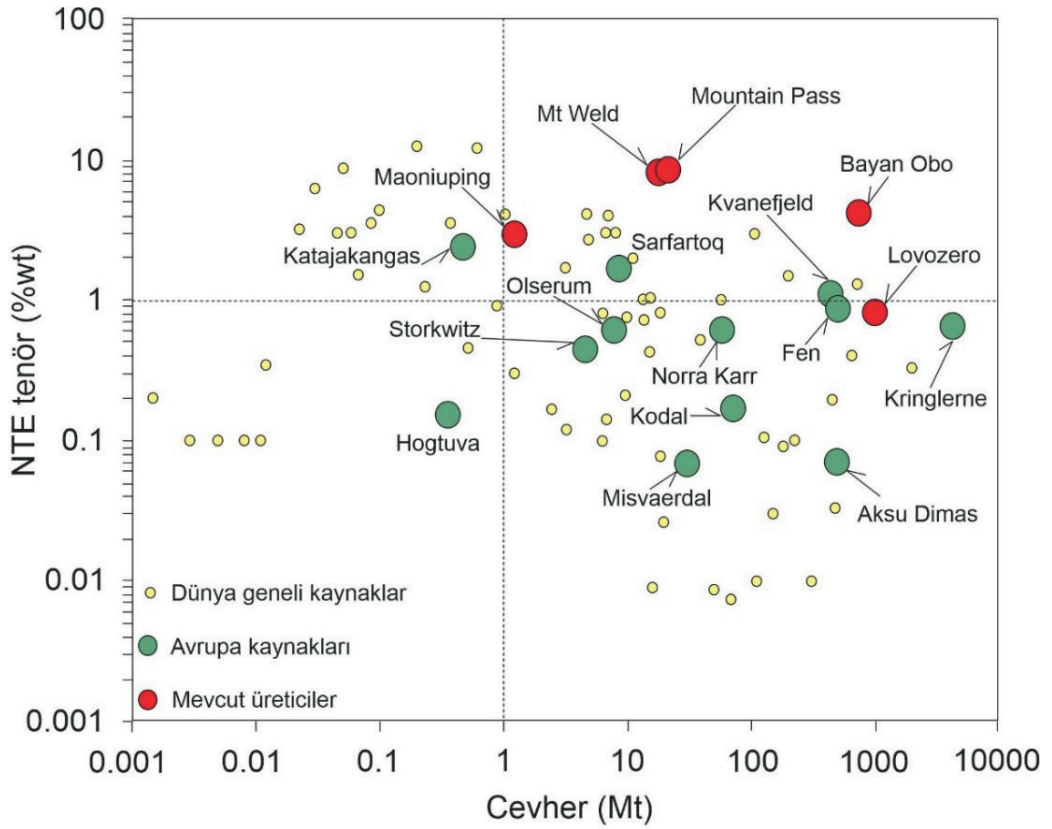
Şekil 8. Avrupa Kıtası üzerindeki NTE cevherleşme kuşakları (Goodenough vd., 2016'dan değiştirilmiştir).

Figure 8. REE mineralization belts in the European continent (modified after Goodenough et al., 2016).

Çizelge 3. Avrupa'daki yüksek potansiyele sahip NTE cevherleşme alanları (EuRare, 2018'den alınmıştır).

Table 3. High-potential REE mineralization areas in Europe (after EuRare, 2018).

Cevherleşme Alanı	Ülke	Ölçülen Kaynak (Yüksek Seviyede Güvenilir)	Belirtilen Kaynak (Makul Seviyede Güvenilir)	Anlaşılan Kaynak (Düşük Seviyede Güvenilirlik)
Katajakangas	Finlandiya	Bilinmiyor	Bilinmiyor	0,46 Mt / %2,4 $\Sigma$ NTO
Storkwitz	Almanya	Bilinmiyor	Bilinmiyor	4,4 Mt / %0,45 $\Sigma$ NTO
Kringlerne	Grönland	Bilinmiyor	Bilinmiyor	4700 Mt / %0,65 $\Sigma$ NTO
Kvanefjeld	Grönland	143 Mt / %1,21 $\Sigma$ NTO	308 Mt / %1,11 $\Sigma$ NTO	559 Mt / %1,07 $\Sigma$ NTO
Motzfeldt (Aries)	Grönland	Bilinmiyor	Bilinmiyor	340 Mt / %0,26 $\Sigma$ NTO
Sarfartoq	Grönland	Bilinmiyor	5,88 Mt / %1,77 $\Sigma$ NTO	2,46 Mt / %1,59 $\Sigma$ NTO
Fen	Norveç	Bilinmiyor	Bilinmiyor	84 Mt / %1,08 $\Sigma$ NTO
Norra Kärr	İsveç	Bilinmiyor	31,1 Mt / %0,61 $\Sigma$ NTO	Bilinmiyor
Olserum	İsveç	Bilinmiyor	4,5Mt / %0,6 $\Sigma$ NTO	3,3Mt / %0,63 $\Sigma$ NTO
Aksu Dıamas	Türkiye	Bilinmiyor	494 Mt / %0,07 $\Sigma$ NTO	Bilinmiyor



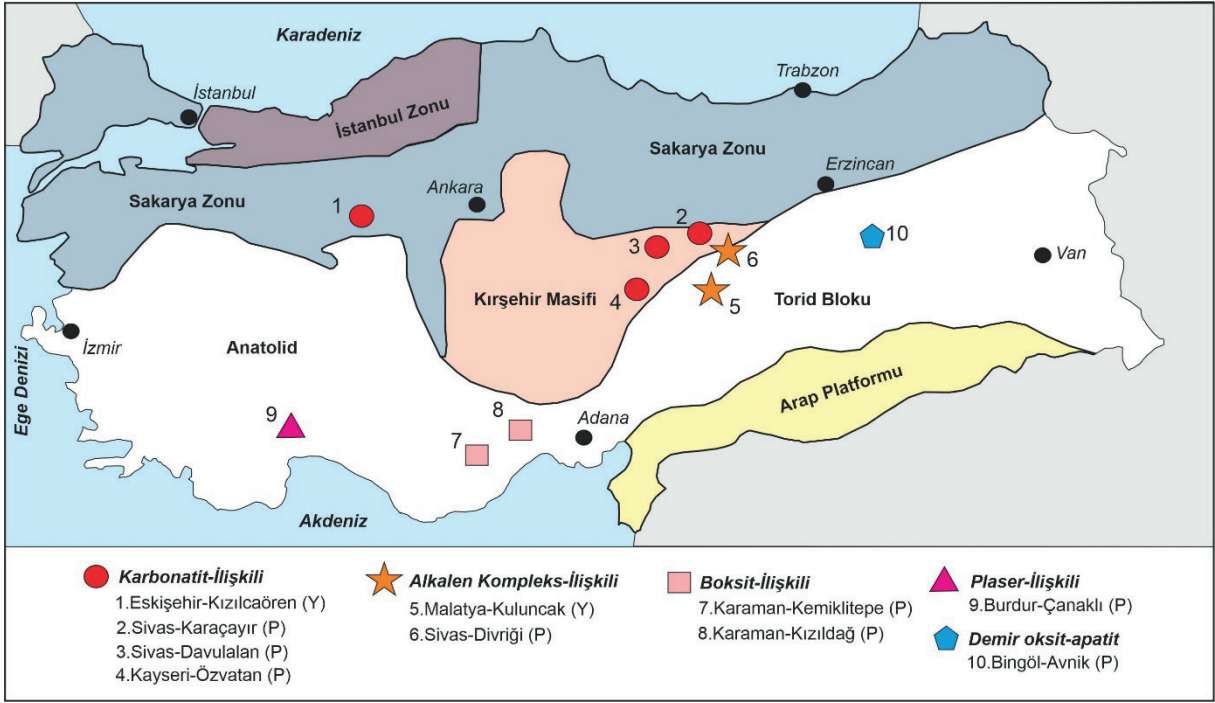
**Şekil 9.** NTE üretimi yapılan cevherleşme alanları ile Avrupa ve Dünya genelindeki diğer potansiyel cevherleşmelerin kıyaslanması (Goodenough vd. 2016'dan değiştirilmiştir).

**Figure 9.** Comparison of REE deposits currently in production with other potential REE mineralization areas in Europe and worldwide (modified after Goodenough et al., 2016).

Bununla birlikte, Avrupa Komisyonu tarafından son yıllarda hız kazanan NTE arama, kaynak geliştirme ve teknoloji odaklı çalışmalar dikkate alındığında, söz konusu sahaların ekonomik açıdan değerlendirilebilirlik düzeylerinin önümüzdeki süreçte daha sağlıklı biçimde ortaya konulacağı öngörülmektedir. Sonuç olarak, Avrupa kıtası ve yakın çevresinde yer alan önemli NTE cevherleşme alanlarına yönelik güncel gelişmelerin Türkiye tarafından yakından izlenmesi, ayrıca uluslararası NTE tedarik zincirlerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalarda ikili ve çok taraflı iş birliği olanaklarının değerlendirilmesi stratejik önem taşımaktadır.

## TÜRKİYE'DEKİ DURUM

Şekil 10'da ve Çizelge 4'te sunulduğu üzere, Türkiye sınırları içerisinde, ekonomik açıdan önemli düzeyde NTE içeren yataklar ile yüksek cevherleşme potansiyeline sahip alanlar bulunmaktadır. Bu sahalarla ilişkin mevcut jeolojik, jeokimyasal ve mineralojik bilgiler, aşağıda sistematik bir sıralama dâhilinde sunulmaktadır (Çimen, 2025).



**Şekil 10.** Türkiye’de NTE yatakları veya yüksek cevherleşme potansiyeline sahip alanlar (Y=Yatak, P=Potansiyel; Çimen, 2025). Tektonik zonlar Okay ve Tüysüz (1999)’dan değiştirilmiştir.

**Figure 10.** REE deposits and occurrences with high mineralization potential in Türkiye (Y = Deposit, P = Potential; Çimen, 2025). Tectonic zones modified from Okay and Tüysüz (1999).

**Çizelge 4.** Türkiye’de NTE yatakları ve potansiyel jeolojik hedef alanlar.

**Table 4.** REE deposits and prospective geological target areas in Türkiye.

Yatak/Potansiyel Alan Adı	Bölge	Kaynak Kayacı	Kaynak Türü	Tenör	Kaynak (Mt)
Kızılcaören	Eskişehir	Karbonatit	Birincil	%1,5-1.8	694
Karaçayır	Sivas	Karbonatit	Birincil	%0,15	6
Davulalan	Sivas	Karbonatit	Birincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Özvatan	Kayseri	Karbonatit	Birincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Kuluncak	Malatya	Alkalen-Kompleks	Birincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Divriği	Sivas	Alkalen-Kompleks	Birincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Kemiklitepe	Karaman	Boksit-ilişkili	İkincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Kızıldağ	Karaman	Boksit-ilişkili	İkincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Çanaklı	Burdur	Plaser-ilişkili	İkincil	%0,07	464
Avnik	Bingöl	Demir oksit-apatit	Birincil	Bilinmiyor	Bilinmiyor

### Kızılcaören/Beylikova (Eskişehir)

Eskişehir ili Beylikova ilçesinin güneydoğusunda yer alan Kızılcaören NTE sahası, Türkiye’de bugüne kadar tanımlanmış en büyük NTE

cevherleşme alanı olarak kabul edilmektedir. Saha, ilk kez 1959 yılında, toryum (Th) aramacılığı kapsamında gerçekleştirilen havadan gama-ışını spektrometresi çalışmaları sırasında belirlenmiştir

(Gültekin vd., 2003). Jeolojik konum itibarıyla Kızılcaören sahası, İzmir-Ankara-Erzincan Kenet Kuşağı'nın kuzeyinde ve Triyas yaşlı Karakaya Kompleksi içerisinde yer almaktadır. Sahada, Karakaya Kompleksi'ne ait düşük dereceli metamorfizma geçirmiş kumtaşı ve çamurtaşı gibi birimler, fonolit, trakit ve karbonatit türü alkalen kayaçlar tarafından kesilmektedir (Gültekin vd., 2003). NTE cevherleşmesi, bu alkalen magmatizma ile eşlenik olarak gelişmiş olup, karbonatitlerle ilişkili florit, barit ve bastnazit minerallerinin stokvörk tipi dağılımı ile temsil edilmektedir (Çimen vd., 2020). Söz konusu ana cevher minerallerine ek olarak, sahada rabdofan, parisit, piroklor, monazit, brokit, florensit gibi NTE taşıyan minerallerin yanı sıra psilomelan, piroluzit, götit, pirit, hematit, bronit ve rutil gibi çeşitli metalik ve oksit minerallerinin varlığı da rapor edilmiştir (Stumpfl ve Kırıkıoğlu, 1986; Gültekin vd., 2003; Nikiforov vd., 2014). Son dönemde, kuzey-batı Anadolu'da Çanakkale-Arıklı bölgesinde Ünlüer vd. (2024) tarafından karbonatit oluşumu rapor edilmiştir. Bu çalışmada kayda değer Th ve U içeriklerinin yanı sıra 194.7 ppm'e varan ANTE varlığı belirtilmiştir.

Fonolitler içerisindeki sanidin mineralleri ile karbonatitler bünyesindeki flogopit kristalleri üzerinde gerçekleştirilen radyometrik yaşlandırma çalışmalarına göre, alkalen magmatizmanın ve buna bağlı NTE cevherleşmesinin Miyosen (yaklaşık 24-25 My) döneminde meydana geldiği kabul edilmektedir (Sarıfakıoğlu vd., 2009; Nikiforov vd., 2014). Çimen vd. (2020) tarafından yürütülen jeokimya ve radyojenik/duraylı izotop çalışmalarına göre hidrotermal olarak metasomatize olmuş manto kaynaklı karbonatit varlığı doğrulanmıştır. Son olarak, Ersoy vd. (2025a) tarafından ise mineralizasyon bölgesi doğrultu atımlı bir fay sistemi içerisine yerleşmiş alkalen-silikat karbonatit kompleksi olarak isimlendirilmiş ve bölgedeki bu tarz sistemlerin önemli arama hedefleri olabileceği belirtilmiştir. Kızılcaören sahası başta karbonatit

magmatizması olmak üzere alkalen kayaçlar ile yaygın bir hidrotermal metasomatizma evresini bünyesinde ihtiva etmesi ile birlikte ABD'de bulunan Mountain Pass sahası ile benzerlik sunmaktadır. Literatürde yer alan ilk çalışmalarda, Kızılcaören sahasının tenör ve rezerv değerleri %2,78 ve 4,67 Mt (Ce + La + Nd + Y) olarak rapor edilmiştir (Kaplan, 1977; Öztürk vd., 2019). MTA tarafından gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında, söz konusu sahanın %3,14  $\Sigma$ NTO içeriğine sahip olduğu ve yaklaşık 30 Mt büyüklüğünde bir rezerve sahip olduğu belirtilmiştir (MTA, 1986). Bununla birlikte, Eti Maden İşletmeleri tarafından son yıllarda gerçekleştirilen detaylı sondaj çalışmaları sonucunda, söz konusu değerlerin %1,5-1,8 ortalama tenör ve yaklaşık 694 Mt kaynak (barit–florit–bastnazit) seviyesine ulaştığı ifade edilmektedir. Dahası, sahada cevher zenginleştirme ve saflaştırma çalışmalarının yürütüldüğü bilinmektedir (Kurşunoğlu vd., 2021; Yeşilören-Görmüş vd., 2021; Güneş vd., 2023). Sahada hâlihazırda aktif bir üretim faaliyeti bulunmamakla birlikte, Eti Maden İşletmeleri tarafından pilot tesis kurulmasına yönelik çalışmaların sürdürüldüğü bilinmektedir.

### **Karaçayır (Sivas)**

Karaçayır Plütunu, Sivas ili sınırları içerisinde, Karaçayır Köyü'nün (il merkezine yaklaşık 25 km) kuzeydoğusunda yer almakta olup, Akdağ Metamorfitleri içerisine sokulum yapmış yaklaşık 4 × 3,5 km boyutlarında bir magmatik kütle ile temsil edilmektedir (Boztuğ vd., 2009). Arazi ilişkileri, plütunun Paleosen–Eosen yaşlı Tokuş Formasyonu (konglomera, kumtaşı, kireçtaşı, marn ve silttaşı) tarafından uyumsuzlukla üzerlendiğini göstermektedir (İnan ve İnan, 1999). Litolojik açıdan Karaçayır Plütunu, ağırlıklı olarak siyenitik, ikincil olarak ise monzonitik kayaçlardan oluşmaktadır (Boztuğ vd., 2009; Cooper vd., 2011). Plütun bünyesinde karbonatitik kayaçların varlığı, ilk kez Schuiling (1961)

tarafından ileri sürülmüştür. Karaçayır Plütonu'na ilişkin radyometrik yaşlandırma çalışmalarında, siyenitik kayaçlar için Geç Kretase kristalizasyon yaşı (zirkon U–Pb: ~68 My; Cooper vd., 2011) ve en geç Kretase–Paleosen soğuma yaşları (biyotit Ar–Ar: 65–66 My; Boztuğ vd., 2009) elde edilmiştir. Schuiling (1961), siyenitin dokanak halinde bulunduğu Akdağ Metamorfittleri'ne ait bazı mermerleri sokulumu sırasında bünyesine alarak, bu birimlerin kalsit, biyotit, apatit ve nadiren toriyanit içeren karbonatitik oluşumlara dönüştüğünü öne sürmüştür. Bu yoruma göre, siyenitler içerisindeki karbonatlı kayaçlar değişime uğramış mermer anklavları olarak değerlendirilmiştir.

Buna karşılık, Cooper vd. (2011) tarafından siyenitler, karbonatitik oluşumlar ve mermerler üzerinde gerçekleştirilen kimyasal ve duraylı/radyojenik izotop çalışmalarında, karbonatitlerin siyenitik magmanın fraksiyonel kristallenmesi sonucu oluştuğu ileri sürülmüştür. Ancak söz konusu çalışmada karbonatitlerin arazide sınırlı mostra vermesi nedeniyle, değerlendirmeler tek bir lokasyondan alınan beş karbonatit örneği ile sınırlı kalmıştır. Son olarak, Çimen vd. (2022) tarafından karbonatitler üzerinde gerçekleştirilen ayrıntılı jeokimyasal, izotopik ve radyometrik yaşlandırma çalışmaları, karbonatit magmatizmasının siyenitik magmatizma ile zamansal olarak uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda, karbonatitlerin kristallenme yaşı  $69,3 \pm 1,7$  My olarak belirlenmiş; söz konusu karbonatit magmatizmasının, çarpışma sonrası tektonik bir ortamda, heterojen bir manto kaynağından türeyen düşük dereceli kısmi ergime süreçleri sonucunda geliştiği sonucuna varılmıştır.

Son yıllarda MTA tarafından plüton genelinde yürütülen çok sayıda sondaj çalışması sayesinde elde edilen karotlar, karbonatitik oluşumların plüton içerisinde daha geniş bir alanda yayılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar ayrıca, siyenit ve monzonit dışında farklı magmatik kayaç türlerinin varlığını da ortaya çıkarmıştır. Bunlara ek olarak gerek

yüzeyde açılan yarmalar gerekse sondaj verileri ile siyenitleri kesen lamprofir daykları ile birlikte, alkali feldispat siyenit, nefelin siyenit, nefelin monzosiyenit ve pegmatitik siyenit gibi siyenitin farklı fazları da tanımlanmıştır. MTA tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında, Karaçayır Plütonu'nun yer yer 10.000 ppm'e varan NTE zenginleşmeleri içerdiği belirtilmiş ve saha NTE arama programı kapsamına alınmıştır. Arazi gözlemleri ile elde edilen ön analitik veriler birlikte değerlendirildiğinde, Karaçayır Plütonu'nun özgün ve çok bileşenli magmatik kayaç toplulukları içerdiği ve tipik bir alkale kompleks karakteri sunduğu söylenebilir. Sahada hâlen aktif bir üretim faaliyeti bulunmamakla birlikte, MTA tarafından ~1420 ppm  $\Sigma$ NTO içerikli ~6 milyon ton rezerv belirlenmiştir (Ağrılı vd., 2023). Karaçayır sahası, Türkiye'de en tipik biçimde tanımlanabilen karbonatit oluşumlarını içermesi açısından önemli bir konuma sahiptir. Ancak sahada gözlenen NTE mineralizasyonu düşük tenörlü olup ekonomik açıdan sınırlı bir potansiyel sunmaktadır.

### **Davulalan (Sivas)**

Sivas ili Yıldızeli bölgesinde yer alan plütonik kayaçlar, kalk-alkalen ve alkalen karakterler sergilemektedir (Şaşmaz ve Yavuz, 2007). Bölgesel dağılım incelendiğinde, Kiremitli Köyü'nün kuzeydoğusunda bulunan kütlelerin granitik bileşimli ve kalk-alkalen özellikte olduğu, buna karşılık Davulalan Köyü'nün doğusunda yer alan plütonun siyenitik bileşimli ve alkalen karakterli olduğu belirlenmiştir (Alpaslan ve Boztuğ, 1997; Şaşmaz ve Yavuz, 2007).

Alkale özellik gösteren Davulalan Plütonu, büyük oranda siyenitik kayaçlardan oluşmakta olup, daha sınırlı ölçüde porfiritik monzonit damarları içermektedir. Bu kayaçlardan, siyenitik kayaçlar genellikle gri ve pembe tonlarda, porfiritik dokulu olup mineralojik olarak başlıca alkali feldispat, kuvars ve plajiyoklaz içermektedir. Bunlara ek olarak, daha az oranlarda nefelin, biyotit ve amfibol

mineralleri de gözlenmektedir (Şaşmaz ve Yavuz, 2007). Ayrıca Boztuğ (1998), siyenitler içerisinde nefelin gibi foid mineraller ile ejirin–ojit türü piroksenlerin varlığını tespit etmiştir. Davulalan Plütönu ile dokanak hâlinde bulunan mermerler arasında, granat, piroksen, skapolit, epidot ve florit minerallerinden oluşan skarn zonlarının geliştiği bilinmektedir (Şaşmaz ve Yavuz, 2007). Alpaslan ve Boztuğ (1997) tarafından gerçekleştirilen majör ve iz element jeokimyası çalışmalarına dayanarak, granitik kayaların Anatolid–Pontid çarpışması sırasında kalınlaşan kıtasal kabuğun anateksisi sonucu oluştuğu; buna karşılık siyenitik kayaların ise kabuk kalınlaşmasını izleyen genişlemeli bir tektonik evrede, üst manto kökenli magmaların kısmi ergimesi ile meydana geldiği öne sürülmüştür.

Plütön için Boztuğ vd. (2009) tarafından Ar–Ar yöntemi ile gerçekleştirilen yaşlandırma çalışmaları, yaklaşık 65 My değerinde bir yaş ortaya koymuştur. Ancak bu yaştan soğuma yaşını temsil ettiği ve kristalizasyon yaşının henüz kesin olarak belirlenemediği vurgulanmaktadır. Canbaz ve Gökçe (2022) tarafından gerçekleştirilen jeokimyasal çalışmaları neticesinde siyenitoidlerin kimyasal olarak okyanus adası bazaltlara benzediği, ileri derecede fraksiyonelleşmeye maruz kaldığı, yüksek oksijen fugasitesine sahip olduğu ve Cu, Mo, Pb, Zn, ve NTE mineralizasyonu açısından üretken olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak, Tavlı vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen ayrıntılı jeokimyasal, izotop ve jeokronoloji çalışmaları neticesinde karbonatit oluşumu tespit edilememiş ve Davulalan Plütönu'nun Geç Kretase-Erken Paleosen (65–66 My) döneminde çarpışma sonrası tektonik ortamda oluştuğu belirtilmiştir. Karacayır Plütönu'na benzer şekilde, Davulalan Plütönu da farklı seviyelerde NTE zenginleşmeleri içermekte olup, havadan jeofizik çalışmalar sonrasında MTA tarafından ruhsatlandırılarak NTE arama programı kapsamına alınmıştır. Sahada sondaj faaliyetleri devam etmekle birlikte, potansiyel hedef alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

## **Özvatan (Kayseri)**

Kayseri ili Özvatan ilçesinin güneyinde yer alan Hayriye Plütönu, MTA tarafından gerçekleştirilen sondaj çalışmaları sonucunda, başlıca nefelin siyenit, siyenit ve mikrogranit bileşimli magmatik kayalardan oluşan bir plütönik kütle olarak tanımlanmıştır (Yılmaz vd., 2024). Bu plütönik kütle, bölgedeki diğer alkalen magmatik kütlere benzer şekilde Akdağ Metamorfikleri'ni kesmekte ve Eosen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı birimler tarafından uyumsuzlukla örtülmektedir. Bölgede nefelin içeren plütönların varlığı ilk kez Kraeff ve Pasquare (1966) tarafından ortaya konulmuş olmakla birlikte, söz konusu çalışma yalnızca petrografik gözlemlere dayanmakla birlikte, kayaların kökenine ve tektono-magmatik evrimine ilişkin herhangi bir izotopik ya da jeokronolojik veri sunulmamıştır. Benzer şekilde, Özaksoy ve Gökten (1996) tarafından Özvatan-Felahiye yöresinin stratigrafi ve tektoniği kapsamında yürütülen çalışmada, bölgedeki alkalen magmatik kayaların foid siyenit bileşiminde olduğu ve Akdağ Metamorfikleri'ni sokulum yoluyla kestiği ifade edilmiştir.

Solmaz (1983) tarafından hazırlanan doktora tezi kapsamında ise, dönemin analitik olanakları doğrultusunda sınırlı sayıda örnek üzerinde XRF analizleri gerçekleştirilmiş; ancak çalışma ayrıntılı tüm kayaç jeokimyası (özellikle iz element ve NTE), duraylı ve radyojenik izotop sistematiği, mineral kimyası ve radyometrik yaşlandırma verilerini içermemektedir. Bu çalışmada elde edilen sınırlı veriler ışığında, siyenitik kayaçları oluşturan magmanın kireçtaşı ile asimilasyon sürecine uğradığı ileri sürülmüştür. Daha kapsamlı bir yaklaşım sunan Kadioğlu vd. (2006), Orta Anadolu Kristalen Kompleksi genelinde yayılım gösteren granit, monzonit ve siyenit bileşimli kayaçların kökeni ve magmatik evrimini incelemiştir. Söz konusu çalışmada Hayriye Plütönu'na ait üç örnek için jeokimyasal veri sunulmuş olmakla birlikte Orta Anadolu Kristalen Kompleksi'ndeki granit ve monzonitlerin yitimle ilişkili metasomatize

bir manto kaynağından türediği, siyenitlerin ise belirgin derecede kabuksal kirlenme eşliğinde zenginleşmiş bir manto kaynağından köken aldığı sonucuna varılmıştır.

Uras vd. (2020) tarafından yürütülen çalışmada, Hayriye Plütunu içerisindeki floritlerin kökeni incelenmiş ve plütona ait  $\Sigma$ NTE içeriklerinin oldukça düşük olduğu (26–44 ppm aralığında) ortaya konulmuştur. Deniz (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, Özvatan Plütunu (diğer adıyla Hayriye Plütunu) bünyesindeki foïd siyenitler ile metamorfik temel içerisindeki iri boyutlu mika taneleri üzerinde Raman spektroskopisi, XRD, XRF ve EPMA analizleri yapılmış; söz konusu mikaların alkalen bir magmatizmadan türediği, bileşimlerinin ise kabuksal ve mantosal kökenli magmalar arasındaki karışım (magma mixing) süreçleri ile modifiye edildiği ve kirlendiği sonucuna varılmıştır. Ünlüer vd. (2023) tarafından ise siyenitler içerisinde bulunan karbonatit oluşumları üzerinde jeokimya ve duraylı izotop (O ve C) çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışma sonucunda, Özvatan nefelin siyenit–karbonatit kompleksinde HNTE bakımından zengin karbonatitlerin metasomatize zenginleşmiş bir manto kaynağından türediğini, çevresinde gelişen ilerleyici fenitleşme (özellikle K-fenitler) ve yüksek tuzluluklu karbonatitik akışkanların zamanla ikincil süreçlerle evrimleştiğini öne sürülmüştür. Son olarak Yılmaz vd. (2024) tarafından yapılan detaylı jeokimya, izotop ve yaşlandırma çalışmaları neticesinde Hayriye Plütunu'nun, Orta Anadolu Kristalen Kompleksi'nin güneydoğu kenarında, Geç Kretase–Erken Paleosen'de (64-66 My) post-çarpışma tektonik ortamında gelişmiş, alkalen karakterli siyenit–nefelin siyenit ve manto kökenli, NTE ve Sr bakımından zengin karbonat damarları içeren, önemli bir NTE cevherleşmesini temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Hayriye Plütunu, daha önce tanımlanan Karaçayır ve Davulalan plütonları ile benzer biçimde, farklı seviyelerde NTE zenginleşmeleri

içermektedir ( $\Sigma$ 8503 ppm). Bu özellikleri nedeniyle sahada halihazırda MTA tarafından NTE arama programı yürütülmektedir. Sahada yapılan arazi gözlemleri ve sondaj verileri, lamprofir daykları ile birlikte karbonatit (?) olarak yorumlanan, özgün alkalen kayaç türlerinin varlığına işaret etmektedir. MTA tarafından gerçekleştirilen analitik çalışmalarda, siyenit bünyesindeki karbonatlı oluşumların yaklaşık 1662 ppm  $\Sigma$ NTE içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir.

### **Kuluncak (Malatya)**

Türkiye'nin ikinci büyük NTE mineralizasyonu olarak değerlendirilen bu cevherleşme alanı, Malatya ili Kuluncak ilçesi Başören Köyü civarında yer almaktadır. Uzun yıllar boyunca cevherleşmenin karbonatitlerle ilişkili olduğu varsayılmış olmasına karşın (Özgenç ve İlbeyli, 2009), günümüze kadar yüzeyde mostra veren herhangi bir karbonatit oluşumu tanımlanamamıştır. Buna karşılık, son dönemde gerçekleştirilen jeokimyasal ve izotopik çalışmalar, NTE cevherleşmesinin Geç Kretase–Erken Paleosen yaşlı, çarpışma sonrası tektonik bir ortamda gelişen alkalen kompleks–hidrotermal bir sistemle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Çimen vd., 2020). Cevherleşme alanında, Geç Kretase–Erken Paleosen yaşlı Karapınar Kireçtaşı ile Kızılkaya ofiyolitik kayaçları temel birimleri temsil etmekte olup, bu birimler alkalen karakterli Başören plütomatik kayaçları (siyenit, kuvars siyenit ve monzonit) tarafından kesilmektedir. F-NTE-Th içerikli cevherleşmeler, büyük ölçüde bu plütomatik kayaçlar ile kireçtaşları arasındaki skarn zonlarında yoğunlaşmıştır.

Başören siyenitlerinden elde edilen radyometrik yaşlandırma sonuçları, alkalen magmatizmanın Erken Paleosen (~65 My) döneminde gerçekleştiğine işaret etmektedir (Leo vd., 1974). Dahası, son zamanda Başören siyeniti üzerinde Ersoy vd. (2025b) tarafından yürütülen detaylı petrolojik çalışmalar neticesinde

bahsi geçen siyenitlerin yay ardı havza ortamında oluşmuş silisçe doygun olmayan K-alkalen bazaltik magmaların aşırı fraksiyonlaşmasıyla geliştiği ve Türkiye'de ilk kez tanımlanan agpaitik karakterli, rinkit-(Ce) ve yer yer lujavrit benzeri piroklor içeren kayaları temsil ettiği öne sürülmüştür. Mineralojik incelemeler ile, sahadaki başlıca NTE taşıyıcı minerallerin britolit ve bastnazit olduğunu ortaya koyulmuştur (Özgenç ve İlbeyli, 2009; Öztürk vd., 2019). Pulat vd. (2022) tarafından yürütülen jeokimyasal çalışmalar ile Malatya-Kuluncak yöresinde Üst Kretase-Alt Paleosen yaşlı alkalen siyenitoyid sokulumlarıyla ilişkili Büyük Kuluncak NTE-Nb-U yatağında, NTE'lerin esas olarak hidrotermal akışkanlara bağlı alterasyon (özellikle argillizasyon) ve kontakt metasomatizma süreçleriyle ana kayalara göre iki-üç kat zenginleştiğini ve yatağın Türkiye'nin ilk ekonomik alkalen kökenli nadir metal (Nb-Zr-Rb) cevherleşmesini temsil ettiği ifade edilmiştir. Pulat vd. (2025) tarafından Kuluncak (Malatya) Nb-U-NTE-Zr-Li mineralizasyonunun karbonatit ilişkili metasomatizma ve özellikle fenitleşme süreçleriyle kontrol edildiğini, HNTE zenginleşmesinin hem jeokimyasal hem jeofizik verilerle desteklendiğini ve sistemin Bayan Obo (Çin) ile Ilımaussağ (Grönland) benzeri dünya ölçeğinde karbonatit-dominant bir potansiyel taşıdığını öne sürmüştür. Buna karşın, Çimen vd. (2020) çalışmasında mineralizasyonun doğrudan karbonatit magmatizmasıyla değil, daha çok alkalen kompleksle ilişkili hidrotermal bir sistemle bağlantılı olabileceğini ileri sürülmüştür. Cevherleşme alanında karbonatit magmatizmasının varlığı henüz ayrıntılı petrolojik ve jeokimyasal verilerle kesin biçimde ortaya konulmamış olup, bu ilişkinin netleştirilebilmesi için kapsamlı mineralojik, petrolojik ve izotopik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Sahada hâlihazırda aktif bir üretim faaliyeti bulunmamakla birlikte, tenör ve rezerv belirlemeye yönelik çalışmalar MTA tarafından yürütülmüştür. 2019 yılı MTA Faaliyet Raporu'nda, NTE'lere

ek olarak çinko (Zn), nikel (Ni), arsenik (As), rubidyum (Rb), tantal (Ta), berilyum (Be), lityum (Li) ve galyum (Ga) gibi elementlerin de sahada varlık gösterdiği ifade edilmiştir.

### **Divriği (Sivas)**

Sivas ili Divriği ilçesinde yer alan söz konusu cevherleşme, Efendi Deresi içerisinde, yaklaşık 1600 m kotlarında, Paleosen-Eosen yaşlı alkali granitler bünyesinde gelişmiştir (Boztuğ vd., 2007; Öztürk vd., 2019). Cevherleşme zonunun yüzeyde yaklaşık 300 m süreklilik gösterdiği ve 0,6-1,0 m arasında değişen kalınlıklara sahip olduğu belirtilmiştir (Öztürk vd., 2019). Sahada MTA tarafından 1958 yılında, uranyum aramaları kapsamında gerçekleştirilen sondaj ve galeri çalışmaları sonucunda yaklaşık 36 bin ton Cu-F cevheri tanımlanmıştır (Öztürk vd., 2019). Cevher damarının merkez kesimleri yeşil renkli florit ile karakterize edilirken, kenar zonlarda kalkopirit, galenit ve sfalerit minerallerinin baskın olduğu gözlenmektedir. Bunlara ek olarak, cevherleşme alanında arsenopirit, pirit, bizmutinit, kovellin, kalkosin, ayrıca kalsit, kuvars, kil mineralleri (muhtemelen kaolinit) ve piritin alterasyonu sonucu gelişmiş limonit mineralleri de tanımlanmıştır (Öztürk vd., 2019). Cevherleşmeye ait 6 örneğin analitik sonuçları, ortalama  $\Sigma$ NTE içeriğinin 1363 ppm olduğunu ortaya koymakta olup, HNTE'lerin baskın olduğu tipik bir NTE dağılım deseni sergilenmektedir. Ayrıca, cevherin ortalama 698,5 ppm Y içeriğine sahip olması dikkat çekici bir özellik olarak öne çıkmaktadır (Öztürk vd., 2019). Sahada günümüzde aktif bir üretim faaliyeti bulunmamakla birlikte, daha ayrıntılı ve sistematik NTE arama ve değerlendirme çalışmalarına ilişkin güncel bilgilere henüz ulaşılammıştır. Yine Keban ve Kırşehir dolaylarında da siyenitik kayalarla ilişkili florit cevherleşmeleri ile birlikte bazı NTE değerleri elde edilmiş olup yukarıda sayılan diğer cevherleşmelerle ilişkili benzer oluşumlar olabilecekleri değerlendirilmektedir (Yıldırım vd., 2021; Özmen ve Koç, 2006).

### **Kemiklitepe (Karaman)**

Karaman ili Bolkardağı Bölgesi'nde yer alan laterit-tip Kemiklitepe Boksit yatağı, ikincil NTE cevherleşmesi açısından potansiyel arz eden ve ayrıntılı inceleme gerektiren önemli bir sahayı temsil etmektedir. Boksit cevherleşmesi yaklaşık 5–10 m kalınlığa sahip olup, kuzeye doğru yaklaşık 100 m, güneye doğru ise yaklaşık 200 m süreklilik göstermektedir. Sahanın kuzey kesiminde, taban kayaları Üst Triyas yaşlı fillitler ve metaşeyller tarafından temsil edilmekte olup; bu birimler yukarı doğru dereceli olarak saprolitlere ve ardından boksit seviyelerine geçmektedir. Güney kesiminde ise taban kayaları Üst Triyas yaşlı rekristalize kireçtaşları, tavan kayaları ise Orta Jura yaşlı rekristalize kireçtaşları ile temsil edilmektedir (Hanilçi, 2013). Boksit cevherinin mineral parajenezi başlıca diaspor ve hematit minerallerinden oluşmaktadır ve daha az oranlarda ise anataz, klorit, götit ve mika mineralleri eşlik etmektedir. Analitik veriler, boksit cevherinin  $\Sigma$ NTE içeriğinin yaklaşık 1693 ppm düzeyinde olduğunu göstermekte olup, bu değer ikincil lateritik sistemler açısından dikkate değer bir zenginleşmeye işaret etmektedir (Hanilçi, 2013). Bu bağlamda, Kemiklitepe Boksit yatağında NTE'lerin hangi mineral fazları içerisinde bulunduğu ortaya konulması amacıyla ayrıntılı mineralojik ve jeokimyasal çalışmaların gerçekleştirilmesi; ayrıca saha genelinde detaylı NTE prospeksiyonunun yürütülmesi gerekmektedir.

### **Kızıldağ (Karaman)**

Karaman ili Bolkardağı Bölgesi'nde yer alan Kızıldağ Boksit cevherleşmesi, protolit kayaç olarak tanımlanan sleyt seviyesinin, Kemiklitepe boksit yatağında olduğu gibi, yüksek NTE potansiyeline sahip olduğunu göstermesi açısından dikkat çekicidir. Boksit cevher zonu yaklaşık 400 m uzunluğa ve 30 m kalınlığa sahip olduğu rapor edilmiştir (Hanilçi, 2013). Cevherleşmenin

taban kayacı, Permiyen yaşlı rekristalize kireçtaşları ile temsil edilirken, tavan kayacı ise Alt Triyas yaşlı rekristalize kireçtaşlarıdır (Hanilçi, 2013). Kırmızımsı-kahverengi renkli boksit cevheri mineralojik olarak büyük oranda diasporit ve hematit, daha düşük oranlarda ise böhmit ve kaolinit minerallerinden oluşmaktadır (Hanilçi, 2013). Analitik sonuçlar, boksit cevherleşmesinin nispeten daha düşük  $\Sigma$ NTE içeriğine (~668 ppm) sahip olduğunu, buna karşılık protoliti temsil eden sleyt seviyesinin belirgin biçimde yüksek  $\Sigma$ NTE içeriği (~1.548 ppm) sergilediğini ortaya koymaktadır (Hanilçi, 2013). Bu durum, NTE'lerin lateritleşme süreci sırasında kısmen yeniden dağıldığını ve önemli bir bölümünün protolit seviyelerde tutulmuş olabileceğini düşündürmektedir. Bu çerçevede, Bolkardağı Bölgesi'nde gerek boksit cevherleşmeleri gerekse protoliti oluşturan birimler üzerinde, NTE'lerin mineralojik bağlanma biçimlerini ve mekânsal dağılımını ortaya koymaya yönelik daha ayrıntılı jeokimyasal ve mineralojik prospeksiyon çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir.

### **Çanaklı (Burdur)**

Burdur ili Çanaklı Bölgesi'nde yer alan plaser tipi NTE sahasının kaynak alanının, Isparta-Gölcük Bölgesi'nde gelişen Kuvaterner yaşlı alkaleen magmatizma ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Cox vd., 2013). Deady vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen mineralojik incelemelerde, sahada başlıca manyetit ile birlikte çevkinit, perierit, apatit, allanit ve britolit gibi NTE taşıyan minerallerin yaygın olarak bulunduğu rapor edilmiştir. Söz konusu cevherleşme alanının,  $\sim\Sigma$ NTE %0,07 gibi nispeten düşük bir tenöre, buna karşılık yaklaşık 464 Mt düzeyinde yüksek bir rezerv/kaynak potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir (Cox vd., 2013). Küresel ölçekte benzer plaser tipi NTE oluşumlarıyla karşılaştırıldığında, tenör değerlerinin düşük olduğu görülmekle birlikte, manyetit varlığı ve buna bağlı olarak eş-ürün

potansiyeli dikkate alındığında, sahanın daha ayrıntılı ve hedefli prospeksiyon çalışmaları ile yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu potansiyel cevherleşme alanı, MTA tarafından ruhsatlandırılmış olup, ileri aşama arama ve değerlendirme çalışmaları için uygun hedef sahalar arasında yer almaktadır.

### **Avnik (Bingöl)**

Bingöl ili Genç ilçesi sınırları içerisinde yer alan Avnik apatitli–manyetit sahası, Güneydoğu Anadolu'da Bitlis Masifi bünyesinde konumlanmaktadır. Yatak, ortaçtan felsiğe değişen bileşimlere sahip, kalk-alkalen karakterli metavolkanik kayaçlarla ilişkili olup; manyetit, apatit ve aktinolit minerallerinden oluşan masif, bantlı ve saçılmış–ağsı tipte cevherleşmeler ile temsil edilmektedir (Helvacı, 1984). Bölgede tanımlanan cevher rezervlerinin, %14–18 Fe içerik aralığında ve yaklaşık 104 Mt düzeyinde olduğu rapor edilmiştir. Cevher mineralojisi büyük ölçüde manyetit, apatit ve aktinolit tarafından kontrol edilmekle birlikte, aksesuar seviyede önemli bir NTE taşıyıcısı olan allanit minerali tanımlanmıştır (Helvacı, 1984). Sahaya ilişkin mevcut çalışmaların büyük ölçüde eski tarihli olması nedeniyle, Avnik sahasının NTE potansiyelinin güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için güncel, ayrıntılı jeokimyasal, mineralojik ve prospeksiyon çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir.

### **SONUÇLAR ve ÖNERİLER**

Nadir toprak elementleri, sahip oldukları özgün fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle başta NdFeB ve SmCo tipi kalıcı mıknatısların üretimi olmak üzere seramik, katalizör, fosforlar, lazer, optik ve sensör sistemleri gibi ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan en kritik hammaddeler arasında yer almaktadır. Madencilik ve zenginleştirme süreçlerinin teknik açıdan zor

ve maliyetli olması; buna karşın Çin'de ucuz iş gücü, düşük girdi maliyetleri ve görece zayıf çevresel regülasyonların bulunması nedeniyle, özellikle 2000'li yılların başından itibaren küresel NTE üretimi büyük ölçüde Çin'in kontrolü altına girmiştir. Günümüzde Çin dışında önemli üretici ülkeler arasında Avustralya ve ABD öne çıkmaktadır. Tüm bu hususlar beraberinde ciddi bir tedarik riski problemini ortaya çıkarmaktadır.

NTE mineralizasyonları genel olarak birincil jeolojik kaynaklar (karbonatitler, alkalin magmatik sistemler, DOBA tipi oluşumlar) ve ikincil jeolojik kaynaklar (iyon-adsorpsiyon killeri, plaserler ve lateritik oluşumlar) olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir. Birincil jeolojik kaynaklar, karmaşık mineralojiye ve zorlu proses gereksinimlerine sahip olmaları nedeniyle ikincil kaynaklara kıyasla daha yüksek üretim maliyetleri sunmaktadır. Hafif NTE'ler büyük ölçüde birincil kaynaklardan (örneğin Bayan Obo -Çin, Mountain Pass - ABD) elde edilirken, ağır NTE'ler ise ağırlıklı olarak iyon-adsorpsiyon kil yatakları gibi ikincil kaynaklardan (özellikle Jiangxi -Çin) temin edilmektedir. Ağır NTE'lerin lazer ve sensör sistemleri başta olmak üzere savunma sanayi uygulamalarında kritik rol oynaması ve dünya genelinde sınırlı dağılıma sahip olmaları, bu elementleri stratejik açıdan son derece önemli kılmaktadır. Bu durum, özellikle ağır NTE'ler açısından jeolojik çeşitliliğin ve yeni keşiflerin küresel arz güvenliği için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Mevcut literatür verilerine göre küresel ölçekte bilinen NTE rezervlerinin yaklaşık 90-120 Mt, potansiyel NTE kaynaklarının ise yaklaşık 478 Mt düzeyinde olduğu kabul edilmektedir. Bu durum, bilinen rezervlerin yaklaşık dört katı büyüklüğünde bir kaynak potansiyelinin mevcut olduğunu göstermektedir. Hem rezerv hem de kaynak bazında Çin lider ülke konumunda olup, bu kaynakların büyük bölümü birincil jeolojik kaynaklar ve hafif NTE ağırlıklı sistemler ile temsil edilmektedir. Buna karşın, ağır NTE odaklı

projelerin geliştirilme oranı küresel ölçekte oldukça sınırlıdır. Avrupa genelinde yüksek potansiyele sahip NTE alanları değerlendirildiğinde, Grönland, İsveç, Finlandiya, Almanya, Norveç ve Türkiye öne çıkan bölgeler arasında yer almaktadır. Son yıllarda bu ülkelerde, NTE yataklarının jeolojik ve mineralojik karakterizasyonu, cevherden konsantre üretimi ve uç ürünlerin geliştirilmesine yönelik çok sayıda Ar-Ge ve pilot ölçekli projeler yürütülmektedir. Avrupa ve Türkiye’de yürütülen yeni arama ve geliştirme çalışmaları, küresel NTE arzının çeşitlendirilmesi açısından stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye’de günümüze kadar yatak ölçeğinde değerlendirilebilecek iki ana NTE sahası tanımlanmıştır. Bunlardan Eskişehir-Kızılcaören (Beylikova) sahası, en yüksek tenör ve kaynak potansiyeline sahip alanı temsil ederken, Malatya-Kuluncak sahası diğer önemli NTE yataklanmasını oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak Türkiye genelinde karbonatitler, alkalin kompleksler, boksitler, plaser oluşumlar ve demir oksit-apatit tipi mineralizasyonlar da bilinmektedir. Tanımlanan bu cevherleşme alanlarının büyük bölümü hafif NTE’lerce zengin karakter sergilemekte olup, özellikle NdFeB mıknatıs üretiminde kritik öneme sahip Nd ve Pr elementlerinin kazanımı açısından stratejik bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle Eskişehir-Kızılcaören sahasında Etimaden tarafından son yıllarda yürütülen çalışmalarla 694 Mt kaynak ve %1,5-1,8 tenör değerlerine ulaşıldığı açıklanmıştır. Etimaden tarafından kurulan pilot tesis ile cevher zenginleştirme-saflaştırma protokollerinin de sistematik kazanması ile birlikte Türkiye’nin gelecekte bu alandaki önemli oyuncularından biri olması kaçınılmazdır. Bu durum, Türkiye’nin NTE alanında yalnızca kaynak ülkesi değil, aynı zamanda teknolojik üretim zincirinde yer alabilecek bir aktör olma potansiyeline işaret etmektedir.

Jeolojik açıdan Eskişehir-Kızılcaören sahası, Batı Anadolu’da Oligo-Miyosen sonrası

gelişen açılmalı tektonik rejim ile ilişkili alkalin magmatizma sonucu oluşmuştur. Buna karşılık Malatya-Kuluncak sahası, Orta Anadolu Kristalen Kompleksi içerisinde gelişen Geç Kretase-Erken Paleosen yaşlı post-çarpışma tektonik rejim ile ilişkili alkalin magmatizma ile karakterizedir. Türkiye genelinde gerek Batı Anadolu’da gerekse Orta Anadolu Kristalen Kompleksi bünyesinde benzer alkalin karakterli magmatik sistemlerin yaygınlığı bilinmekte olup, bu alanlar NTE aramacılığı açısından öncelikli hedef bölgeler olarak değerlendirilmektedir. Alkalin magmatizmaya ek olarak, boksit ve plaser oluşumları da özellikle ikincil jeolojik kaynakların belirlenmesi ve değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu jeolojik çerçeve, Türkiye’de NTE aramacılığının jeodinamik temelli bir yaklaşımla yürütülmesi hem birincil hem de ikincil kaynakların etkin biçimde ortaya konulması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma, NTE’leri jeolojik oluşum ortamları, rezerv-kaynak verileri ve dünya ile Türkiye’den somut örnekler çerçevesinde bütüncül bir yaklaşımla ele almıştır. Bu kapsamda, literatürde dağınık halde bulunan bilgileri bir araya getirerek jeolojik süreçler ile kaynak potansiyeli arasındaki ilişkiyi ortaya koymuş ve Türkiye’deki potansiyel alanları küresel bağlam içinde değerlendirmiştir.

### **EXTENDED SUMMARY**

*Rare earth elements (REEs) are critical raw materials for a wide range of strategic applications, including permanent magnets (NdFeB and SmCo), defense technologies, renewable energy systems, electronics, lasers, optical devices, and sensor technologies. Despite rapidly increasing global demand, the REE supply chain has been largely dominated by China since the early 2000s. This dominance is primarily attributed to the technical complexity and high costs of REE mining and processing, combined with low labor and input*

*costs and comparatively weak environmental regulations in China. Outside China, Australia and the United States currently represent the only significant alternative primary producers.*

*Geologically, REE mineralization occurs in both primary geological sources, such as carbonatites, alkaline magmatic systems, and IOCG-type deposits, and secondary geological sources, including ion-adsorption clays, placers, and lateritic formations. Primary geological sources are generally enriched in light REEs and are characterized by complex mineralogy and high processing costs, whereas heavy REEs are predominantly mined from secondary geological resources. Here, the strategic importance of heavy REEs is further amplified by their critical role in advanced defense, laser, and sensor technologies, combined with their limited global distribution.*

*Globally, known REE reserves are estimated to be approximately 90-120 Mt, while potential REE resources may reach nearly 480 Mt, indicating that existing reserves represent only about one quarter of the total known resource potential. China maintains a leading position for both reserves and resources, with most of its REE endowment hosted by primary geological systems. In contrast, the development of heavy REE-focused projects remains relatively low on a global scale. In Europe, Greenland, Sweden, Finland, Norway, Germany, and Türkiye stand out as regions with significant REE potential. In recent years, extensive research and development efforts have been undertaken in these regions, focusing on geological and mineralogical characterization, beneficiation strategies, and the production of high-value downstream products.*

*In Türkiye, two major REE deposits have been defined at the deposit scale to date: the Eskişehir-Kızılcaören (Beylikova) and Malatya-Kuluncak districts. The Eskişehir-Kızılcaören deposit represents the largest REE resource in terms of grade and tonnage in Türkiye, whereas*

*the Malatya-Kuluncak deposit is notable for its association with Nb-REE-U-Zr-Li mineralization. In addition to these deposits, various carbonatite bodies, alkaline complexes, bauxite horizons, placer deposits, and iron oxide-apatite-type mineralizations have been identified across Türkiye. Most of these systems are enriched in LREEs, particularly Nd and Pr (apart from La and Ce), which are essential components for NdFeB permanent magnet production. Of note, recent exploration and evaluation studies conducted by Eti Maden in the Eskişehir-Kızılcaören area reported a resource of approximately 694 Mt with total REE grades ranging between 1.5 and 1.8%.*


*Geodynamically, the Eskişehir-Kızılcaören deposit is genetically related to alkaline magmatism associated with post-Oligo-Miocene extensional tectonics in western Anatolia. In contrast, the Malatya-Kuluncak deposit formed within the Central Anatolian Crystalline Complex during the Late Cretaceous-Early Paleocene post-collisional tectonic regime. The widespread occurrence of similar alkaline magmatic systems throughout both Western and Central Anatolia highlights Türkiye as a highly prospective region for future REE exploration. In addition to alkaline magmatism, bauxite and placer formations represent important targets for identifying and evaluating secondary REE resources.*

*In conclusion, Türkiye's geological diversity and widespread distribution of alkaline magmatic systems provide a strong foundation for the country to play a strategic role in the European and global REE supply chains. Comprehensive geological, mineralogical, and geochemical investigations of both existing and potential REE deposits are essential to reduce external dependency on critical raw materials and to support the development of high-value downstream REE-based technologies.*

**KATKI BELİRTME**

Yazarlar, çalışmaya yapıcı ve değerli katkılar sunan Dr. M. Selman Aydoğan'a ve anonim hakeme içten teşekkürlerini sunar. Ayrıca makalenin değerlendirme ve editoryal süreçlerinin titizlikle yürütülmesindeki katkıları dolayısıyla Baş Editör Dr. Erdiñ Yiğitbaş'a ve Editör Dr. İsmail Onur Tunç'a teşekkür ederler.

**ORCID**

Okay Çimen  <https://orcid.org/0000-0002-1727-9939>

Cahit Dönmez  <https://orcid.org/0000-0003-4705-9301>

**KAYNAKLAR / REFERENCES**

- Ağrınlı, H., Çubuk, Y., Kırbaş, H. & Yılmaz, M. (2023). *Sivas-Karaçayır Ar:201400220 (Er:3315254) Numaralı Iv. Grup Ruhsat Sahasına Ait Maden Jeolojisi ve Kaynak Tahmin Raporu* (Rapor No: 14641), Maden Tetkik ve arama Genel Müdürlüğü. (In Turkish)
- Alpaslan, M. & Boztuğ, D. (1997). The co-existence of the syncolg and post-colg plutons in the Yıldızeli Area (W-Sivas). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 6, 1-12.
- Barakos, G., Mischo, H. & Gutzmer, J. (2015). Status Quo and Future Evaluations of Global Rare Earth Mining (with Respect to Special Rare Earth Element-industry Criteria). *Third International Future Mining Conference / Sydney, NSW*, pp. 4-6.
- Boztuğ, D., Türksever, E., Heizler, M., Jonckheere, R. C. & Tichomirowa, M. (2009). <sup>207</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb, <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar and apatite fission-track geothermochronology revealing the emplacement, cooling and exhumation history of the Karacayır Syenite (N Sivas), East Central Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 18, 109-125. <https://doi.org/10.3906/yer-0806-4>
- Boztuğ, D., Harlavan, Y., Arehart, G.B., Satır, M. & Avcı, N. (2007). K-Ar age, whole-rock and isotope geochemistry of A-type granitoids in the Divriği-Sivas region, easterncentral Anatolia, Turkey. *Lithos*, 97(1-2), 193-218. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.014>
- Boztuğ, D. (1998). Post-collisional central Anatolian alkaline plutonism, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 7(3), 145-165.
- Canbaz, O. & Gökce, A. (2022). Davulalan A-type granitoid-associated Cu, Mo, Pb, Zn, and REEs mineralization, Central Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 196, Article 104665. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104665>
- Castor, S.B. (2008). The Mountain Pass Rare-Earth Carbonatite And Associated Ultrapotassic Rocks, California. *The Canadian Mineralogist*, 46(4), 779-806. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.779>
- Chandler, R., Bhat, G., Mavrogenes, J., Knell, B., David, R. & Leggo, T. (2024). The primary geology of the Paleoproterozoic Mt Weld Carbonatite Complex, Western Australia. *Journal of Petrology*, 65(2), Article egae007. <https://doi.org/10.1093/petrology/egae007>
- Chen, C., Wang, C. H., Wang, D. H., Qin, J. H., Lu, L., Dang, X. L., Fan, X. Y., Chen, X. R. & Zhang, W. (2020). U-Pb dating and Hf isotope characteristics of zircons from ore-forming parent rocks in the Qingyuan ion-adsorbed REE deposit, Zhejiang Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 40, 58-72.
- Cocker, M. D. (2012). *Lateritic, supergene rare earth element (REE) deposits*. In book: *48th Forum on the Geology of Industrial Minerals* (pp.1-18) Chapter: 4. Arizona Geological Survey Special Paper 9.
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Wade, B. P., Gilbert, S. E. & Alford, R. (2023). Mineralogy and Distribution of REE in Oxidised Ores of the Mount Weld Laterite Deposit, Western Australia. *Minerals*, 13(5), Article 656. <https://doi.org/10.3390/min13050656>
- Cooper, A. F., Boztuğ, D., Palin, J. M., Martin, C. E. & Numata, M. (2011). Petrology and petrogenesis of carbonatitic rocks in syenites from central Anatolia, Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161, 811-828. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0566-3>
- Cox, J. J. & Fayram, T. (2013). *NI 43-101 Technical Report on the Aksu Diamas Rare Earth Element Project, Isparta district, Turkey*. AMK Mineral Inc. Toronto, Canada, 29 p.

- Çimen, O. (2025). Nadir Toprak Elementleri ekosistemi ve doğru sanılan yanlışlar. *Bilim ve Gelecek Dergisi*, 258. <https://bilimvegelecek.com.tr/index.php/2025/10/01/nadir-toprak-elementleri-ekosistemi-ve-dogru-sanilan-yanlislar>
- Çimen, O., Ağrılı, H., Kuebler, C., Simonetti, A., Corcoran, L., Simonetti, S., Çolak, T., İnal, S. & Dönmez, C. (2022). Geochemical, isotopic and U-Pb geochronological investigation of the Late Cretaceous Karaçayır carbonatite (Sivas, Turkey): Insights into mantle sources within a post-collisional tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 141, Article 104650. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104650>
- Çimen, O., Corcoran, L., Kuebler, C., Simonetti, S. S. & Simonetti, A. (2020). Geochemical, stable (O, C, and B) and radiogenic (Sr, Nd, Pb) isotopic data from the Eskişehir-Kızılcaören (NW Anatolia) and the Malatya-Kuluncak (E-central Anatolia) F-REE-Th deposits, Turkey: implications for nature of carbonate-hosted mineralization. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29(5), 798-814. <https://doi.org/10.3906/yer-2001-7>
- Deady, E., Lacinska, A., Goodenough, K. L., Shaw, R. & Roberts, N. M. W. (2019). Volcanic Derived Placers as a Potential Resource of Rare Earth Elements: The Aksu Diamas Case Study, Turkey. *Minerals*, 9(4), Article 208. <https://doi.org/10.3390/min9040208>
- Deniz, K. (2022). Mica Types as Indication of Magma Nature, Central Anatolia, Turkey. *Acta Geologica Sinica*, 96(3), 844-857. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14670>
- Ersoy, E. Y., Yavuz, H., Uysal, İ., Palmer, M. R. & Müller, D. (2025a). The Petrology of Tuffisite in a Trachytic Diatreme from the Kızılcaören Alkaline Silicate-Carbonatite Complex, NW Anatolia. *Minerals*, 15(8), Article 867. <https://doi.org/10.3390/min15080867>
- Ersoy, E. Y., Chakrabarty, A., Müller, D., Uysal, İ., Candan, O., Köksal, S. & Yıldırım, A. (2025b). Mineralogy and petrology of the late cretaceous rinkite-bearing Başören nepheline-sodalite-syenite, Central Türkiye. *Lithos*, 508-509, Article 108103. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108103>
- EuRare Brochure. (2018). [https://www.eurare.org/docs/EURAREbrochure\\_vfinal.pdf](https://www.eurare.org/docs/EURAREbrochure_vfinal.pdf)
- European Commission, (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials*. [https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM\\_2020\\_Report\\_Final.pdf](https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf)
- Fan, H. R., Yang, K. F., Hu, F. F., Liu, S. & Wang, K. Y. (2016). The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.005>
- Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, É. A., Sadeghi, M., Schiellerup, H., Müller, A., Bertrand, G., Arvanitidis, N., Eliopoulos, D. G., Shaw, R. A., Thrane, K. & Keulen, N. (2016). Europe's rare earth resource potential: an overview of metallogenic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72(Part 1), 838–856. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.019>
- Goodenough, K., Wall, F. & Merriman, D. (2018). The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. *Natural Resources Research*, 27, 201-216. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>
- Guo, W., Zhao, Z., Wang, C., Chen, X., Dang, X., Zhang, W. & Zhao, C. (2024). Micro-Topographic Controls on Rare Earth Element Accumulation and Fractionation in Weathering Profiles: Case Study of Ion-Adsorption Rare Earth Element Deposit in Hedi, Zhejiang Province, China. *Minerals*, 14(11), Article 1178. <https://doi.org/10.3390/min14111178>
- Guyonnet, D., Planchon, M., Rollat, A., Escalon, V., Tuduri, J., Charles, N., Vaxelaire, S., Dubois, D. & Fargier, H. (2015). Material Flow Analysis Applied to Rare Earth Elements in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 107, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.123>
- Gültekin, A.H., Örgün, Y. & Suner, F. (2003). Geology, mineralogy and fluid inclusion data of the Kizilcaoren fluorite- barite- REE deposit, Eskişehir, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4), 365-376. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00019-6)
- Güneş, H., Obuz, H. E., Akçay, H., Kara, Ç. & Erdem, A. (2023). Production of rare-earth oxides from Eskişehir-Beylikova complex ores. *Bulletin of the*

- Mineral Research and Exploration, 170, 87-97.  
<https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1180222>
- Haniççi, N. (2013). Geological and geochemical evolution of the Bolkardağı bauxite deposits, Karaman, Turkey: Transformation from shale to bauxite. *Journal of Geochemical Exploration*, 133, 118-137.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.04.004>
- Helvacı, C. (1984). Apatite-Rich Iron Deposits of the Avnik (Bingöl) Region, Southeastern Turkey. *Economic Geology*, 79(2), 354-371.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.79.2.354>
- İnan, N. & İnan, S. (1999). New findings on the age and depositional conditions from the Tokus Formation (Sivas, Türkiye). *Geological Bulletin of Turkey*, 42(1), 119-130. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/4ea0d5b0cf49525\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/4ea0d5b0cf49525_ek.pdf)
- Jordens, A., Cheng, Y. P. & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97-114.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>
- Kadioglu, Y. K., Dilek, Y. & Foland, K. A. (2006). Slab break-off and syncollisional origin of the Late Cretaceous magmatism in the Central Anatolian crystalline complex. *Geological Society of America*, 409, 381-415.  
[https://doi.org/10.1130/2006.2409\(19\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(19))
- Kaplan, H. (1977). Rare earth elements and thorium complex deposit of Kızılcaören village, Sivrihisar-Eskişehir, Turkey. *Bulletin of Geological Engineering*, 2, 69-76.
- Kraeff, A. & Pasquare, G. (1966). Igneous Nepheline-Bearing Rocks of Çukurköy (Northern Part of Province of Kayseri, Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 66, 121-125.
- Kursunoglu, S., Hussaini, S., Top, S., Ichlas, Z. T., Gokcen, H. S., Ozsarac, S. & Kaya, M. (2021). Production of mixed rare earth oxide powder from a thorium containing complex Bastnaesite ore. *Powder Technology*, 379, 641-654.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.086>
- Leo, G. W., Marvin, R. F. & Mehnert, H. H. (1974). Geological framework of Kuluncak-Sofular area, east-central Turkey, and K-Ar ages of igneous rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 85(11), 1785-1788. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85%3C1785:GFOTKA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85%3C1785:GFOTKA%3E2.0.CO;2)
- Li, Y., Wu, L.G., Yu, Y., Yang, L., Selby, D., & Li, X.H. (2025). Paleozoic carbonatites controlled rare-earth-elements mineralization at Bayan Obo. *Science Advances*, 11(17) Article eads9481. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads9481>.
- Liu, S. L., Fan, H. R., Liu, X., Meng, J., Butcher, A.R., Yann, L., Yang, K. F. & Li, X. C. (2023). Global Rare Earth Elements Projects: New Developments and Supply Chains. *Ore Geology Reviews*, 157, 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>
- Lottermoser, B. G. (1990). Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Lithos*, 24(2), 151-167.  
[https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90022-S](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90022-S)
- MİA, (2025). *Nadir Toprak Elementleri ve Türkiye: Jeopolitik Satrançta Yeni Dinamikler ve Aktörler*. Milli İstihbarat Akademisi. Türkiye. ss.: 25.
- MTA, (1986). *Kızılcaören Köyü (Sivrihisar, Eskişehir) Civarındaki Kompleks Cevher Yatağına Ait (Fluorit+Barit+Nadir Toprak Elementleri) Maden Jeolojisi Sonuç Raporu*. MTA Genel Müdürlüğü Maden Etüt ve Arama Daire Başkanlığı (in Turkish).
- Nikiforov, A. V., Öztürk, H., Altuncu, S. & Lebedev, V. A. (2014). Kızılcaören Ore-bearing Complex with Carbonatites (Northwestern Anatolia, Turkey): Formation Time and Mineralogy of Rocks. *Geology of Ore Deposits*, 56, 35-60.  
<https://doi.org/10.1134/S107570151401005X>
- Okay, A. I. & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F. & Séranne, M. (Eds.), *The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine orogen*, Geological Society, London, *Special Publication*, 156, 475-515.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22>
- Özaksoy, V. ve Gökten, E. (1996). The stratigraphy and tectonics of Özvatan-Felahiye (Kayseri). *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 39(1), 31-42.  
[https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/31af583573227f0\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/31af583573227f0_ek.pdf)
- Özgenç, İ. & İlbeyli, N. (2009). Geochemical constraints on petrogenesis of Late Cretaceous alkaline magmatism in east-central Anatolia (Hasancelebi-Basören, Malatya), Turkey. *Mineralogy and Petrology*, 95, 71-85.  
<https://doi.org/10.1007/s00710-008-0027-0>

- Özmen, Ö. & Koç, Ş. (2006). Farklı Renkteki Fluoritlerin Nadir Toprak Elementleri (NTE) Konsantrasyonu Kaman, Kırşehir, Türkiye. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 229-237.
- Öztürk, H., Hanilçi, N., Altuncu, S. & Kasapçı, C. (2019). Rare earth element (REE) resources of Turkey: An overview of their characteristics and origin. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 159, 129-143. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.471205>
- Pulat, O., Kırtıl, M., Ünlüer, A. T., Karakaş, M., Küçük, M., Ulutaş, A. M., Akgöz, M., Ateş, H., Omaç, M. B. & Türkan, Ö. (2025). Geochemical and geophysical relationship of the potassium-rich fenite zone in surface and subsurface investigations of the giant Kuluncak (Malatya) Nb-U-REE-Zr-Li mineralization. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 178, 149-181. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1812181>
- Pulat, O., Karakaş, M. & Yastı, M. A. (2022). Relationship of ore properties and alteration of the Büyük Kuluncak (Malatya) Nb - U -NTE - Zr - Li deposit. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 167, 127-148. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.973626>
- Qasim, M., Khan, S. D., Sisson, V., Greer, P., Xia, L., Okyay, U. & Franco, N. (2024). Identifying Rare Earth Elements Using a Tripod and Drone-Mounted Hyperspectral Camera: A Case Study of the Mountain Pass Birthday Stock and Sulphide Queen Mine Pit, California. *Remote Sensing*, 16(17), Article 3353. <https://doi.org/10.3390/rs16173353>
- Sarıfakıoğlu, E., Özen, H. & Hall, C. (2009). Petrogenesis of extension-related alkaline volcanism in Karaburhan (Sivrihisar-Eskisehir), NW Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Science*, 35(6), 502-515. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.03.002>
- She, H. D., Fan, H. R., Chen, B., Yang, K. F., Li, X. C. & Wang, Q. W. (2025). The occurrence and distribution of thorium in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe polymetallic deposit, China. *Ore Geology Reviews*, 186, Article 106883. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106883>
- Schuilng, R. D. (1961). Formation of pegmatitic carbonatite in a syenite-marble contact, *Nature*, 192, 1280. <https://doi.org/10.1038/1921280a0>
- Solmaz, O.M. (1983). *Çukur (Kayseri) bölgesi siyenitik kompleksinin petrolojik etüdü* [Unpublished Ph.D. thesis]. Istanbul Technical University (Istanbul), 82 p.
- Stumpfl, E. F. & Kırkoğlu, M. S. (1986). Fluorite-barite-rare earth deposit at Kızılcaören, Turkey. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 78, 193-200.
- Şaşmaz, A. & Yavuz, F. (2007). REE geochemistry and fluid-inclusion studies of fluorite deposits from the Yaylagözü area (Yıldızeli-Sivas) in Central Turkey. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 183(2), 215-226. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0077>
- Tavlı, F., Gücer M.A., Çimen, O., Akal, C., Ersoy, E.M., Uysal, İ., Ağrılı, H., Dönmez, C. & Çolak, T. (2024). Geochemical and Geochronological Characteristics of the Davulalan Pluton (Sivas, Türkiye) from the Central Anatolian Crystalline Complex. Çan, T., Tekin, S., Pınarcı, E., Kadakçı Koca, T., Koçkar, M. K., Olgun, Ş., Güler, C., Sarı, E. & Tiringa, D. (Eds.), *76th Geological Congress of Turkey with international participation, Abstracts book* (p.: 183). April 15-19, 2024, Ankara, Turkey.
- Uras, Y., Yalçın, C., İlbeyli, N. & Tapınç, B. G. (2020). Hayriye (Felahiye-Kayseri) Floritlerinin Nadir Toprak Element (NTE) Jeokimyası. *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 461-471 (in Turkish with English abstract). <https://doi.org/10.28948/ngumuh.604350>
- Ünlüer, A. T., Budakoğlu, M., Doner, Z. & Abdelnasser, A. (2023). The evolution of the REE-bearing Özvatan nepheline syenite-carbonatite complex, Central Turkey: Mineralogical, geochemical, and stable isotopic approaches. *Minerals*, 13(6), Article 667. <https://doi.org/10.3390/min13050667>
- Ünlüer, A.T., Doner, Z., Ünal, A., Kamacı, Ö., Kaya, M., Öztürk, S. & Kumral, M. (2024). The first finding of a highly evolved Mg-rich carbonatite intrusion in NW Anatolia (Arıklı-Çanakale). *Geochemistry*, 84(4), Article 126124. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126124>

- Walters, A, Lusty, P & Hill, A. (2011). *Rare earth elements: mineral profile series [online]*, British Geological Survey, commodity profiles. [https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/12583/1/Rare\\_Earth\\_Elements\\_profile.pdf](https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/12583/1/Rare_Earth_Elements_profile.pdf)
- Wu, C., Yuan, Z. & Bai, G. 1996. Rare-earth Deposits in China. In Jones, A. P., Wall, F., Williams, C.T. (Eds.), *Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits* (pp. 281-310). Chapman and Hall, London.
- Yeşilören Görmüş, N., Gürtekin, G., Erdem, A. & Gülmez, A. (2021). Kızılcaören (Sivrihisar) bölgesi nadir toprak element (NTE) içeren minerallerin mineral serbestleşme analiz (MLA) yöntemi kullanılarak tayini. *International Journal of Pure and Applied Sciences* 7(2), 251-264. <https://doi.org/10.29132/ijpas.907212>
- Yıldırım, E., Yıldırım, N., Dönmez, C. & Günay, K. (2021). Geology of the Yeşilyurt gold deposit: an example of low-angle normal fault related mineralization, Eastern Anatolia-Turkey. *MTA Dergisi*, 164, 267-285 (in Turkish with English abstract). <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.797729>
- Yılmaz, M. Ç., Gücer M. A., Çimen, O., Akal, C., Ersoy, E.M., Uysal, İ., Ağrılı, H., Dönmez, C. & Çolak, T. (2024). Whole Rock Geochemical and Zircon U-Pb Age Characteristics of Rare Earth Elements-Enriched Hayriye Pluton (Kayseri, Türkiye). Çan, T., Tekin, S., Pınarcı, E., Kadakçı Koca, T., Koçkar, M. K., Olgun, Ş., Güler, C., Sarı, E. & Tiringa, D. (Eds.), *76th Geological Congress of Turkey with international Participation, Abstracts Book* (p.: 184), April 15-19, 2024, Ankara, Turkey.
- Zhou, B., Li, Z. & Chen, C. (2017). Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 7, Article 203. <https://doi.org/10.3390/min7110203>
- Zhu, X., Zhang, B., Ma, G., Pan, Z., Hu, Z. & Zhang, B. (2022). Mineralization of ion-adsorption type rare earth deposits in Western Yunnan, China. *Ore Geology Reviews*, 148, Article 104984. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104984>
- Zhukova, I.A., Stepanov, A.S., Jiang, S.Y., Murphy, D., Mavrogenes, J., Allen, C., Chen, W. & Bottrill, R. (2021). Complex REE systematics of carbonatites and weathering products from uniquely rich Mount Weld REE deposit, Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 139(B), Article 104539. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104539>



**Türkiye'nin İlk Resmi Deprem Bölgeleri Haritası: 1945 Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası**  
*Türkiye's First Official Seismic Hazard Map: 1945 Seismic Hazard Map*

**Bülent Özmen<sup>1\*</sup> , Bahattin Murat Demir<sup>2</sup> **

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maltepe 06570 Ankara, Türkiye  
<sup>2</sup> İzmir Büyükşehir Belediyesi, İzmir, Türkiye

• Geliş/Received: 24.11.2025 • Düzeltmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 02.01.2026 • Kabul/Accepted: 11.01.2026  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 15.04.2026 • Baskı/Printed: 30.04.2026

*Derleme / Review*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Türkiye'nin ilk resmi deprem bölgeleri haritası “yer sarsıntısı bölgeleri haritası” ismi ile 12 Temmuz 1945 tarihinde yayınlanmıştır. Bakanlar kurulunca onaylanan ve/veya Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren haritalar “resmi” sıfatını almakta ve yapı üretim süreçlerinde haritada belirlenen deprem bölgesinin esaslarına uyulması zorunluluğu doğmaktadır. 22 Temmuz 1944 tarihli Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren “Yersarsıntılarında Evvel ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun” gereğince bu harita Bayındırlık ve Milli Eğitim Bakanlıklarınca kurulan bir komisyon tarafından hazırlanmış ve Türkiye; Büyük hasara uğramış bölgeler, Tehlikeli yersarsıntısı bölgeleri ve Tehlikesiz bölgeler olmak üzere 3 bölgeye ayrılmıştır. Deprem bölgeleri haritaları ve bu haritalara paralel olarak hazırlanan bina deprem yönetmelikleri deprem risklerinin azaltılması çalışmalarında önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışma kapsamında; ilk resmi deprem bölgeleri haritasının hangi ihtiyaçtan doğduğu, nasıl ve hangi verileri kullanarak hazırlandığı ve ulusal afet/deprem risk yönetim sistemi açısından taşıdığı önem gibi konular hakkında detaylı bilgiler verilmeye çalışılacaktır. Bu bilgiler 1940'lı yıllardan itibaren Türkiye'de deprem bölgeleri haritası ve yapı yönetmelikleri üzerine yapılan çalışmalara ait bilgilerle desteklenmiş ve bütünleştirilmiştir. Böylece hem “1945 Türkiye Yer Sarsıntısı Haritasının” afet risk yönetimi açısından öneminin ve arka planının daha iyi anlaşılması hem de Türkiye'nin depremle mücadele tarihine ışık tutulması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Afet risk azaltma yönetimi, deprem tehlikesi, harita, Nafia vekâleti, yer sarsıntısı.

**Abstract:** Türkiye's first official seismic hazard map, entitled “Seismic Hazard Map”, was published on July 12, 1945. Maps approved by the Council of Ministers and/or published in the Official Gazette are deemed “official”, and compliance with the principles of the seismic zones specified on the map became mandatory in building processes. Pursuant to the “Law on Measures to be Taken Before and After Earthquakes,” which was implemented with publication in the Official Gazette dated July 22, 1944, this map was prepared by a commission established by the Ministries of Public Works and National Education. The map divides Türkiye into three zones: areas that have suffered major damage, hazardous earthquake zones, and safe zones. Seismic zone maps and building earthquake regulations prepared in parallel with these maps play an important role in efforts to reduce earthquake risks.

Within the scope of this study, detailed information is provided about topics such as the need for creation of the first official seismic zone map, how it was prepared and what data was used, and its importance in terms of the national disaster/earthquake risk management system. This information is supplemented and integrated with data from studies conducted in Türkiye since the 1940s about seismic zone maps and building regulations. Thus, the aim is to provide a better understanding of the importance and background of the 1945 Türkiye Seismic Zone Map in terms of disaster risk management and to shed light on Türkiye's history of earthquake mitigation.

**Keywords:** Disaster risk management, earthquake hazard, map, Ministry of Public Works, seismic zone.

## GİRİŞ

Dünyanın farklı türde aktif fay sistemlerinden oluşan levha sınırları üzerinde yer alan Türkiye için deprem risklerinin azaltılması ve deprem güvenli yapılaşma ile yer seçimi yaşamsal önemde bir konudur. Kentsel ve kırsal yerleşim alanlarının depremselliğinin, deprem tehlikesinin araştırılarak riskli bölgelerin önceden belirlenmesi, gerekli risk ve zarar azaltıcı idari, teknik ve hukuki önlemlerin alınabilmesi ve geliştirilebilmesi için bir zorunluluktur. Bu zorunluluğun önemli bir bileşeni ise deprem bölgeleri haritalarının üretilmesi ve bu haritaya dayalı yapılaşma kurallarının belirlenmesidir.

Türkiye Cumhuriyeti için depremler, kuruluşunun ilk yıllarından itibaren karşı karşıya kaldığı en önemli sorunlardan biri olmuştur. Genç Cumhuriyet daha bir yılını tamamlayamadan 13/09/1924 tarihinde önemli can ve mal kayıplarına neden olan Horasan (Erzurum) depremi meydana gelmiştir. Cumhuriyetin 16. yılında ise 6 Şubat 2023 depremlerine kadar Türkiye’de karşılaşılan en büyük ve en geniş coğrafyada etkili olan 27/12/1939 Erzincan depremi yaşanmıştır. Aynı dönemde sadece depremler değil taşkın/sel olayları da genç Cumhuriyet devletini önemli oranda meşgul etmiştir. 1940’lı yıllara kadar Kamu Yönetimi özelde deprem genelde tüm afetler karşısında afetzedelerin barınma, ısınma, yiyecek vb., acil yardım ve acil ihtiyaçlarının karşılanması ile yeni konutların yaptırılmasına odaklanan “yara sarma” politikalarını uygulamıştır.

1939 - 1944 yılları arasında 27/12/1939 Erzincan depremi ile başlayan, 20/12/1942 Erbaa (Tokat) depremiyle devam eden ve 01/02/1944 Gerede (Bolu) depremi ile tamamlanan peş peşe yaşanan depremler büyük can ve mal kayıplarına yol açmakla kalmamış uygulanan yara sarma politikalarının ülkenin depremselliği karşısında ne kadar yetersiz olduğunu da açık bir şekilde göstermiştir. Bu durum kamu yönetiminde, deprem tehlikesinin ve bu tehlikenin riske

(zarar ve kayıplara) dönüşmesini engelleyecek yapılaşma kurallarının deprem meydana gelmeden önce belirlenmesinin gerekli olduğuna dair bir bakış açısının gelişmesine yol açmıştır. Bu bakış açısının ilk ürünlerinden biri 22 Temmuz 1944 tarihinde Resmi Gazetede yayımlanan 4623 sayılı “*Yersarsıntısından Evvel Ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun*” olmuştur (Pampal ve Özmen, 2007; Özmen, 2012; Demir vd., 2025). Anılan kanunun yayımını takip eden bir yılın sonunda 1945 yılı Temmuz ayında dönemin Bakanlar Kurulunca Türkiye’nin ilk resmi deprem bölgeleri haritası olan “*Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası*” onaylanmış ve uygulanmaya başlamıştır (Sayarı vd., 1945).

Deprem bölgeleri haritaları ve bu haritalara paralel olarak hazırlanan bina deprem yönetmelikleri deprem risklerinin azaltılması çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Bu çalışma kapsamında “*1945 Türkiye Yer Sarsıntısı Haritasının*” hazırlanma koşulları, kullanımı ve afet/deprem yönetimi üzerindeki etkileri ele alınacak ve öncesinde hazırlanmış haritalar hakkında bilgiler verilecektir. Söz konusu haritanın hangi ihtiyaçtan doğduğu, hangi verileri kullanarak hazırlandığı ve yürürlükte kaldığı dönem içindeki önemi gibi konular hakkında detay bilgiler verilerek Türkiye’de deprem tehlike ve risk yönetimine yönelik yürütülen çalışmaların tarihsel gelişim sürecinin daha iyi anlaşılmasına katkı sunulmaya çalışılacaktır. Ayrıca, 1945 öncesi deprem bölgelerini belirlemeye yönelik yapılan ve resmi sıfatı almayan çalışmalar hakkında da bilgiler verilerek ilk resmi deprem bölgeleri haritası ortaya çıkarılana kadar yapılmış olan çalışmalar kronolojik bir sıra ile ele alınacaktır.

## 1923 - 1945 YILLARI ARASI TÜRKİYE DEPREM TARİHİ VE DEPREM YÖNETİMİ

29/10/1923 tarihinde kurulan Türkiye Cumhuriyeti, daha kuruluş çalışmalarını ve birinci yılını tamamlayamadan 13/09/1924 tarihinde oldukça

önemli zararlara yol açan 6.9 büyüklüğündeki Horasan - Pasinler (Erzurum) depreminin yarattığı yıkım ve kayıplarla karşı karşıya kalmıştır. 1. Dünya Savaşı ve Kurtuluş Savaşının ağır ekonomik ve sosyal şartları altındaki Cumhuriyet böylesi bir afet karşısında hızla reaksiyon almıştır. Depremin meydana geldiği günlerde yurtiçi gezisinde olan Gazi Mustafa Kemal programını iptal ederek hızla deprem bölgesine hareket ederek 11 gün süren incelemelerde bulunmuş, özellikle o günlerde yaptığı “*Felaket başa gelmeden evvel önleyici ve koruyucu tedbirleri düşünmek lâzımdır, geldikten sonra dövünmenin yararı yoktur*” konuşmasıyla deprem risk yönetiminin ilk işaretlerini de vermiştir (Atnur, 2006; Aydın ve Ergün, 2018). Daha sonraki yıllarda 1925 Dinar (Afyon), 1928 Torbalı (İzmir), 1938 Keskin (Kırşehir), 1939 Dikili (İzmir) Depremleri gibi önemli zarar ve kayıplara yol açan çok sayıda deprem meydana gelmiştir. Gazi Mustafa Kemal'in 31 Mart 1928 tarihinde Torbalı (İzmir)'da meydana gelen M 7.0 büyüklüğündeki depremden sonra Torbalı'ya kendi imzasını taşıyan bir belge ile ilk etapta 10 bin lira yardım göndermiş olması, deprem sonrası yıkılan Torbalı'nın yaralarının sarılması ve tekrar imarı için yakından ilgilenmesi ve yarısı devletten kampanyası ile bölgenin kısa zamanda iyi bir duruma gelmesini sağlaması açısından bu dönemin dikkat çeken diğer depreminden biri olmuştur (Tınal, 2009; Atabay, 2023). 1939 yılı tamamlanırken, Cumhuriyetin 16. yılında ise geniş bir coğrafyada etkili olan ve çok büyük mal ve can kaybına neden olan 27/12/1939 Erzincan Depremi yaşanmıştır.

Erzincan Depremi sonrasında kısa aralıklarla peş peşe meydana gelen 20/12/1942 Erbaa (Tokat), 20/6/1943 Hendek (Sakarya), 27/11/1943 Ladik (Samsun) ve 01/02/1944 Gerede (Bolu) depremleri sadece etkiledikleri yerleşim alanlarında büyük can ve mal kayıplarına yol açmakla kalmamış ülkenin sahip olduğu jeolojik koşulların ne derece yüksek deprem riski yarattığını da ortaya koymuştur. Bu yönüyle de ülkenin depremselliği,

deprem tehlikesi ve riski karşısında sadece acil yardım ve müdahaleye odaklanan yara sarma politikalarının ve yara sarma odaklı anlayışın ne kadar yetersiz olduğunu da açık bir şekilde göstermiştir. Bu durum kamu yönetiminde deprem/afet yönetim anlayışının değişmesine; Türkiye’de “kriz yönetimi/yara sarma” politikaları yerine afet risk yönetim politika ve uygulamalarının öne çıkmasına yol açmıştır.

Erzincan Depremi ve sonrasında birbiri peşi sıra meydana gelen depremler aynı zamanda jeolojik araştırmaların daha etkin gerçekleştirilmesine de neden olmuş ve bu kapsamda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar sonucu dünyanın en önemli deprem kuşaklarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonunun varlığı ortaya çıkartılmıştır (Ketin, 1948; Ketin, 1949).

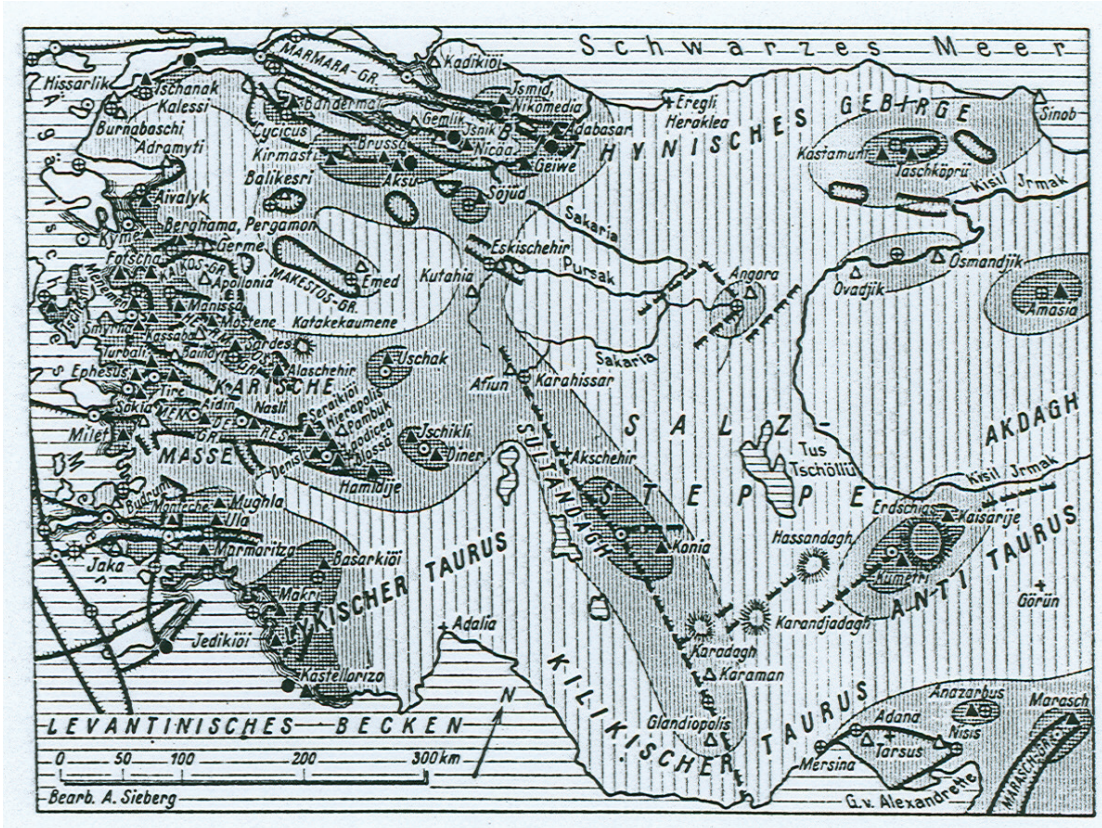
## **TÜRKİYE’DE DEPREM BÖLGELERİ HARİTASININ ÜRETİMİNE YÖNELİK TARİHSEL SÜRECİ**

Aktif deprem kuşağında yer alan Anadolu’da her uygarlık o günün koşullarına uygun olarak deprem risklerine karşı tedbirler geliştirmeye çalışmıştır. 19. yüzyıla gelindiğinde dünyadaki gelişmelerin de etkisiyle Osmanlı İdaresince yerleşimlerin depreme daha dayanıklı hale getirilmesi için bir yandan yapı mevzuatı oluşturulmaya (Ebniye Nizamnamesi/Bina Tüzüğü) çalışılırken diğer yandan özellikle 1894 İstanbul Depremi sonrasında deprem konusunda gözlem ve ölçümlerin yapıldığı bilimsel araştırmalar başlatılmıştır. Bu kapsamda yabancı uzmanlara ilk kapsamlı deprem raporu hazırlanmıştır. Sismograf alınarak Rasathane-i Amire’de bir “Deprem Şubesi” kurulmuştur (Özcep, 2018; Özkılıç, 2015). Ancak daha sonraki yıllarda bu çalışmalar yeterince ilerletilememiş ve geliştirilememiş; zaman içinde kamu yönetiminin ve kamuoyunun depreme olan ilgisi azalmıştır.

1923 yılında Türkiye’de Cumhuriyetin ilanı ile birlikte bilimsel ve teknik alanda yaşanan

gelişmeler deprem araştırmalarını da olumlu yönde etkilemiştir. Özellikle yabancı jeologlar tarafından başlatılan bu çalışmaların bir boyutunu da “*Deprem Bölgeleri Haritasının*” hazırlanması oluşturmuştur. Cumhuriyet döneminde Türkiye’de deprem bölgeleri haritalarının hazırlanması ile ilgili çalışmaların tarihçesi 1930’lu yıllara kadar uzanmaktadır (Pampal ve Özmen, 2007; Özmen, 2012). Bu konudaki çalışmaların öncüsü August Heinrich Sieberg’dir (1875–1945). 12° Mercalli–Cancani–Sieberg (MCS) makrosismik ölçeğine yaptığı katkılarla tanınmasının yanı sıra, dünya çapında bir deprem listesi derleyen kişi olarak da önemli bir konuma ve küresel tanınırlığa sahip olan Sieberg, Türkiye’nin ilk deprem bölgeleri haritasını hazırlamıştır (Sieberg, 1932; Özmen, 2012). Sieberg; *Erdbebengeographie* (deprem coğrafyası) adlı çalışmasında MÖ 2200’den 1931

yılına kadar dünya genelinde meydana gelen yaklaşık 2300 depremi ele alarak deprem aktivitesi yüksek bölgeleri haritalamaya çalışmıştır. Sieberg (1932) haritanın hazırlandığı yıllardaki çok az sayıdaki çalışma, veri, jeoloji ve tektonik haritalarından yararlanarak dünyanın birçok ülkesi gibi Türkiye içinde Şekil 1’de gösterildiği gibi bir harita hazırlamıştır. Söz konusu harita incelendiğinde Anadolu coğrafyasında deprem tehlike derecesine göre bölgelendirme yapıldığı görülmektedir. Buna ek olarak haritada faylar, nehirler, göller ve önemli yerleşim birimlerinin isimlerine de yer verilmiştir. Kuzey Anadolu Fayının o tarihlerde henüz keşfedilmemiş olması nedeniyle bu fay zonu üzerinde olan bazı bölgelerin deprem bölgesi dışında gösterilmiş olması haritanın dikkat çeken özellikleridir.

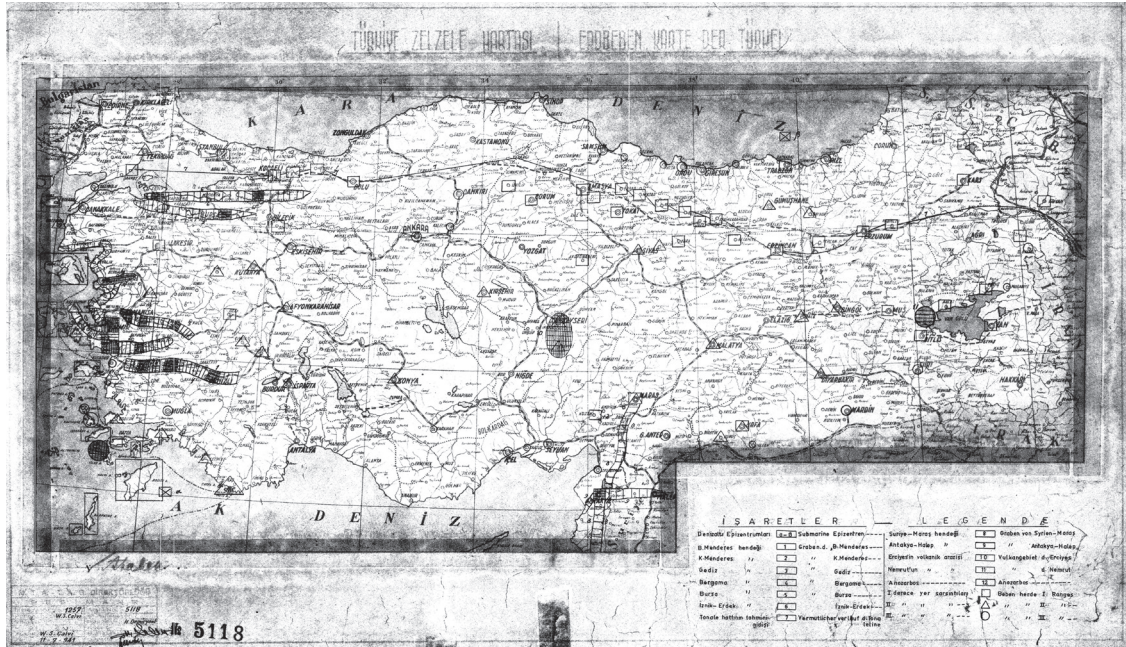


Şekil 1. Sieberg (1932) tarafından hazırlanmış olan deprem bölgeleri haritası.

Figure 1. Seismic Zone Map prepared by Sieberg (1932).

1935 yılında Maden Tetkik Arama Enstitüsünün (MTA) kurulmasıyla birlikte, MTA Türkiye'deki deprem araştırmalarının merkezlerinden biri haline gelmiş ve Enstitüde görev yapan jeologlar tarafından meydana gelen depremlere ve ülkenin depremselliğine yönelik önemli çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların sonuçları raporlar, makaleler halinde yayımlanarak literatüre kazandırılmıştır. 1940 yılında Nuriye Pınar ilk defa Marmara ve Ege denizlerindeki deniz içi faylara yer veren haritasını yayımlanmıştır (Okay, 2017; Pınar ve Lahn, 1952). 1941 yılında Salomon-Calvi, Türkiye ve yakın civarında meydana gelen depremlerin bir listesini içeren bir rapor hazırlamış ve bu raporun sonuna deprem tehlikesinin yüksek olduğu yerleri gösteren "Türkiye Zelzele Haritası" eklemiştir (Şekil 2) (Salomon-Calvi, 1941; Özalp, 2025). Bu Harita'da birinci derece yer sarsıntıları (□), ikinci derece yer sarsıntıları (Δ), üçüncü derece yer sarsıntıları (o) olan yerler gösterilmiştir.

Bilimsel araştırmalardan elde edilen verilerin uygulamaya, imar ve yapılaşma işlemlerine yansıtılması ve özellikle bir deprem bölgeleri haritasına dönüştürülmesi sürecinde Nafia Vekâletinin (Bayındırlık Bakanlığının) yeniden yapılandırılmasına yönelik hazırlanan "Nafia Vekâleti Teşkilât ve Vazifelerine Dair Kanun"un özel bir önemi vardır. 1939 yılında yürürlüğe giren kanunun yayımlanması ile birlikte hem "yapı işlerinin teknik ve mimarî bakımından ve yurdun imar işlerinin şehircilik bakımından tanzimi" hem de "imar planlarının tetkik ve tasdiki" işleri anılan Vekâlete (Bakanlığa) görev olarak verilmiştir (Resmi Gazete, 1939, 30 Mayıs). Bu durumla birlikte yerleşim birimlerini etkisi altına alan başta deprem olmak üzere afet sırası ve sonrasında yapılan çalışmaların yanı sıra öncesinde yapılması gereken çalışmalara da önem verilmeye başlanmıştır.

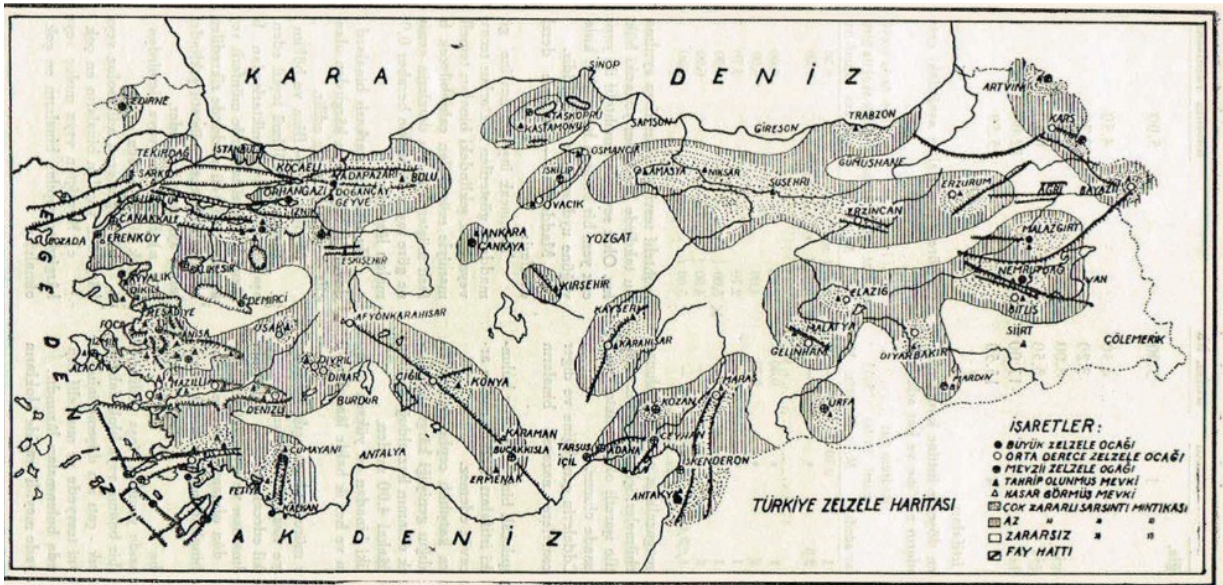


Şekil 2. Türkiye Zelzele Haritası (Salomon-Calvi, W. (1941)) (Özalp, 2025'ten alınmıştır) (Birinci derece yer sarsıntıları (□), ikinci derece yer sarsıntıları (Δ), üçüncü derece yer sarsıntıları (o)).

Figure 2. Türkiye Earthquake Map (Salomon-Calvi, W. (1941)) (taken from Özalp, 2025) (First-degree earthquakes (□), second-degree earthquakes (Δ), third-degree earthquakes (o)).

15/06/1943 tarihinde Nafia Vekâleti Yapı ve İmar İşleri Reisliğine (Bayındırlık Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğüne) atanan Sırrı Sayarı'nın aktardıklarına göre; 27 Aralık 1939 Erzincan depremi sonrası Başvekâletten (Başbakanlık) Nafia Vekâletine yazılan ve dönemin Başbakanı Dr. Refik Saydam'ın imzasını taşıyan bir mektupla yurdun birçok yerinde sık sık tekrarlanan deprem hadiseleri karşısında gerekli tetkiklerin yapılması ve deprem sarsıntılarına dayanabilir evsafa bina yapılması için gerekli kuralları/standartları gösterir bir talimatnamenin hazırlanması istenmiştir (Sayarı, 1943). Bu talimatın üzerine Nafia Vekâleti depreme dayanıklı bina yapımının esaslarını belirleyen bir "Talimatname" ve "deprem bölgelerini gösteren bir haritanın" hazırlanması çalışmalarını başlatmıştır (Sayarı, 1943; Sayarı vd., 1945). Öncelikle, 22 Eylül 1939 Dikili (İzmir) ve 27 Aralık 1939 Erzincan'da meydana gelen depremlerin yaratmış olduğu hasarı incelemek üzere deprem bölgelerine ayrı ayrı heyetler gönderilmiş ve depremin hangi tür ev/binalarda

ve hangi tür zeminlerin olduğu yerlerde daha fazla hasara neden olduğu araştırılmıştır. Sonrasında Yunanistan, İtalya, Yugoslavya, Japonya, Amerika ve Rusya'da mevcut Yüksek Mühendis Birliklerine ve ayrıca resmen bu hükümetlere müracaatlar edilerek bu memleketlerde depreme karşı ne gibi kanun ve hükümler bulunduğu sorulmuş ve alınan bütün bilgilerin detaylı bir şekilde incelenmesinden sonra memleketimize en uygun olan zelzele kanun ve talimatnamenin İtalya hükümetinin çıkardığı ve tatbik ettiği talimatname olduğuna ve Rusya talimatının da bilhassa kerpiç inşaat için dikkate değer hükümleri ihtiva ettiğine karar verilmiştir (Sayarı, 1943). Bu çalışmalar sonrasında öncelikle deprem bölgelerinde ayrı ayrı inceleme yapan heyetlerin gözlemleri olmak üzere İtalya ve Rus talimatnamelerine dayanarak Türkiye'ye özgü bir yapı talimatnamesi hazırlanmıştır (Sayarı, 1943). Bu talimatname Nafia Vekâleti (Bayındırlık Bakanlığı) tarafından 1940 yılında "Zelzele Mıntıkları Muvakkat Yapı Talimatnamesi" başlığı ile yayınlanmıştır.



Şekil 3. Türkiye Zelzele Haritası (Çok Zararlı Sarsıntı Mıntıkası, Az Zararlı Sarsıntı Mıntıkası ve Zararsız Sarsıntı Mıntıkası) (Vatan Gazetesi, 1940, 11 Ekim).

Figure 3. Türkiye Earthquake Map (Very damaging earthquake zone, Less damaging earthquake zone and No damage earthquake zone).



4623 sayılı Kanun'un ilgili maddeleri kapsamında “Zelzele Mıntıkları Muvakkat Yapı Talimatnamesi” 1944 yılında revize edilmiştir (İlki ve Celep, 2012). 4623 sayılı kanunla birlikte deprem bölgeleri haritasının yapı yönetmeliği ile birlikte kullanımı, Türkiye’de yapı üretim sürecinin zorunlu bir işlemi haline gelmiş ve günümüze kadar geçen yaklaşık 80 yıllık süreçte deprem bölgesi içinde kalan yerleşim (il, ilçe, belediye, bucak) yerleri listeleri ile birlikte yenilenerek yayımlanmaya devam edilmiştir. 1945 sonrasındaki yaklaşık seksen yıllık süreçte (1945 – 2025) yürürlüğe giren haritalara ait genel bilgiler aşağıda sunulmuştur;

- Tehlikeli Yersarsıntısına Maruz Bölgeler Haritası ve Yerleşim Listesi (Resmi Gazete, 1948, 13 Şubat)
- Yersarsıntısına Maruz Kalabilecek Bölgeler Haritası (Resmi Gazete, 1963, 24 Nisan)
- Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ve Liste (Resmi Gazete, 1972, 23 Aralık)
- Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (Bakanlar Kurulu Kararı, 1996, 18 Nisan)
- Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Resmi Gazete, 2018, 18 Nisan)

Günümüzde 2018 yılında yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritası ile birlikte bu haritalar elektronik ortamda yayımlanmaya başlamış ve deprem bölgeleme kavramı ortadan kalkmıştır. 2018 yılında yayınlanan ve 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren harita ile birlikte artık istenilen her yerin tehlike değerinin öğrenilebilmesi sağlanmış ve uygulama da bu değer kullanılması yasal zorunluluk haline getirilmiştir.

Bu çalışmanın kapsamı dışında kalması nedeniyle yukarıda sıralanan haritaların içeriğine yönelik özel bir değerlendirme ve karşılaştırma yapılmamış olsa da belirtmek gerekir ki 1973 yılına kadar söz konusu haritalar Bayındırlık ve Milli Eğitim Bakanlıklarının ortak ürünü olarak hazırlanmıştır (Sayarı vd., 1945). 1973

sonrasında bu çalışmaların koordinasyonu İmar ve İskân/Bayındırlık ve İskân Bakanlığınca gerçekleştirilmiştir. 2018 yılında ise haritalara ilişkin iş ve işlemlerin koordinasyonu Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından yapılmaya başlanmıştır. Dolayısıyla 2018 yılına kadar haritayı hazırlayan ve uygulanmasını takip eden idare aynı iken 2018 yılında hazırlayan ve uygulanmasını takip eden idareler birbirinden ayrılmıştır.

### 1945 YER SARSINTISI BÖLGELERİ HARİTASI

1944 yılında yayımlanan 4623 sayılı “Yersarsıntısından Evvel Ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun” ile merkezi yönetime; hem “Tehlikeli yersarsıntısına maruz bölgeler Nafia ve Maarif Vekilliklerinin müştereken ihzar ve İcra Vekilleri Heyetinin tasdik edeceği listeler veya haritalarla” belirleme (Madde 1) görevi hem de “Birinci madde mucibince tespit edilen yersarsıntısı bölgelerinde yeniden yapılacak veya değiştirilecek veya büyütülecek veya esaslı tamir görecektir resmî ve hususi bütün yapıların tâbi olacağı şartları” (Madde 13) tanzim etme görev ve sorumluluğu bir arada verilmiştir. Dönemin Nafia Vekâleti (Bayındırlık Bakanlığı), 4623 sayılı kanunda yer alan görev ve sorumlulukların yerine getirilmesinde ana aktörlerden biri haline gelmiştir. Öte yandan bu Kanun, depremler nedeniyle yaşanan acı tabloların bir daha yaşanmaması için önceden alınması gereken mühendislik önlemlerinin yanı sıra afet müdahale ve yardım çalışmalarına yönelik esasları da düzenlediğinden, ulusal ölçekte bütünleşik afet risk yönetim sisteminin kuruluşu için atılan ilk ve en önemli adımlardan biri olmuştur.

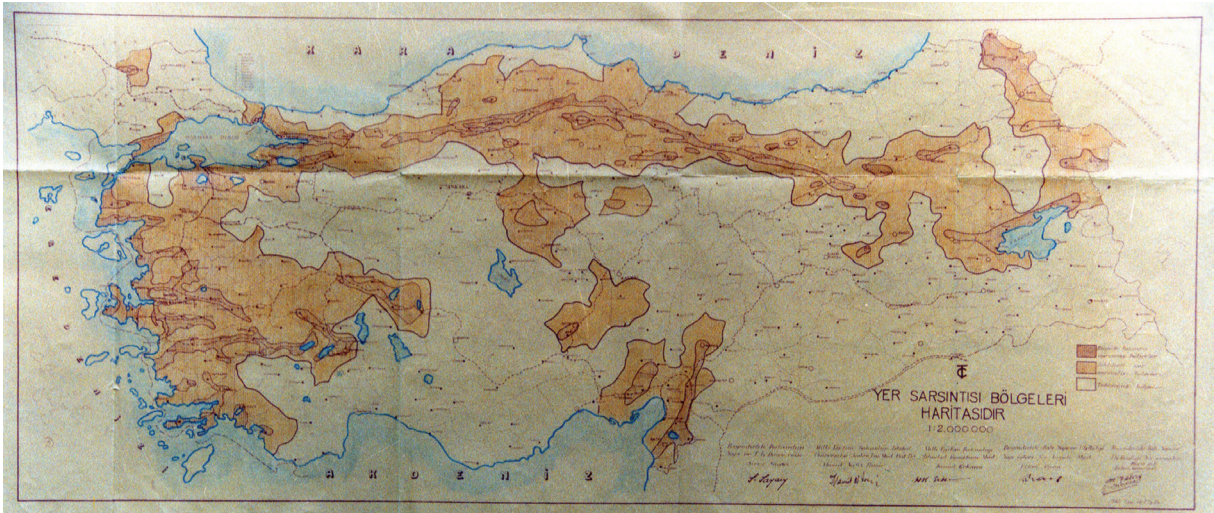
Mezkur kanunun yukarıda aktarılan 1’inci maddesine istinaden dönemin Nafia ve Maarif Vekilliklerince (Bayındırlık ve Milli Eğitim Bakanlıklarınca) tehlikeli yersarsıntısına maruz bölgelerin belirlenmesine yönelik müştereken bir çalışma başlatılmıştır. 1945 yılında Nafia

Vekâleti Bayındırlık Bakanlığına, Maarif Vekâleti ise Milli Eğitim Bakanlığına dönüştürülmüş olup çalışmalar bu yeni Bakanlıklar bünyesinde devam ettirilmiştir. Bu kapsamda, Bayındırlık Bakanlığının 09.08.1944 tarih ve 9037 sayılı emir ve Milli Eğitim Bakanlığının 11.12.1944 tarih ve 5263 sayılı olurlarıyla Bayındırlık Bakanlığı Yapı ve İmar İşleri Dairesi Başkanı Sırrı Sayarı'nın başkanlığında, Yapı İşleri Fen Heyeti Müdürü Yüksek Mühendis Fikri Alpay, Yüksek Mühendis Fahri Onursal ile Milli Eğitim Bakanlığında İstanbul Üniversitesi Jeoloji Enstitüsü Ordinaryüs Profesörü Hamit Nafiz Pamir ve İstanbul Rasathanesi Müdürü Kemal Erkmen'den oluşan bir heyet kurulmuştur (Sayarı vd., 1945).

Kurulan heyet, 2-3 Mart 1945 tarihinde Ankara'da Bayındırlık Bakanlığı Yapı İşleri Reisliğinde toplanmış ve MTA tarafından hazırlanmakta olan jeolojik ve tektonik haritaların elde edilmesine karar vermiştir. Sonrasında 15 Mayıs 1945 tarihinde yine Ankara'da toplanan heyet aradan geçen zaman içinde çalışmalarını tamamlamış ve 18 Mayıs 1945 tarihinde

hazırlamış oldukları raporu “Yurdumuzun tehlikeli yersarsıntısı bölgelerini tayin için Milli Eğitim ve Bayındırlık Bakanlığı mütehassıs üyelerinin hazırladığı rapor” başlığı ile heyette yer alan bütün üyelerin imzası ile makama sunmuştur (Sayarı vd., 1945). Kurul 15/05/1945 tarihinde çalışmalarını tamamlayarak 1 / 2.000.000 ölçekli “Türkiye Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası'nı” hazırlamıştır.

4623 sayılı “Yersarsıntısından Evvel Ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanunun” birinci maddesi uyarınca “İcra Vekilleri Heyetinin tasdikinin” alınabilmesi amacıyla harita ve deprem tehlikesi altındaki yerleşimler listesi Bayındırlık Bakanlığı'nın 11/06/1945 tarih ve 5898/6110 sayılı yazısı ile Başbakanlığa gönderilmiştir (BCA, 1945a). Söz konusu harita ve liste Bakanlar Kurulunun 12/07/1945 gün ve 3/2854 sayılı kararıyla onaylanarak yürürlüğe girmiş ve “Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası” adıyla 1/2.000.000 ölçekli olarak yayınlanmıştır (BCA, 1945b; Pampal ve Özmen, 2007). Bu haritaya göre ülke coğrafyası;



**Şekil 5.** 1945 tarihli resmi yersarsıntısı bölgeleri haritası (Bayındırlık Bakanlığı, 1945; Pampal ve Özmen, 2007).  
**Figure 5.** Official seismic zone map dated 1945. (Minister of Public Works, 1945; Pampal and Özmen, 2007).



## Haritanın Teknik Esasları, Uygulanması ve Yapı Üretim Sürecine Etkisi

Haritanın teknik alt yapısı oldukça sınırlı ve bugüne kıyasla yetersizdir. Arşiv araştırmalarımızda ulaşılan belgelerde görüldüğü üzere haritanın hazırlanması için teşekkül ettirilen heyet üyelerince de vurguladığı gibi söz konusu harita çok sınırlı verilere dayalı olarak hazırlanmıştır. Bu verilerin ana unsurunu o gün için Maden Tetkik Arama Enstitüsünce ülke çapında gerçekleştirilmiş olan etütler ile bu etütlerin sonuçlarına göre anılan kurumun ürettiği jeolojik ve tektonik haritalar oluşturmaktadır. Bu haritalara ilave olarak, Bayındırlık Bakanlığı, İstanbul Üniversitesi Jeoloji Enstitüsü ve İstanbul Rasathane Müdürlüğündeki mevcut bilgiler de harita hazırlığında kullanılmış olup jeolojik-tektonik yapı (fay vb), deprem merkez üssü ve deprem büyüklüğü dağılım haritaları gibi bilgilerden yararlanılmıştır. Hasar tespit verileri deprem tehlikesinin tanımlanmasında temel veri olarak kullanılmış, hasarın olduğu alanlar tehlikeli bölge olarak değerlendirilirken hasarın meydana gelmediği alanlar normal/tehlikesiz bölge kategorisinde kabul edilmiştir. Günümüzde birçok jeolojik olayın daha iyi açıklanmasına en büyük katkıyı veren levha tektoniği hipotezinin anılan haritanın hazırlık günlerinde Dünya genelinde yaygın bir şekilde henüz kabul görmediği gerçeğini de unutmamak gerekir.

Diğer yandan haritanın teknik çerçevesi üzerinde haritanın hazırlanması için teşekkül ettirilen heyet üyelerinin önemli etkisi olmuştur. Örneğin, 1925 yılında İstanbul Darülfünunda Jeoloji Muallimliği görevine başladıktan sonra Türkiye'de meydana gelen tüm depremlere yönelik arazi araştırmalarını başlatan ve sonuçlarını (o günün jeoloji anlayışına göre) yaptığı yayınlarla paylaşan Ordinaryüs Prof. Hamit Nafiz PAMİR bu sürecin yürütücüleri arasında yer almıştır.

İlk resmi deprem bölgeleri haritasında Türkiye coğrafyası deprem tehlikesi açısından, hazırlayıcılarının ifadesiyle “*birisi büyük hasara*

*uğramış bölgeler, diğeri tehlikeli yersarsıntısı ve tehlikesiz bölgeler olmak üzere başlıca üçe ayrılarak*” aşağıda belirtildiği şekilde bölgelendirilmiştir;

- Büyük Hasara Uğramış Yerler: Genel olarak geçmişte büyük kayıp ve zararların yaşanmasına yol açan depremlerin görüldüğü, dolayısıyla yüksek tehlikeli bölgeler.
- Tehlikeli Yersarsıntısı Bölgeleri: Sınırlı hasar yaşanan ve “Büyük Hasara Uğramış Yerlere” göre daha az hasarın gözleendiği bölgeler.
- Tehlikesiz Bölge: Hem hasar hem de jeolojik açıdan deprem tehlike verisi gözlenmeyen bölgeler

Yersarsıntısı Bölgeleri Haritası'nın yürürlükte kaldığı süre içinde arazi kullanım ve yapılaşma süreçlerinde yaygın bir şekilde kullanılıp kullanılmadığına dair bilgi ve belgeler yok denecek kadar azdır. Bunun bir nedeni yürürlük süresinin kısalığıdır. Çünkü bahse konu harita ancak iki buçuk yıl gibi kısa bir zaman aralığında yürürlükte kalmıştır. Diğer bir nedeni de bu konuda ilgili kamu kurumlarınca gerçekleştirilmiş olan iş ve işlemlere ait belgelerin çok büyük bir kısmının Devlet Arşiv Hizmetleri Hakkında Yönetmelik uyarınca imha edilmiş olmasıdır.

Arşivde ulaşılabilen az sayıdaki belgeler incelendiğinde söz konusu haritanın yürürlük dönemi içerisinde arazi kullanım ve yapılaşma süreçlerinde kullanımını etkileyebilecek iki temel mevzuatın olduğu saptanmıştır. Bunlar 1933 yılında yayımlanan “*Belediye Yapı ve Yollar Kanunu*” ile 1940 yılında yayınlanmış olan “*Zelzele Mıntıkaları Muvakkat Yapı Talimatnamesi*” dir. Özellikle günümüzün “bina deprem yönetmeliğine” karşılık gelen Yapı Talimatnamesinin içeriği itibarıyla yapılaşma süreçlerinde daha etkili olabileceği öngörülmektedir. Talimatname ile aşağıda sunulan “*Zelzele mıntıkaları, ruhsatiye ve cezai hükümler*” başlıklı birinci maddesi uyarınca ülkedeki özel ve kamu bina inşaatlarında 1940 yılında talimatnamenin ekinde yer alan “merbut

haritadaki (ilişik harita) (Bakınız Şekil 3)” bölgelemeye göre tasarım yapılması zorunluluğu getirilmiş ve bu hüküm altına alınmıştır.

“*Madde 1 - Merbut haritada gösterilen hudutlar içerisinde belediye teşkilatı mevcut olan nahiye, kaza ve vilayet merkezleri ile bu teşkilatın bulunmadığı mahallelerde ve köylerde yapılacak bilmum resmi ve gayri resmi inşaat, ilaveler ve zelzele dolayısıyla binalarda lüzumlu görülen tamirat işbu talimatname ahkâmına uygun bir suretle yapılacaktır*” (Zelzele Mıntıkları Muvakkat Yapı Talimatnamesi, Md 1)

Bu bilgiler ışığında tarafımızca yürütülen arşiv ve literatür taramasında elde edilen bilgiler bize 1940 tarihli talimatnamenin ekinde sunulan “merbut (ilişik bulunan) haritanın” 1945 tarihli harita yayınlanana kadar talimatname ile birlikte uygulandığını ve haritadaki bölgelemelerin esas alındığını göstermektedir. 1945 tarihli haritanın Bakanlar Kurulunca onaylanmasını müteakiben bu haritadaki bölgelemeler esas alınmaya başlanmıştır.

Bakanlar kurulunca onaylanarak 1945 yılında yürürlüğe girmiş olan haritanın birçok yerinde “Büyük Hasara Uğramış Bölgelerin” bitişiğinde, üzerindeki binalarda hasar gelişmemiş olmasından kaynaklı olarak, “Tehlikesiz Bölge” tanımlamasının yapıldığı görülmektedir. Benzeri nedenle “Büyük Hasara Uğramış Bölgeler” ile “Tehlikeli Yersarsıntısı Bölgeleri” arasında çizilen sınırlarda da çelişkili durumlar söz konusudur. Benzer bölgeleme yaklaşımı Bakanlar Kurulunun 20/12/1947 tarih ve 3/6739 sayılı Kararı ile kararlaştırılan ve 13/02/1948 tarih ve 6831 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren ikinci resmi deprem bölgeleri haritası olan haritada da benimsenmiştir. Bu çerçeveden bakınca 1945 Haritası, 1947 Haritasının altlığını oluşturmuştur. Yani ikinci resmi deprem bölgeleri haritası, 1945 haritası üzerinde bazı küçük değişiklikler yapılarak hazırlanmıştır. Her iki haritada esas itibarıyla “Birinci Derecede Tehlikeli”, “İkinci Derecede Tehlikeli” ve “Tehlikesiz” olmak üzere 3 dereceli bölgelemeyi esas almıştır.

1944 yılında yürürlüğe giren 4623 sayılı “*Yersarsıntısından Evvel Ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanunun*” 10’uncu maddesinde düzenlenen hüküm uyarınca yersarsıntısından etkilenen bölgelerdeki yerleşim birimlerinin yerlerinin değiştirilmesi ve yeni yerleşim yerlerinin belirlenmesi süreçlerinde görev alacak “mütehassıs fen heyetlerinde” “jeolog” bulundurulması zorunluluğu getirilmiştir. 1945 Haritasına ait vurgulanması gereken bir diğer boyutta, Türkiye’de arazi kullanım planlaması ve yapı üretim sürecindeki jeolojik hizmetler üzerindeki etkisidir. Erentöz vd., (1966)’nin Türkiye Jeoloji Bülteninde yayımlanan “*Ord. Prof. Hamit N. Pamir’in 50’nci Meslek Yılı Jubilesi*” başlıklı yazısında da belirtildiği üzere Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasının hazırlanması sürecinde jeolojik hizmetler ön plana geçmiştir. Bu yazıda kısaca “*Bu çalışmalar sonucu, deprem bölgeleri içinde bulunan iskân sahalarında yapılacak, büyük inşaatta, yapı ve civarının jeolojik etüdünün yapılması şartı konulmuş, mühendis-jeolog işbirliği başlamıştır*” vurgusu yapılmıştır (Erentöz vd., 1966).

Türkiye’nin ilk resmi Deprem Bölgeleri Haritasının yürürlükte olduğu dönemde arazi kullanım ve yapılaşma süreçlerinde kullanımı ve özellikle yapı üretim sürecine etkisi üzerine yeterli bilgiye ulaşılamamış olsa da Türkiye’nin ilk resmi deprem bölgeleri haritası olması nedeniyle tarihsel öneme sahiptir. Aynı zamanda Türkiye’de deprem zararlarının azaltılması yönünde yapılmaya çalışılan çalışmaların ilk adımlarından ve önemli kilometre taşlarından biri olması nedeniyle bu harita ve haritanın hazırlanışı sırasında yapılan çalışmalar oldukça önemlidir.

Türkiye’nin ilk resmi Deprem Bölgeleri Haritasının gerek hazırlanması gerekse uygulanmasına ilişkin birçok eksiklikten ve yetersizlikten bahsedilebilse de Harita hem o günün ülke koşullarına göre ileri bir mühendislik yaklaşımını hem de ulusal deprem risk yönetim sisteminin kuruluşunu ifade etmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti'nin depremlere mücadelesinde önemli adımlar atılmaya başlandığı 1940'lı yıllar, aynı zamanda 2. Dünya Savaşı gibi ülkenin ekonomik ve siyasal olarak en çok zorlandığı bir dönemdir. Savaşın getirdiği ekonomik ve siyasal sıkıntıların en yoğun bir şekilde yaşandığı, kaynakların ülke savunmasına harcandığı bir dönemde kamu yönetim kadrosu afet yönetiminde önemli değişimler yapmaktan, risk azaltmaya yönelik adımlar atmaktan kaçınmamış; savaşın neden olduğu tüm olumsuzluklara rağmen afet yönetiminde o günün koşullarına göre en ileri ve radikal kararları hayata geçirebilmiştir. 1945 yılında yayımlanan Türkiye'nin ilk resmi Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası da (Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası) böylesine zorlu koşulların bir ürünü olup bu gerçeklik bile tek başına haritanın afet yönetimi açısından değerini ortaya koymaya yeterlidir.

## SONUÇLAR

Türkiye'nin ilk resmi Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası) Bakanlar Kurulunun 12/07/1945 tarihli toplantısında almış olduğu 3/2854 sayılı karar ile yürürlüğe girmiş ve bu haritaya göre Türkiye, deprem tehlikesi açısından; “*Büyük Hasara Uğramış Yerler*” “*Tehlikeli Yersarsıntısı Bölgeleri*” ve “*Tehlikesiz Bölge*” olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Bu harita 2 yıl 5 ay 8 gün yürürlükte kalmıştır.

Türkiye'nin ilk resmi deprem bölgeleri haritası çok sınırlı verilere dayalı olarak hazırlanmış olup kullanılan verilerin ana unsurunu o güne kadar meydana gelen depremlere ilişkin gözlemler ve jeolojik araştırma sonuçları oluşturmuştur. Harita ağırlıklı o güne kadar meydana gelen depremler sonrası ortaya çıkan hasar tespit sonuçlarına dayandırılarak yapıldığından hazırlayıcıların ifadesiyle Türkiye'nin “*yersarsıntısı durumunu kesin ve tam bir sıhhatle gösterebileceği*” iddiasını taşımamaktadır. Ancak bu duruma karşın harita Türkiye'nin hem jeoloji ve deprem araştırmaları hem de deprem/afet yönetimi tarihinde özel bir öneme ve değere sahiptir.

1945 haritası aynı zamanda Bakanlar Kurulunun 20/12/1947 tarih ve 3/6739 sayılı Kararı ile kararlaştırılan ve 13/02/1948 tarih ve 6831 sayılı Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren ikinci resmi deprem bölgeleri haritası olan “*Tehlikeli Yersarsıntısına Maruz Bölgeler Haritası ve Yerleşim Listesi*”nin de altlığını oluşturmuştur. 1945 haritası üzerinde yapılan bazı revizyonlarla 1947 haritası hazırlanmış olup her iki haritada da esas olarak 3 dereceli bir bölgeleme esas alınmıştır.

Deprem bölgeleri haritaları, yerleşim alanı için yer seçiminde, imar planlarının hazırlanması ve değiştirilmesinde, depreme dayanıklı yapıların projelendirilmesi ve hesaplamalarında gereksinim duyulan verileri sağlamaya yönelik bilgiler vermesi bakımından deprem risklerinin azaltılması çalışmalarında önemli bir işlev üstlenmektedir. 1945 Haritası da yürürlük süresince ülkemizde yapılmış olan inşaatların haritadaki bölgeleme esasları ve bina deprem yönetmeliğinde belirtilen standartlara uygun olarak yapılmasına hizmet etmiştir.

1945 Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası aynı zamanda Türkiye deprem yönetim tarihinde bir dönüm noktasıdır. 4623 sayılı “*Yersarsıntısından Evvel Ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun*” ile birlikte Türkiye’de afet öncesi risk azaltma yaklaşımı ilk kez gündeme gelmiş ve bu yeni dönemin ilk risk azaltma araçlarından biri 1945 tarihli Türkiye Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası olmuştur. Böylece haritanın yayınlanmasıyla birlikte Türkiye’de deprem zarar ve kayıpların azaltılması için atılması gereken adımların deprem meydana gelmeden önce atılması gerektiği anlayışının, 80 yıl önce hayata geçirilmesi sağlanmıştır. 2. Dünya Savaşı gibi ülkenin ekonomik ve siyasal olarak en çok zorlandığı günlerde yaşanan bu gelişmeler ve bu gelişmelerin ürünü olan 1945 Haritası, ulusal deprem risk yönetim sisteminin o yıllarda kurulmaya çalışıldığının en önemli göstergelerinden birisidir.

Her ne kadar resmi sıfatını almasada 1940 yılında yayımlanan “*Zelzele Mintikaları Muvakkat*

*Yapı Talimatnamesinin*” ekinde sunulan “*Türkiye Zelzele Haritasının*” ve bu haritadaki bölgeleme esaslarının 12 Temmuz 1945 tarihli haritanın yürürlüğe girişine kadar uygulandığı bu çalışma ile ortaya çıkarılmıştır.

Haritayla ilgili deneyimi ve tarihsel süreci incelerken gördük ki, çok zorlu koşullarda ve kısıtlı imkânlarda üretilen harita ve yapı talimatnamesi Sırrı Sayarı'nın 1943 yılındaki gazete yazısında da belirttiği gibi kısmen kamu inşaatlarında uygulanabilmiştir. O günlerde yeni mevzuatın uygulanma süreçlerinin takibini ve denetimini yapacak, teknik sorumluluğunu üstlenecek yeterli kapasite ve imkânlara sahip ve sadece bu konuya odaklanmış bir kurumsal yapılanmanın olmaması süreci olumsuz bir şekilde etkilemiştir.

## EXTENDED SUMMARY

*Reducing earthquake risks and ensuring earthquake-safe construction and site selection are matters of vital importance for Türkiye, which is located in the Alpine-Himalayan seismic belt, one of the world's most active seismic zones. It is imperative to investigate the seismicity of the entire geography, not just in terms of settlement areas, to identify earthquake-prone regions, and to implement and develop the necessary administrative, technical, and legal measures to mitigate risk and damage. An important component of this requirement is the production of seismic zone maps and the establishment of building regulations based on these maps.*

*Türkiye's first official seismic hazard map, entitled “Seismic Hazard Map”, was published on July 12, 1945. Maps approved by the Council of Ministers and/or published in the Official Gazette are deemed “official”, and compliance with the principles of the seismic zones specified on the map becomes mandatory in building processes. Pursuant to the “Law on Measures to be Taken Before and After Earthquakes” which was implemented with publication in the Official Gazette dated July 22, 1944, this map was prepared*

*by a commission established by the Ministries of Public Works and National Education. The map divides Türkiye into three zones: areas that have suffered major damage, hazardous earthquake zones, and safe zones. Seismic zone maps and building earthquake regulations prepared in parallel with these maps play an important role in efforts to reduce earthquake risks.*

*Within the scope of this study, detailed information is provided on topics such as the need for the creation of the first official seismic zone map, how it was prepared and what data was used, and its importance in terms of the national disaster/earthquake management system. This information is supplemented and integrated with data from studies conducted in Türkiye since the 1940s about seismic zone maps and building regulations. Thus, the aim is to provide a better understanding of the importance and background of the 1945 Türkiye Seismic Zone Map in terms of disaster risk management and to shed light on Türkiye's history of earthquake mitigation.*

*In 1923, with the proclamation of the Republic in Türkiye, developments in the scientific and technical fields positively influenced earthquake research. One aspect of these studies, initiated particularly by foreign geologists, was the preparation of the “Seismic Zones Map.” Efforts to prepare seismic zone maps in Türkiye during the Republican era dates back to the 1930s. August Heinrich Sieberg (1875-1945) was a pioneer in this field. In addition to being recognised for his contributions to the 12<sup>0</sup> Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) macroseismic scale, Sieberg, who compiled a worldwide list of earthquakes, held an important position and enjoyed global recognition. He prepared Türkiye's first seismic zone map (Sieberg, 1932). In the years following the December 27, 1939 Erzincan earthquake, which resulted in a particularly high number of casualties and property damage, efforts to reduce earthquake risks in Türkiye gained momentum. Established in 1935, the General Directorate of MTA has conducted significant studies about*


earthquakes and the seismicity of the country, carried out by geologists employed within the institution. The results of these studies have been published in the form of reports and articles, thereby contributing to the scientific literature. In 1941, Calvi prepared a report containing a list of earthquakes that occurred in Türkiye and its surrounding areas, and added the "Türkiye Seismic Map" to the end of this report to indicate areas with high earthquake risk.

The 1945 Türkiye Seismic Zones Map also marks a turning point in the history of national earthquake management. Historically, both Law No. 4373 on Protection Against Floodwaters and Flooding and Law No. 4623 on Measures to be Taken Before and After Earthquakes brought the pre-disaster risk reduction approach to the forefront for the first time in Türkiye, and the construction of a disaster risk management system began. One of the first risk reduction tools in this new era was the 1945 Türkiye Seismic Zone Map. Thus, with the publication of the map, the understanding that steps to be taken to reduce earthquake damage and losses in Türkiye should be determined before an earthquake occurs – an understanding that is now defined as "resilience" and "earthquake risk management" – was implemented 80 years ago. These developments, which occurred during the most challenging economic and political times for the country including World War II, and the 1945 Map, which resulted from these developments, are also the most important indicators for the establishment of the national earthquake risk management system.

While examining the experience and historical process related to the map, the map and construction manual were produced under very difficult conditions and with limited resources. As Sırrı Sayarı stated in his 1943 newspaper article, they "not subject to any control or supervision," and the construction manual could be partially applied in public construction projects. At that time, the lack of an institutional structure with sufficient capacity and resources to monitor and supervise the implementation of the new legislation

and assume technical responsibility, and which was solely focused on this issue, had a negative impact on the process. We believe that there is still a need to combat this negative situation and the lessons that can be learned from this historical knowledge still have repercussions today. In order to prevent the events of the past from repeating, the duties, powers, and responsibilities for all implementation processes related to earthquake building regulations and earthquake maps must be combined under the umbrella of a single administration, and central and local government units must work more closely with each other.

## ORCID

Bülent Özmen  <https://orcid.org/0000-0002-7043-8329>

Bahattin Murat Demir  <https://orcid.org/0000-0002-4300-0444>

## KAYNAKLAR / REFERENCES

- 1940 Zelzele Mıntıkaları Muvakkat Yapı Talimatnamesi. (1940). İmar ve İskân Bakanlığı.
- 1945 Türkiye Yer Sarsıntıları Bölgeleri Haritası. (1945). Bayındırlık Bakanlığı.
- Atabay, M. (2023). Atatürk ve Deprem. *Tarih Araştırmaları Dergisi (TAD)*, 42(75), 3-22.
- Atnur, İ. E. (2006). *Reis-i Cumhuri' un Doğu İnclemeleri (1924 Erzurum Depremi)*, Ebabil Yayınevi.
- Aydın, N. ve Ergün, E. (2018). 1924 Erzurum Depremi ve Gazi Mustafa Kemal Paşa, *Tarih ve Günce Atatürk ve Türkiye Cumhuriyeti Tarih Dergisi*, 1(2), 145-168
- Bakanlar Kurulu Kararı (1996). *Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası*. B.K.K.: 18.04.1996 gün ve 96/8109 sayılı Karar.
- BCA (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Devlet Arşivleri Başkanlığı), (1945a). 1945 Bayındırlık Bakanlığının 11.06.1945 tarih ve 5898/6110 sayılı yazısı ile haritanın onaylanması için Başbakanlığa gönderilen yazı ile ilgili belge.
- BCA (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Devlet Arşivleri Başkanlığı). (1945b). Haritanın onaylandığına gösteren Bakanlar Kurulu kararı ile ilgili belge,

- BCA (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Devlet Arşivleri Başkanlığı). (1946a). Bayındırlık Bakanlığının 26.3.1946 tarih ve 3547/4014 sayılı yazısı ile ilgili belge.
- BCA (Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Devlet Arşivleri Başkanlığı). (1946b). Bakanlar Kurulunun 18.4.1946 gün ve 3/4058 sayılı kararı ile ilgili belge.
- Demir, B. M., Ercan, S., Aktan, M. ve Öztaşkın, H. (2025). Türkiye’de Afet Yönetiminin 100 Yılı: Mevzuat, Planlama, Kurumsal Yapılanma ve İşleyiş. *Afet ve Risk Dergisi*, 8(1), 127-147.
- Egeran, N. ve Lahn, E. (1944). 1/2.400.000 Mikyaslı Türkiye Yer Depremleri Haritası Hakkında Muhtıra. *M.T.A. Mecmuası*, 9(2/3), 270-289.
- Erentöz, C., Ketin, İ., Alagöz, C.A., Baykal, F., Erguvanlı, K. Ve Ternek, Z. (1966). Ord. Prof. H. Nafiz Pamir’ın 50nci Meslek Yılı Jübilesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 10(1-2), 1-30. <https://izlik.org/JA72XW57FZ>
- İlki, A. & Celep, Z. (2012). Earthquakes, Existing Buildings and Seismic Design Codes in Turkey. *Arab J Sci Eng*, 37, 365-380. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0183-8>
- Ketin, İ. (1948). Über die Tektonisch-Mechanischen Folgerungen aus den Grossen Anatolischen Erdbeben des Letzten Dezenniums, *Geologische Rundschau*, 36, 77-83. <https://doi.org/10.1007/BF01791916>
- Ketin, İ. (1949). Son on yılda Türkiyede vukua gelen büyük depremlerin tektonik ve mekanik neticeleri hakkında, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 2(1), 1-13. <https://izlik.org/JA74RE86LD>
- Okay, N. (2017). Türkiye’nin İlk Kadın Jeolog ve Deprem Uzmanı, *Mavi Gezegen Popüler Bilim Dergisi*, 23, 5-15.
- Özalp, S. (2025). Türkiye’de Diri Fay ve Paleosismoloji Çalışmaları: Dünü ve Bugünü, 27 Mart 2025, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Zoom toplantısı saat 20:30, 2025. Erişim adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=r7Tf6q-pXDY>
- Özkılıç, S. K. (2015). *1894 Depremi ve İstanbul*, Türkiye İş Bankası Yayınları.
- Özçep, F. (2018). Terrestrial Magnetism in The Ottoman Empire: Documents and Measurements. *Earth Sciences History*, 37(1), 1-24. <https://www.jstor.org/stable/26853559>
- Özmen, B. (2012). Türkiye Deprem Bölgeleri Haritalarının Tarihsel Gelişimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 55(1), 43-55. <https://izlik.org/JA99LC42JA>
- Pampal, S. ve Özmen, B. (2007). *Türkiye’nin Deprem Gerçeği Deprem Bölgeleri Haritaları ve Yönetmeliklerinin Tarihsel Gelişimi*. Ankara, 1028 s.
- Pınar, N. ve Lahn, E. (1952). Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı. *İmar Reisliği Yayınları*, 6(36), 153 s.
- Resmi Gazete, (1939, 30 Mayıs). *Nafia Vekâleti Teşkilât ve Vazifelerine Dair Kanun*.
- Resmi Gazete, (1944, 4 Nisan). *Yersarsıntısından Evvel Ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun (Y.E.S.A.T.H.K.)*.
- Resmi Gazete, (1948, 13 Şubat). *Tehlikeli Yersarsıntısına Maruz Bölgeler Haritası ve Yerleşim Listesi*.
- Resmi Gazete, (1963, 24 Nisan). *Yersarsıntısına Maruz Kalabilecek Bölgeler Haritası*.
- Resmi Gazete, (1972, 23 Aralık). *Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası ve Liste*.
- Resmi Gazete, (2018, 18 Mart). *Türkiye Deprem Tehlike Haritası*.
- Salomon-Calvi, W. (1941). Türkiye’nin Zelzele Haritasına dair birkaç söz (Rapor No: 1257). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (Yayımlanmamış).
- Salomon-Calvi, W. (1941). *Erdbeben Katalog der Türkei und Einiger Benachbarten Gebiete*. MTA Yayınları No. 1257, Ankara
- Sayarı, S. (1943). *Depreme karşı dayanıklı yapılar nasıl yapılır?*. 10 Temmuz 1943 Ulus Gazetesi sayfa 2.
- Sayarı, S., Pamir, H.N., Erkmen, K., Alpay, F. ve Onursal, F. (1945). *Yurdumuzun tehlikeli yersarsıntısı bölgelerini tayin için Milli Eğitim ve Bayındırlık Bakanlığı mütehasssis üyelerinin hazırladığı rapor* (yayımlanmamış).
- Sieberg, A. (1932). *Erdbebengeographie, Band IV, Lieferung 3*. Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Tinal, M. (2009). 1928 Torbalı (İzmir) Depremi. *Journal of Turkish Studies*, 4(8), 2229-2243.
- Vatan Gazetesi, 11 Ekim 1940 Nüshası, 1. Sayfa, 1940.



**Re-Assessment of Seismic Risk Associated with the Furthest East of the Düzce-Kaynaşlı Segment of the North Anatolian Fault (Türkiye) Utilising Data Derived From 12 November 1999 Earthquake in the Bolu Basin (NW Anatolia)**  
*Kuzey Anadolu Fayı Düzce-Kaynaşlı Segmentinin Doğusunda Sismik Riskin Yeniden Değerlendirilmesi; 12 Kasım 1999 Depreminde Bolu Havzasında (KB Anadolu) Gözlenen Etkiler*

**Yaşar Ergun Gökten\*** 

*Ankara University, Geological Engineering Department, Ankara, Türkiye (Retired)*

• Geliş/Received: 07.11.2025 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 15.01.2026 • Kabul/Accepted: 15.01.2026  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 15.04.2026 • Baskı/Printed: 30.04.2026

*Kısa Bildiri / Short Communication*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Abstract:** During the 17 August 1999 Marmara earthquake in Türkiye, the surface rupture became indistinct north of Aydınpinar village in the southeast of Düzce Basin at the eastern end of the rupture. The surface rupture of the 17 August 1999 earthquake propagated towards the west, but it also propagated towards the east reaching the southeast of Düzce Basin. Thus fault propagation after 17 August developed towards the east to cause the later Düzce-Kaynaşlı earthquake on 12 November 1999 where the surface rupture propagated reaching Asarsuyu valley in Kaynaşlı county. Although an İstanbul earthquake is expected in the near future, we aim to draw attention to the segment in the furthest east of this zone. In this area, increasing earthquake risk is indicated by the development of a series of tensional gashes in the north of the Bolu Basin and an M=4.8 earthquake that occurred in this region on 16 March 2023.

**Keywords:** 1999 earthquakes, Bolu Basin, North Anatolian Fault, seismic risk.

**Öz:** 17 Ağustos 1999 Marmara depreminde meydana gelen yüzey kırığının doğudaki ucu Düzce havzasının güneydoğusunda Aydınpinar köy yolunun kuzeyinde belirsiz hale gelmişti. 17 Ağustos Adapazarı-Gölcük depreminin yüzey kırığı batıya ilerlerken doğuya doğru Düzce ovasının güneydoğusuna kadar da ilerlemişti. Doğuya ilerleyen yüzey kırığı 12 Kasım 1999 da Düzce -Kaynaşlı depremine yol açmış ve yüzey kırığı Kaynaşlı ilçesini geçerek Asarsuyu vadisine kadar ilerlemişti. Her ne kadar yakın gelecekte bir İstanbul depremi beklenmekteyse de yer bilimcilerin dikkatini bu yüzey kırığının daha doğusunda artan deprem tehlikesine çekmek istemekteyiz. Bu tehlike söz konusu deprem sırasında Bolu havzasının kuzeydoğusunda beliren bir seri tansiyon çatlağı ile ve 16.03.2023 tarihinde bu noktada meydana gelen M=4.8 depremi ile kendini belirtmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 1999 depremleri, Bolu Havzası, Kuzey Anadolu Fayı, sismik risk.

## INTRODUCTION

The broadly northwards-convex North Anatolian Fault System (NAFS) extends for approximately 1100 km from Karlıova in eastern Türkiye to Saros Bay and beyond in the west (Figure 1; Gökten

et al. 2011). Following the pioneering work of Ketin (1948), who first recognised its strike-slip character, this lineament is now recognised as one of the most important seismically-active structures in this region and has been the object of numerous

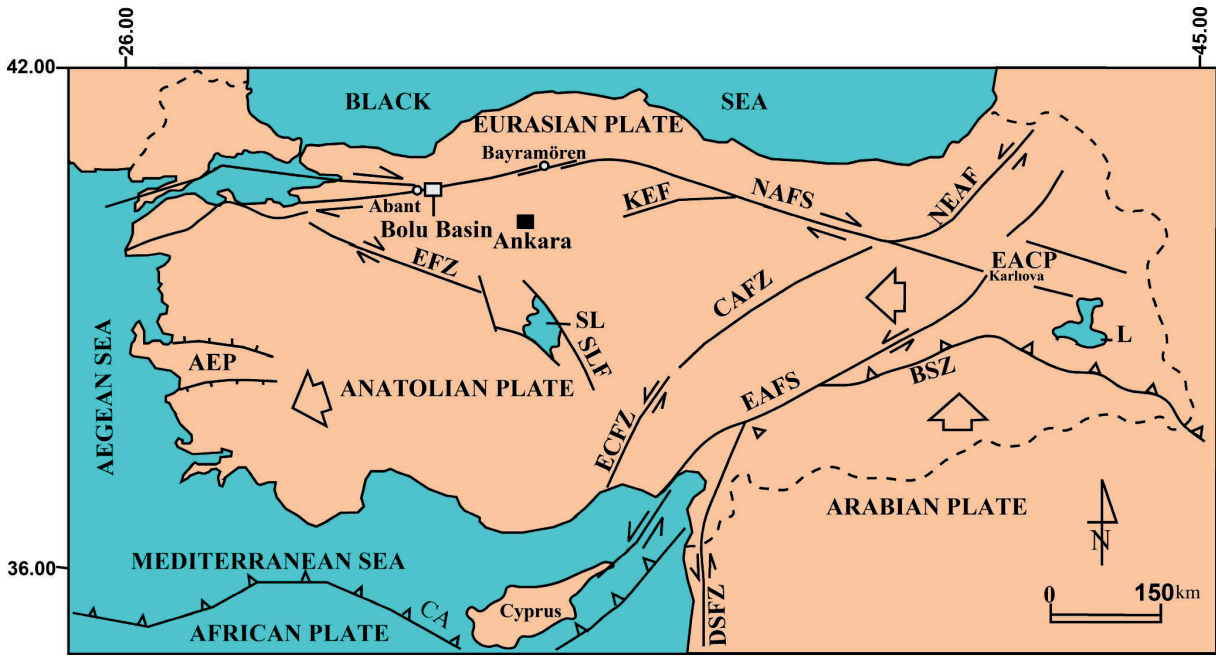
\* Correspondence/Yazışma: gokten@eng.ankara.edu.tr

publications (e.g., Ketin, 1948, 1969; Tokay, 1973; Şengör, 1979; Şaroğlu, 1988; Barka, 1996; Emre et al. 1999, 2000, 2003; Demirtaş, 2000; Gökten et al., 2000, 2011; Çemen et al., 2000; Akyüz et al. 2002; Barka et al. 2002; Koçyiğit, 2003; Çakır et al. 2003; Hitchcock et al. 2003; Şengör et al., 2004; Herece, 2005; Özden et al., 2008; and the references there in).

There is broad consensus that the NAFS has been active since the Late Pliocene (Koçyiğit, 2003; Şengör et al., 2004; Gökten et al., 2011; and others), facilitating the westward movement of the Anatolian Block along the right-lateral strike-slip North Anatolian Fault and the conjugate left-lateral strike-slip East Anatolian Fault. These movements can ultimately be attributed to the crustal-scale

compressive forces associated with northwards movement of the Arabian Plate, in classic Prandtl triangle style.

One consequence of this geodynamic situation is that over the past century many earthquakes have occurred and been recorded along the ca. 1100 km length of the NAFS, from Erzinçan in the east (1939) to the Marmara region in the west (1999). Along this segmented fault zone, earthquakes with magnitudes of seven or more appear to have migrated from east to west in the 1939 to 1999 time-interval. This is due to the stress within each segment loading onto the westward-adjacent segment, with the exception of the 1912 Tekirdağ and 1992 Erzinçan earthquakes.



**Figure 1.** The principal neotectonic structures of Türkiye: AEP: Aegean extensional province, BSZ: Bitlis Suture Zone, CA: Cyprus Arc, CAFZ: Central Anatolian Fault Zone, DEFZ: Dead Sea Fault Zone, EACP: East Anatolian contractional Province, EAFZ: East Anatolian Fault Zone, ECFZ: Ecemiş Fault Zone, EFZ: Eskişehir Fault Zone, KEF: Kırıkkale-Erbaa Fault, LV: Lake Van, NAFS: North Anatolian Fault System, NEAFZ: Northeast Anatolian Fault Zone, SL: Salt Lake, SLF: Salt Lake Fault (from Gökten et al. 2011).

**Şekil 1.** Türkiye'nin başlıca neotektonik yapıları: AEP: Ege genişleme bölgesi, BSZ: Bitlis Sütür Zonu, CA: Kıbrıs Yayı, CAFZ: Orta Anadolu Fay Zonu, DEFZ: Ölü Deniz Fay Zonu, EACP: Doğu Anadolu sıkışma bölgesi, EAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, ECFZ: Ecemiş Fay Zonu, EFZ: Eskişehir Fay Zonu, KEF: Kırıkkale-Erbaa Fayı, LV: Van Gölü, NAFS: Kuzey Anadolu Fay Sistemi, NEAFZ: Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu, SL: Tuz Gölü, SLF: Tuz Gölü Fayı (Gökten vd. 2011'den).

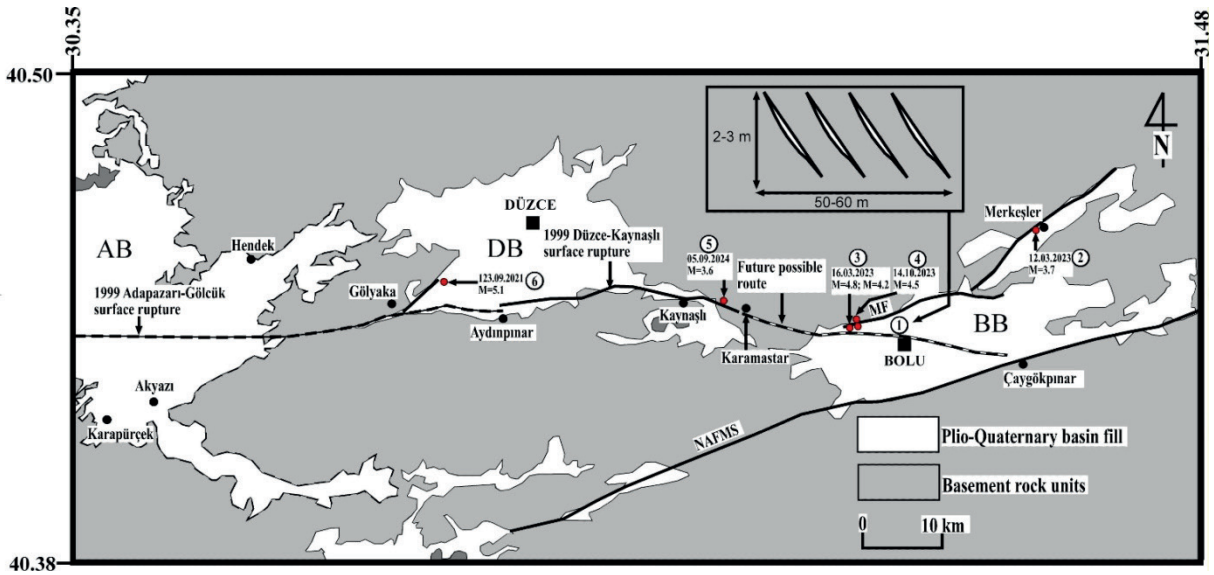
During the Adapazarı-Gölcük earthquake (17 August 1999:  $M=7.4$ ), a surface rupture developed in the southern part of Düzce Basin, starting from the area east of Gölyaka (near Aydınpınar village: Fig. 2) and traceable into the southern part of the Marmara Sea, offshore of Yalova and Çınarcık (Gökten et al., 2000). On 12 November, 1999, a further tremor ( $M=7.2$ ) propagated the existing surface rupture affecting the southern margin of the Düzce Basin (the Adapazarı-Gölcük segment) toward the east. This propagation began from the north of Aydınpınar village as far as the Asarsuyu valley, north of Kaynaşlı, where the fracture became indistinct (Figure 2) (Emre et al. 1999; Akyüz et al. 2002; Gökten et al., 2011).

#### Further Fault Propagation Towards the East:

During the 12 November earthquake, an east-west trending strained zone developed in the northwest

sector of the Bolu Basin (Figure 2 Loc. 1), east of the Asarsuyu valley. The arrays of tensional cracks (gashes) observed in this zone are typical of Reidel fractures created in this type of high-strain field. This strain occurs in the western sector of Bolu Basin, around 100 m north of the D 100 state highway. The zone is about 50-60 m long, with individual tension-gashes that range in length from 2-3 m with widths of a few cm (Figure 2; inset).

The observed E-W trend of the surface rupture associated with the 12 November 1999 Düzce-Kaynaşlı earthquake suggests that it may continue to the east along the northern margin of Bolu Basin in an east-west direction, utilising a zone of weakness that controls the northern boundary of that basin (Figure 2: MF). Most previous studies agree that the main strand of the North Anatolian Fault zone forms the southern boundary of the Bolu Basin (Öztürk, 1968, Tokay, 1973; Demirtaş, 2000,



**Figure 2.** 1999 Düzce-Kaynaşlı earthquake surface rupture and the course of the North Anatolian Master Fault (NAFMS). AB: Adapazarı Basin; BB: Bolu Basin; DB: Düzce Basin; MF: Musluklar Fault (Northern Boundary Fault). NAFMS: North Anatolian Fault Master Strand. Inset: The array of tensional cracks at Loc. 1; Numbers 1 to 6: Earthquakes; red circles: epicentre locations.

Şekil 2. 1999 Düzce-Kaynaşlı depreminin yüzey kırığı ve Kuzey Anadolu Ana Fayı üzerindeki depremler. AB: Adapazarı Havzası, BB: Bolu Havzası, DB: Düzce Havzası, MF: Musluklar Fayı (Kuzey Sınır Fayı), NAFMS: Kuzey Anadolu Ana Fay Hattı. Küçük dikdörtgen içindeki şekil: Gerilme çatlaklarının yeri; 1'den 6'ya rakamlar: Depremler; Kırmızı Daireler: Deprem dış merkezlerinin yeri.

Gökten et al. 2011, and others). However, it was also suggested (e.g., Hitchcock et al., 2003) that the Düzce splay of the NAFS enters the Bolu Basin from the west, in the vicinity of Karamastar, and may continue eastwards through the central part of the basin before rejoining the main southern strand of the NAFZ near Çaygökpınar (Figure 2). The existence and behaviour of the Musluklar Fault (and parallel minor fractures) forming the northern boundary of the basin and the strain-zone that developed during the 12 November earthquake all support the pull-apart character of the Bolu Basin, as previously determined by Gökten et al. (2011). However Gürbüz and Güner (2009) claimed that during the extinction period of pull-apart basins the faults causing the pull-apart development migrate from the edges of the basin toward the centre, as is likely seen in the Bolu Basin.

## CONCLUSION

In brief, the segment of the North Anatolian Fault traceable from the Düzce-Kaynaşlı surface rupture in the northern sector of the Bolu Basin poses an earthquake risk comparable to that predicted for the central Marmara or İstanbul region. The concentration of stress manifested by the strain-zone documented in the north-central sector of the Bolu Basin may ultimately be transferred to the main fault that forms the southern boundary of the basin. In general, strike-slip faults exhibit an initial concentration of stress near both ends of the structure and this stress then propagates along the fracture. An example of this was seen during the 1995 Kobe earthquake in Japan (Bolt, 2004). This is why, following the 17 August 1999 Adapazarı-Gölcük earthquake, the eastern tip of the surface rupture of the segment, which ended in the area north of Aydınpınar village (southeastern sector of Düzce Basin: Figure 2) at that point, propagated further east during the later (12 November 1999) Düzce-Kaynaşlı earthquake. This situation

implies that the region to the east of this point is now a critical part of the North Anatolian Fault Zone in terms of potential earthquake risk. This conclusion is confirmed by the recent development of a localised strain-zone in the northwest sector of the Bolu Basin, as described above. A recent earthquake with magnitude 5.1 affected the region on 23rd of September 2021 and the epicentre was localized on the bifurcated eastern end of the Adapazarı-Gölcük segment (Loc. 6 in Figure 2). There were later earthquakes on the 16th March 2023 and 14th October 2023 in the northwest of Bolu Basin (Locs. 3 and 4 in Figure 2), in addition to some other events in the region with magnitudes between 3.5 and 4.1. A very recent event had an epicentre localized on the western end of the surface rupture of the 12 November 1999 earthquake (Loc. 5 in Figure 2). The identified strain-zone and recent earthquake activity contribute to the conclusion that there is increased earthquake risk in this area.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to Prof. Gilbert Kelling (emeritus, Keele Univ. U.K.; died 2024) for his constructive comments and help in correcting the English of the text. The author also offers his thanks to the reviewers of this paper for their valuable critiques and contributions.

## ORCID

Yaşar Ergun Gökten  <https://orcid.org/0000-0002-2119-1593>

## REFERENCES

- Akyüz, H. S., Hartleb, R., Barka, A. A., Altunel & E. Sunal, G. (2002). Surface rupture and slip distribution of the 12 November 1999 Düzce earthquake (M 7.1), North Anatolian Fault, Bolu, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 61-66. <https://doi.org/10.1785/0120000840>

- Barka, A. (1996). Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with the large earthquakes of the period 1939-1967. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5), 1238-1254. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860051238>
- Barka, A.A., Akyüz, H.S., Altunel, E., Sunal, G., Çakır, Z. ... & Page, W. (2002). The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 İzmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 43-60. <https://doi.org/10.1785/0120000841>
- Bolt, B.A. (2004). *Earthquakes – Depremler* (Çev: Ü. Tansel, 2008). W.H. Freeman and Company, New York. Tübitak Popüler Bilim Kitapları, 273, 485 s.
- Çakır, Z., Barka, A. A., De Chabaliere, J. B., Armijo, R. & Meyer, B. (2003). Kinematics of the November 12, 1999 (Mw=7.2) Düzce earthquake deduced from SAR interferometry. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12(1), 105-118.
- Çemen İ. Gökten E. Varol B. Kılıç R. Özaksoy V. Erkmén C. & Pınar A. (2000). Turkish earthquakes reveal dynamics of fracturing along a major strike-slip fault zone. *EOS*, 81(28), 309-313. <https://doi.org/10.1029/00EO00233>
- Demirtaş, R. (2000). *Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Abant-Gerede arasında kalan bölümünün neotektonik özellikleri ve paleosismisitesi (Paleoseismicity and neotectonics of the Abant-Gerede region of the North Anatolian Fault Zone)*. Doktora Tezi (PhD Thesis), Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 191 p.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Doğan, A., Ateş, Ş. & Keçer, M. (1999). 12 Kasım Düzce depremi saha gözlemleri ve ön değerlendirme raporu. M.T.A. Gen. Müd. Jeol. Et. Dairesi, 16 Kasım Ankara, 27 p.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Awata, Y., Dogan, A., & Özalp, S. (2000). Surface rupture of November 12 1999 Düzce earthquake, NW Turkey. *XXVII General Assembly of the European Seismological Commission (ESC-2000)*. *Book of abstract and papers*, (p.: 247-252), 10-15 September 2000, Lisbon, Portugal.
- Emre, Ö., Awata, Y. & Duman, T. Y. (Eds). (2003). 17 Ağustos 1999 İzmit depremi yüzey kırığı (surface rupture of the 17 August 1999 İzmit earthquake). *Spec. Publ. of the Gen. Direc. Min. Res. Explor.*, 280 p.
- Gökten, E., Çemen, İ., Varol, B., Pınar, A. & Özaksoy, V. (2000). The 17 August 1999 Gölcük (Kocaeli)-Arifiye (Adapazarı) and 12 November 1999 Düzce earthquakes, NW Turkey; Their mechanisms and tectonic significance. In N. Görür, G. A. Papadopoulos & N. Okay (Eds.), *Integration of Earth Science Research on the Turkish and Greek 1999 Earthquakes*, NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 9. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0383-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0383-4_1)
- Gökten, E., Demirtaş, R., Özaksoy, V., Herece, E., Temiz U. & Varol, B. (2011). Faulting, Stress Distribution in the Bolu Pull-Apart Basin (North Anatolian Fault Zone, Turkey): The significance of new dates obtained from the basin fill. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20(1), 1-26. <https://doi.org/10.3906/yer-0803-6>
- Gürbüz, A. & Gürer, Ö. F. (2009). Middle Pleistocene extinction process of pull-apart basins along the North Anatolian Fault Zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(1-2), 177-180. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.10.021>
- Herece, İ.E. (2005). *Kuzey Anadolu Fay Zonu batı kesiminin neotektonik özellikleri (Neotectonic features of the western part of the North Anatolian Fault Zone)* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 228 p.
- Hitchcock, C., Altunel, E., Barka, A. I., Bachhuber, J., Lettis, W., Kozacı, Ö., Helms, J. & Lindvall, S. (2003). Timing of Late Holocene earthquakes on the eastern Düzce Fault and implications for slip transfer between the southern and northern strands of the North Anatolian Fault System, Bolu, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 12(1), 119-136.
- Ketin, İ. (1948). Über die tectonische-mechanischen folgerungen aus den grosse Anatolischen Erdbeben des letzten dezzenniums. *Geologische Rundschau*, 36, 77-83. <https://doi.org/10.1007/BF01791916>
- Ketin, İ. (1969). Kuzey Anadolu Fayı hakkında (About the North Anatolian Fault). *Maden Tetkik Arama Enstitüsü Yayını*, 72, 1-27. <https://izlik.org/JA77KA26JK>
- Koçyiğit, A. (2003). *The Gerede-Kaynaşlı Fault Zones of the North Anatolian Fault System (NAFS)*,

- Turkey- A Post International workshop excursion guidebook*. Middle East Tech. Univ. (METU), Ankara, Turkey, 27 p.
- Özden, S., Över, S., Kavak, K. Ş. & İnal, Ş. S. (2008). Late Cenozoic stress state around the Bolu basin along North Anatolian Fault, NW Turkey. *Journal of Geodynamics*, 46(1-2), 48-62. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2008.04.004>
- Öztürk, A. (1968). *Çerkeş-Eskipazar-Gerede Bölgesinin Jeolojisi (The Geology of the Çerkeş-Eskipazar-Gerede Region)* [Unpublished PhD Thesis]. Ankara University.
- Şaroğlu, F. (1988). Age and offset of the North Anatolian Fault. *METU J. App. Sci.*, 21, 65-79.
- Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal Geological Society London*, 136, 269-282. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0269>
- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakınç, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X. & Rangin, C. (2004). The North Anatolian Fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 1-75. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120415>
- Tokay, M. 1973. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Gerede ile Ilgaz arasındaki kesiminde jeolojik gözlemler. (Geological observations on the North Anatolian Fault in the part between Gerede and Ilgaz). Kuzey Anadolu Fayı ve Deprem Kuşağı Sempozyumu, *Maden Tetkik Arama Enstitüsü Yayını*, 12-29. Ankara.



## TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ

### AMAÇ ve KAPSAM

Türkiye Jeoloji Bülteni (*Türkiye Jeol. Bül.*) 1947 yılından beri yayınlanan, Türkiye'nin en eski ve en çok tanınan dergilerinden biridir. Jeoloji Mühendisleri Odası (JMO) tarafından yılda üç sayı olarak yayınlanmaktadır. Dergi mühendislik jeolojisi dışındaki yerbilimleri konularında yayın kabul etmektedir. Bilhassa jeoloji, tektonik, yapısal jeoloji, jeokronoloji, jeokimya, sedimantoloji, biyostratigrafi, paleontoloji, mineraloji, magmatik ve metamorfik petroloji, maden yatakları, jeofizik, jeomorfoloji yanı sıra Çevre ve Kent Jeolojisi ile Ekonomik Jeoloji öncelikli konulardır. Bu konularda güncel bilim düzeyinde hem Türkçe hem de İngilizce dillerinde yayın kabul edilmektedir. Yayınlarda öncelik Türkiye ve çevresi, Doğu Akdeniz, Orta Doğu, Balkanlar, Karadeniz ve Hazar Denizi çevresi olmakla birlikte Dünya'nın diğer tüm kritik bölgelerinde yapılan düzeyli yayınlara da açıktır. Bu kapsamda yapılan araştırmaların bilimsel düzeyi yüksek sonuçlarını içeren makaleler hiçbir ücret almadan yayınlanmaktadır. Açık erişimli bir dergidir. Derginin hedef okuyucu kitlesi bu konu ve kapsamla ilgili tüm yerbilimcilerdir. Dergide daha çok orijinal araştırma makaleleri ve daha az sayıda derleme ve diğer bilimsel nitelikli yayınlara yer verilmektedir. Türkiye Jeoloji Kongresi ve diğer Ulusal ve uluslararası toplantıların seçilen oturumları, hakemli yayın işlemlerinden sonra özel sayı(lar)da yayınlanabilmektedir.

### YAZILARIN HAZIRLANMASI

TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ'nin yayın dili Türkçe ve İngilizcedir. Türkçe makalelerde "Extended Summary", İngilizce makalelerde ise "Genişletilmiş Özet" verilmelidir. Yazarların ana dillerinin Türkçe olmaması durumunda, yazıların başlığı ve özeti ile çizelge ve şekillerin başlıkları Editörlükçe Türkçeye çevrilir. Ana dili İngilizce olmayan yazarlara, yazılarını Editörlüğe göndermeden önce, gramer ve üslup açısından, ana dili İngilizce olan bir kişiden katkı almaları özellikle önerilir. Hazırlanan makaleler orijinal ve daha önce basılmamış araştırma, yorum ya da her ikisine ait sentezi içermeli, veya teknik not niteliğinde olmalıdır. Yazının gönderilmesi, daha önce basılmamış veya başka bir yerde incelemede olmadığını gösterir.

### MAKALE SUNUM SÜRECİ ve ETİK BİLDİRİMİ

Tüm makaleler internet üzerinden <http://dergipark.gov.tr/tjb> adresindeki "Makale Gönder" menüsü aracılığıyla Türkiye Jeoloji Bülteni'ne elektronik ortamda gönderilmelidir. Bunun için önce DergiPark sistemine üye olmalısınız. Türkiye Jeoloji Bülteni yazarlardan sayfa ücreti talep etmemektedir. Dergiye sunulan makaleler, daha önce yayınlanmadığı ve başka yerde yayınlanmak üzere gönderilmediği varsayılarak değerlendirme için kabul edilir. Yazarlar, makalenin ana içeriğinin daha önce yayınlanmadığını ve başka bir dergide yayınlanmak üzere gönderilmediğini onaylamalıdır. <http://dergipark.gov.tr/tjb> veya [www.jmo.org.tr](http://www.jmo.org.tr) adresinde bulunan telif hakkı devir formu, tüm yazarlar adına ilgili yazar tarafından imzalanmalı ve makale dosyalarıyla birlikte gönderilmelidir. Bir makale sunulduktan sonra, başka yazar eklenmesi veya çıkarılması veya yazarların değiştirilmesi mümkün değildir. Makaleler, yazım kurallarına uymuyorsa ya da dergi kapsamı dışındaysa, dergi editörü tarafından hakem değerlendirmesi yapılmaksızın reddedilebilir. Bir makale yayın için kabul edildikten sonra, diğer bir deyişle, hakem tarafından önerilen düzeltmeler tamamlandıktan ve editör tarafından kabul edildikten sonra, yazara makalede değişiklik yapma izni verilmez. Makale yayınlanmadan önce, yazarlara düzeltmeler için prova baskı gönderilir. Başkasının fikir veya sözcüklerinin orijinal biçiminde kullanılması veya uygun bir atıf yapılmaksızın değiştirilmesi, intihal olarak kabul edilir ve tolere edilemez.

## YAZIM KURALLARI

### Yazılar aşağıda verilen düzen çerçevesinde hazırlanmalıdır:

- (a) Başlık (Türkçe ve İngilizce)
- (b) Yazar Adları (koyu ve baş harfleri büyük harfle) ve adresleri (italik ve küçük harfle) ile başvurulacak yazarın e-posta adresi
- (c) Öz (Türkçe ve İngilizce)
- (d) Anahtar Kelimeler (Türkçe ve İngilizce)
- (e) Giriş (amaç, kapsam ve yöntem)
- (f) Ana metin (kullanılan yöntemler, çalışılan malzemeler, tanımlamalar, analizler vd)
- (g) Tartışma ve Sonuçlar veya Tartışma Önerileri
- (h) Extended Summary / Genişletilmiş Özet
- (i) Katkı Belirtme
- (j) Kaynaklar
- (k) Çizelgeler
- (l) Şekiller Dizini
- (m) Şekiller
- (n) Levhalar (var ise)

Metinde kullanılan değişik türde başlıklar farklı şekillerde ve tüm başlıklar sayfanın sol kenarında verilmelidir. Ana başlıklar büyük harflerle ve koyu yazılmalıdır. İkinci derece başlıklar alt başlık olarak değerlendirilmeli ve birinci ve ikinci derece alt başlıklar küçük harfle (birinci derece alt başlıklarda her kelimenin ilk harfi büyük) ve koyu, üçüncü derece alt başlıklar ise italik olmalıdır. Başlıkların önüne numara veya harf konulmamalıdır. Yazılar (öz, metin, katkı belirtme, kaynaklar, ekler ve şekiller dizini) A4 (29.7 cmX21 cm) boyutundaki sayfaların bir yüzüne, kenarlardan en az 2,5 cm boşluk bırakılarak, 1,5 cm aralıkla ve 12 puntuyla (Times New Roman) yazılmalı, ayrıca tüm sayfalara numara verilmelidir.

### **Başlıklar şu şekilde olmalıdır:**

**ÖZ**

**ABSTRACT**

**GİRİŞ**

**ANA BAŞLIK**

**Birinci Derece Alt Başlık**

**İkinci derece alt başlık**

**Üçüncü derece alt başlık**

**SONUÇLAR VE TARTIŞMA**

**EXTENDED SUMMARY**

**KATKI BELİRTME**

**ORCID**

**KAYNAKLAR / REFERENCES**

### **Kapak Sayfası**

Yazıdan ayrı olarak sunulacak kapak sayfasında aşağıdaki bilgiler yer almalıdır:

- a. Yazının başlığı
- b. Yazar(lar)ın ad(lar)ı (ad ve soyadı kısaltılmadan)
- c. Tüm yazarların açık posta ve e-mail adresleri (Başvurulacak Yazar belirtilerek). Başvurulacak yazarın telefon numarası da ayrıca belirtilmelidir.

## **Başlık ve Yazarlar**

Yazının başlığı, çalışmanın içeriğini anlaşılır şekilde yansıtmalıdır. Eğer yazı Türkçe hazırlanmışsa, Türkçe başlığı (koyu ve kelimelerin ilk harfleri büyük harf olacak şekilde) İngilizce başlık (italik ve kelimelerin ilk harfleri büyük olacak şekilde) izlemelidir. İngilizce hazırlanmış yazılarda ise, İngilizce başlık Türkçe başlıktan önce ve yukarıda belirtilen yazım kurallarına göre verilmelidir. Makaledeki yazarlar orcid.org web adresinden edinecekleri ORCID kimliklerini makale ile birlikte sunmalıdır.

### **Yazarlara ilişkin bilgi ise aşağıdaki örneklere uygun olarak verilmelidir.**

Ahmet Ahmetoğlu

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği  
Bölümü, Tandoğan 06100 Ankara  
e-posta: a\_ahmetoğlu@ankara.edu.tr  
ORCID Numarası: 0000-0001-1458-0820

A. Hüsnü Hüsnüoğlu

MTA Genel Müdürlüğü, Jeolojik Etütler Dairesi, 06520 Ankara  
e-posta: husnu56@mta.gov.tr  
ORCID Numarası: 0000-0001-1458-0830

## **ÖZ**

Çalışma hakkında bilgi verici bir içerikle (çalışmanın amacı, elde edilen başlıca sonuçlar) ve 300 kelimeyi aşmayacak şekilde hazırlanmalıdır. Özde kaynaklara atıfta bulunulmamalıdır. Özler hem Türkçe hem de İngilizce olarak verilmelidir. Türkçe hazırlanmış yazılarda Özden sonra “Abstract” (İtalik) yer almalı, İngilizce yazılarda ise italik yazılmış Türkçe Öz Abstract’ı izlemelidir.

## **Anahtar Kelimeler**

Öz ve Abstract’ın altında en az 2-7 kelimeyi aşmayacak şekilde ve yazının konusunu yansıtan anahtar kelimeler Türkçe ve İngilizce olarak verilmelidir. Anahtar kelimeler, alfabetik sırayla küçük harfle (ilk anahtar kelimenin ilk harfi büyük) yazılmalı ve aralarına virgül konmalıdır. Teknik Not ve Tartışma türü yazılarda anahtar kelimelerin verilmesine gerek yoktur.

## **EXTENDED SUMMARY/GENİŞLETİLMİŞ ÖZET**

Genişletilmiş özet 2500 kelimeyi geçmemelidir. Ancak makalenin öz/abstract kısmından daha geniş hacimli olmalıdır. Genişletilmiş özet kısmında yeni bir şekil ve çizelge verilmemelidir. Ancak makalede kullanılan şekil ve çizelgelere bu kısımda atıf yapılabilir. Aynı şekilde, makale içinde atıf yapılan kaynaklara da gerektiğinde bu kısımda atıf yapılmalıdır.

## **KATKI BELİRTME**

Katkı belirtme, kısa olmalı ve teşekkür edilecek olanlar çalışmaya en önemli katkıyı sağlayan kişilerin ve/veya kuruluşların adlarıyla sınırlandırılmalıdır. Teşekkür edilecek kişilerin açık adları unvanları belirtilmeksizin verilmeli, ayrıca bu kişilerin görevli oldukları kurum ve kuruluşların adları da eklenmelidir.

## **DEĞİNİLECEK BELGELER**

### **Metin İçinde Atıfların Yazılması**

#### **A. Yayında tek yazar varsa**

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

(Yazar1, Tarih) **Ör:** (Sönmez, 1996)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

Yazar1 (Tarih) **Ör:** Sönmez (1996)

**B. Yayımda 2 yazar varsa**

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

(Yazar1 ve Yazar2, Tarih) Ör: (Merriman ve Frey, 1999)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

Yazar1 ve Yazar2 (Tarih) Ör: Merriman ve Frey (1999)

**C. Yayımda 2'den fazla yazar varsa**

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

(Yazar1 vd., 1987) Ör: (Pettijohn vd., 1987)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

Yazar1 vd. (1987) Ör: Pettijohn vd. (1987)

**D. Arka arkaya birden fazla atıfta bulunulacaksa**

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

(Merriman ve Frey, 1999; Pettijohn vd., 1987; Sönmez, 1996)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

Merriman ve Frey (1999), Pettijohn vd. (1987), Sönmez (1996)

**E. Aynı yazarların aynı yıl içinde birden fazla yayınına atıfta bulunulduysa**

Bu durumda Kaynaklar **bölümünde** makalelerin tarihlerinden sonra a, b, c gibi harfler verilir, metin içindeki atıflarda da tarihlerden sonraki harfler kullanılır.

Kaynakçada:

Ahmetoğlu, A. ve Hüsnuoğlu, H. (2022a). Makale Adı 1. *Sürelî yayının/derginin adı (kısaltılmamış)*, Cilt No(Sayı No), sayfa numaraları. Varsa DOI bilgisi

Ahmetoğlu, A. ve Hüsnuoğlu, H. (2022b). Makale Adı 2. *Sürelî yayının/derginin adı (kısaltılmamış)*, Cilt No(Sayı No), sayfa numaraları. Varsa DOI bilgisi

Metin içindeki atıflarda:

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa: (Ahmetoğlu ve Hüsnuoğlu, 2022a)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa: Ahmetoğlu ve Hüsnuoğlu (2022a)

**Kaynaklar Bölümü**

**Aşağıdaki örnekler ile kesinlikle uyumlu olmalıdır**

- TJB'de Türkçe yayınlanacak makalelerde: Kaynak çok isimli bir çalışma ise: Son isimden önce "ve" gelmelidir eğer kaynak İngilizce ise "&" kullanılmalıdır.
- Editörün belirtilmesi gereken çalışmalarda: Tek isim ise (Ed.) çoklu editör ise: Son isimden sonra (Ed. ler) eğer kaynak İngilizce ise (Eds.) yazılmalıdır.

**A. Sürelî yayınlar:**

**A.1. Sürelî yayınların gösterilmesi:**

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Makalenin başlığı. *Sürelî yayının/derginin adı (kısaltılmamış)*, Cilt No (Sayı No), sayfa numaraları. Varsa DOI bilgisi

Hoek, E. & David, M. (1990). Estimating Mohr – Coulomb friction and cohesion values from Hoek – Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics*, 27 (3), 220-229. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)94333-O](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)94333-O)

## A.2. Özel durumlar:

### *A.2.1. Eğer makale serbest erişimli bir internet sayfasından alındıysa:*

Ketin, İ. (1949). Son on yılda Türkiye’de vukua gelen büyük depremlerin tektonik ve mekanik neticeleri hakkında. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 2(1), 1-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/issue/50279/650044>

### *A.2.2. Eğer makalenin makale numarası varsa:*

Açlan, M., Oyan, V. & Köse, O. (2020). Petrogenesis and the evolution of Pliocene Timar basalts in the east of Lake Van, Eastern Anatolia, Turkey: A consequence of the partial melting of a metasomatized spinel-rich lithospheric mantle source. *Journal of African Earth Sciences*, 168, Article 103844. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103844>.

## **B. Bildiriler:**

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Bildirinin başlığı. Editör(ler), *Sempozyum veya Kongrenin Adı*, (bildirinin sayfa aralığı). Yayınevi. Varsa DOI bilgisi veya internet erişim bilgisi

Şanlıyüksel Yücel, D., İleri, B. (2019). Characterization of weak, stratified and clay bearing rock masses. H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, B. Uzel, Ö. Sümer, M. Softa, Ç. Tepe, S. Eski (Ed.ler), 72. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri ve Tam Metin Bildiriler Kitabı*, (s.63-64). Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893_ek.pdf)

## **C. Kitaplar:**

### C.1. Kitapların gösterilmesi:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). *Kitabın Adı* (ilk harfleri Büyük). Yayınevi. Varsa DOI bilgisi veya internet erişim bilgisi  
Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R. (1987). *Sand and Sandstones* (2nd ed.). Springer-Verlag New York. <https://www.doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>

Ketin, İ. (2016). *Genel Jeoloji, Yerbilimlerine Giriş* (9. Baskı). İTÜ Vakfı Yayınları.

### C.2. Çeviri Kitapların Gösterilmesi:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). *Kitabın Çeviri Adı* (Çevirenlerin adı). Yayınevi. (Orijinal yayın tarihi). Varsa DOI bilgisi veya internet erişim bilgisi

Komatina, M. M. (2011). *Tıbbi Jeoloji: Jeolojik Ortamların İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri* (Çev: Y. Örgün ve D. Bayrak). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (Orijinal yayın tarihi: 2001).

## **D. Kitapta Bölüm ise:**

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Bölüm Adı. Editör(ler) *Kitap adı* (Bölümün sayfa aralığı). Yayınevi.

Merriman, R. J. & Frey, M. (1999). Patterns of very low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In M. Frey & D. Robinson (Eds.), *Low Grade Metamorphism*, (pp. 61-107). Blackwell Sciences Ltd.

## **E. Raporlar ve Tezler:**

### E.1. Raporlar:

Yazar ad(lar)ı, Tarih. *Raporun başlığı* (Varsa rapor no). Kurum adı (Yayımlanma durumu).

Kellogg, H. E. (1960). *Stratigraphic report, Derik-Mardin area Petroleum District V, Southeast Turkey* (Rapor no: 1367). TPAO (yayımlanmamış).

### E.2. Tezler:

Yazar adı, (Tarih). *Tezin başlığı* [Yayımlanma durumu ve derecesi]. Kuruluşun veya Üniversitenin Adı.

Sönmez, H. (1996). *TKİ ELİ Soma Linyitleri açık işletmelerinde eklemli kaya kütleli içindeki şevlerin duraylılığının değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

#### **F. Kişisel Görüşme:**

Sözbilir, H., 2005. Personal communication. Geological Engineering Department of Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey.

#### **G. İnternette İndirilen Bilgiler:**

Kurumun veya internet sayfasının adı, (Erişim tarihi). Web adresi.

KRDAE, (2020, 02 Ocak). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. Deprem Bilgileri, Büyük Depremler. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/>

#### **H. Kaynak olarak kullanılan haritalar:**

Konak, N. ve Ercan, T., 2002. *1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası Van Paftası*, (Şenel, M., (Ed.)). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

### **Türkçe kaynaklar doğrudan Türkçe olarak verilmeli ve Türkçe karakterlerle yazılmalıdır.**

#### **Eşitlikler ve Formüller**

Matematiksel semboller ve formüller el yazısıyla yazılmamalıdır. Eşitlik numaraları eşitliğin hizasında ve sağ kenarına dayandırılarak birbirini izleyen bir sırayla parantez içinde, ayrıca eşitliklerdeki sembollerin anlamı makalede ilk kez kullanıldıkları eşitliğin altında verilmelidir.

Eşitliklerde kullanılan alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterle yazılmalıdır. Çarpım işlemini göstermek için herhangi bir işaret kullanılmamalı, ancak gerekli durumlarda "\*" işareti tercih edilmelidir (örneğin;  $y=5*10^{-3}$ ). Bölme işareti olarak yatay çizgi yerine "/" işareti kullanılmalıdır. Kimyasal formüllerde iyonların gösterilmesi amacıyla  $Ca^{++}$  ve  $CO_3^{--}$  yerine  $Ca(2+)$  ve  $CO_3(2-)$  tercih edilmelidir. Metinde eşitliklere "eşitlik (1)" şeklinde atıfta bulunulmalıdır. Gerekliyse, bilgisayar programı listeleri de net ve okunur şekilde ekte verilmelidir.

#### **Çizelgeler**

Çizelgeler, başlıklarıyla birlikte, Dergi'nin sayfalarındaki baskı alanını (15,8 x 22,5) aşmayacak şekilde hazırlanmalı ve birbirini izleyen sıra numaralarıyla verilmelidir. Çizelgelerin üst kısımlarında hem Türkçe, hem de İngilizce başlıkları bulunmalıdır (Çizelge başlıkları ayrı bir sayfada liste halinde verilmemelidir.). Makalenin Türkçe yazılması halinde İngilizce başlık italik harflerle Türkçe başlığın altında yer almalı, İngilizce makalelerde ise, italik yazılmış Türkçe başlık İngilizce başlıktan sonra verilmelidir. Çizelgeler, "Çizelge 1" vb. şeklinde sunulmalıdır. Metinde çizelgelere Çizelge 1 veya Çizelge 1 ve 2 (eğer birden fazla sayıda çizelgeye atıfta bulunulacaksa) şeklinde değinilmelidir. Çizelgeler, metinde kullanılan karakterlerden daha küçük (10 veya 11 punto) karakterle yazılmalı ve Dergi'nin tek (7,3 cm-Genişlik) veya çift (15,8 cm-Genişlik) kolonuna sığacak şekilde düzenlenmelidir. Çizelgelerde düşey çizgiler kullanılmamalı, yatay çizgiler ise sadece çizelgenin alt ve üstünde, ayrıca çizelgedeki başlıklar ile bunların altında listelenen rakamları ayırmak için kullanılmalıdır (Bunun için Dergi'nin önceki sayılarına bakılması önerilir). Çizelgelerde makalenin diğer kısımlarında verilen bilgi veya sonuçların (örneğin grafikler vb.) tekrar verilmemesine özen gösterilmelidir. Her çizelge ayrı sayfalara bastırılarak metnin sonunda (Kaynaklar dizininin sonra) sunulmalıdır. Çizelgelerdeki kısaltma ve simgeler daha küçük karakterlerle çizelgenin altında verilmelidir (örneğin: c:tek eksenli sıkışma dayanımı vd.).

#### **Şekiller**

Çizim, grafik ve fotoğraf gibi tüm şekiller yüksek kalitede basılmış olarak "Şekil" başlığı altında ve metin içinde anıldıkları sırayla numaralandırılarak verilmelidir. Şekil numaraları sayfanın sağ üst köşesine yazılmalı, ayrıca şekiller küçültülüp büyütülebilecek halde sunulmalıdır. Şekil açıklamaları; şekillerin altına yazılmamalı ve ayrı bir sayfaya yazılarak "Şekiller Dizini" başlığıyla verilmeli, ayrıca "Şekil 1" olarak başlamalıdır. Çizelgeler için yukarıda belirtilen yazım kurallarına benzer şekilde, şekil başlıkları hem Türkçe hem de İngilizce hazırlanmalıdır. Ayrı sayfalara bastırılmış olan şekiller, çizelgelerden sonra sunulmalıdır. Şekiller için en büyük

boyut, şekil başlığını da içerecek biçimde 15,8 cm (genişlik) x 22,5 cm (uzunluk) olmalıdır. Tüm şekillerin Dergi'nin tek veya çift kolonuna sığacak boyutlarda hazırlanması ve mümkünse daha çok tek kolona göre tasarlanması önerilir. Özellikle haritalar, arazi ile ilgili çizimler ve fotoğraflar, sayısal ölçek (1:25000 vb.) yerine, metrik sisteme uygun çubuk ölçekle verilmelidir. Tüm haritalarda kuzey yönü gösterilmelidir. Bölgesel haritalarda, uygun olduğu takdirde, ulusal grid veya enlem/boylam değerleri verilmelidir. Harita açıklamaları, şekil başlığıyla birlikte değil, şeklin üzerinde yer almalıdır. Fotoğraflar, çizimler veya bunların birlikteliğinden oluşan şekiller (a), (b) vb. gibi gruplar halinde verilebilir. Bu tür sunumlarda (örneğin; Şekil 5a ve 5b) a,b,c vb. gibi tek bir şekle ait çizimler veya fotoğraflar, ayrı sayfalarda basılması yerine, gruplandırılarak aynı sayfada sunulmalıdır. Şekillerde açık gölge ve tonlarından kaçınılmalı, özellikle bilgisayar programlarından elde edilen grafiklerde bu hususa dikkat edilmelidir. Gölgeleme belirgin, fotoğraflar siyah-beyaz ve iyi bir kontrasta sahip olmalıdır. Tüm şekiller, Şekil 1 veya Şekil 1 ve 2 (birden fazla şekle değiniliyorsa) gibi ve metinde anıldıkları sırayla numaralandırılmalıdır. Bir dizi fosil fotoğraflarını içeren şekiller levha olarak değerlendirilmelidir. Levha sayısı mümkün olduğunca az tutulmalıdır. Levhalara ilişkin açıklamalar, hem Türkçe hem de İngilizce olarak aynı sayfada verilmelidir.

### **MAKALELERİN EDITÖRLÜĞE GÖNDERİLMESİ**

Makaleler yazım kurallarına uygun şekilde hazırlandıktan sonra DergiPark Akademik ([dergipark.gov.tr/tjb](http://dergipark.gov.tr/tjb)) adresi üzerinden elektronik olarak sisteme yüklenmelidir.

### **TÜRKİYE JEOLJİ BÜLTENİ EDITÖRÜ**

Prof. Dr. Erdiñ YİĞİTBAŞ

Tel: 286 2180018-20088

e-posta: [eyigitbas@comu.edu.tr](mailto:eyigitbas@comu.edu.tr)

### **YAYIMA KABUL EDİLEN MAKALELERİN SUNUMU**

Yazarlar, makalelerinin yayıma kabulü halinde, makalenin düzeltilmiş son halini DergiPark Sistemi üzerinden Editör'e göndermelidir. Makaleler \*DOCX biçiminde hazırlanmalıdır. Tüm şekiller Corel Draw ile çizilmelidir. Bununla birlikte, şekillerin çözünürlükleri 300 dpi den az olmamalıdır. Hem çizim (CDR) hem de resim (JPG) dosyaları DergiPark Sistemi üzerinden gönderilmelidir.

### **PROVA BASKILAR**

Makalelerin prova baskıları, dizgi ve yazım hatalarının olup olmadığını kontrolü için Başvurulacak Yazar'a gönderilir. Prova baskılarda yapılacak düzeltmeler yazım hataları ile sınırlı olup, yazarların makaleyi kabul edilmiş son halinden farklı duruma getirebilecek değişiklikler ve düzeltmeler yapması kabul edilemez. Prova baskılar, yazarlar tarafından alındıktan sonra en geç üç gün içinde editöre gönderilmelidir. Gecikmeli olarak yapılacak düzeltmelerin baskıya verilmesi garanti edilemeyeceği için, yazarların prova baskıları göndermeden çok dikkatli şekilde kontrol etmeleri önerilir.

### **TELİF HAKLARI**

Yazar veya (Başvurulacak Yazar (birden fazla yazarlı makalelerde), kendisi ve diğer yazarlar adına "Telif Hakkı Devir Formu"nu makalenin baskıya verilmesinden önce imzalamalıdır. Bu sözleşme, Jeoloji Mühendisleri Odası'na yazarlar adına telif hakkı alınmış yayınlarını koruma olanağı sağlamakla birlikte, yazarların makalenin sahibi olma haklarından vazgeçtiği anlamına gelmemektedir. Telif Hakkı Devir Formu, en kısa sürede Editör'e gönderilmelidir. Bu form Editör'e ulaştırılıncaya değin, makale yayına kabul edilmiş olsa bile, baskıya gönderilmez.

### **ETİK İLKELER VE YAYIN POLİTİKASI**

Türkiye Jeoloji Bülteni (*Türkiye Jeol. Bül.*) yayıncı ve kullanıcıları (Baş Editör, editörler, alan editörleri, yazarlar, hakemler, okuyucular vb.) Yayın Etiği Komitesi (COPE) tarafından belirlenen etik kurallara ve sorumluluklara uymalıdır.

## **Dergi Politikası:**

**Açık Erişim Politikası:** *Türkiye Jeol. Bül.* hakemli bir dergidir. Basılı ve elektronik ortamda çevrimiçi yayın yapmakta olup açık erişim sistemine sahiptir. Dergi sayıları Ocak, Nisan ve Ağustos aylarında yılda üç kez yayınlanır. Yayın süreçlerinde, bilimsel yöntemle özgürce ve yansız biçimde üretilen bilginin paylaşılması gözetilir. Makale değerlendirme sürecinde kör hakemlik sistemi uygulanır. *Türkiye Jeol. Bül.*'nin 1947 yılından itibaren yayınlanan tüm sayıları gerek yayıncı kuruluş olan Jeoloji Mühendisleri Odası (JMO) tarafından basılı ve elektronik versiyonları ve TÜBİTAK - DergiPark tarafından ise elektronik versiyonları arşivlenmektedir.

**Ücret Politikası:** *Türkiye Jeol. Bül.*'nin yayıncı kuruluşu JMO'dır. JMO ve/veya *Türkiye Jeol. Bül.* derginin basılı ve elektronik versiyonları için herhangi bir ücret ya da abonelik bedeli, yazarlar için ise yayın ücreti ya da benzeri bir ödeme talep etmez.

**Telif Hakkı Devri:** JMO ve/veya *Türkiye Jeol. Bül.*, yayımlanacak makalelerin telif haklarının alınması için yazarlardan yazılı onay alır. İlgili yazar, dergiye sunulan makalenin yazarı/sahibi olduğunu ve kendisi ve diğer yazar(lar) adına telif hakkını JMO ve/veya *Türkiye Jeol. Bül.*'ne devreder. **Telif Hakkı Devri Formu**'nun doldurularak, makale sunumu esnasında dergi sistemine yüklenmesi zorunludur. Sorumlu yazar, gönderilen bu makalenin başka bir yerde benzer bir formda yayınlanmadığını, makalenin orijinal olduğunu ve yayınlanmak üzere başka bir yere gönderilmeyeceğini garanti etmelidir. Sunulan makalenin tüm yazarları, yazının tüm haklarını ve tüm telif haklarını imzalayarak JMO ve/veya *Türkiye Jeol. Bül.*'ne devretmelidir. JMO ve/veya *Türkiye Jeol. Bül.*'nin, ilgili makalenin tamamını veya bir kısmını dersler/ders notları, raporlar ve ders kitapları/basılı kitaplar gibi gelecekteki eserlerinde herhangi bir ödeme yapmadan kullanma hakkı ve ilgili makalenin kendi kullanımını için kopyasını alma hakkı vardır. JMO ve/veya *Türkiye Jeol. Bül.*; ticari amaçlar dışında patent hakları gibi telif hakkı dışındaki tüm haklarını saklı tutar.

**Makale sunumu:** *Türkiye Jeol. Bül.*'ne değerlendirilmek üzere makale gönderecek yazar(lar), öncelikle DergiPark'a üye olmak zorundadır. Sorumlu yazar çalışmalarını (orijinal makale, derleme, vb) *Türkiye Jeol. Bül.*'ne Dergipark sistemi üzerinden göndermelidir.

**İntihal Politikası:** Makaleden sorumlu yazarın dergiye yeni makale gönderimi için "iThenticate İntihal Tespit Yazılımı" veya "Turnitin" veya eşdeğeri bir intihal programı kullanarak benzerlik raporu yanı sıra, imzalanan "**Telif Hakkı Devri Formu**" ve "**Etik Bildirim Formu**"nu DergiPark sistemine yüklemesi gerekmektedir. Gönderilen makalenin benzerlik endeksi oranı, referans listesi hariç, % 20'nin altında olmalıdır.

**Yazar Katkısı Beyanı ve Çıkar Çatışması/Çakışması Beyanı:** Makale yazarlarının her biri makaleye önemli bilimsel katkıda bulunmuş olması gerektiğinden her yazarın eşit etik sorumluluk taşıdığı kabul edilir. Makalenin tüm yazarları, hatalı durumlarda geri çekme veya düzeltme yapmakla yükümlüdür.

Yazarlar, yazılarını sisteme yükleme aşamasında gerek benzer konularda araştırma yapan diğer araştırmacılar bakımından ve gerekse potansiyel hakemlik konularında her türlü çıkar çatışmasını/çakışmasını açıkça belirtmelidir. Çıkar çatışması/çakışması bulunmadığını düşündüğü durumda ise bu husus açıkça belirtilmelidir.

**Kör hakemlik:** *Türkiye Jeol. Bül.*'nde tüm bilimsel yayınların objektif değerlendirilmesini sağlamak amacıyla kör hakemlik sistemi uygulanmaktadır. Makaleye hakem atama aşamasında hakem ve yazar(lar) arasında herhangi bir çıkar çatışması/çakışması bulunmamasına özen gösterilmektedir. Bu amaçla hakem ve yazar(lar) arasında bilhassa; a) Tez danışmanı/öğrenci ilişkisi olmaması, b) Yazar(lar) ve hakem arasında yakın geçmişte (son 2 yıl) ortak araştırma ve yayın yapılmış olması, c) Aynı kurumda görev yapıyor olmaması, d) Dergiye sunulan yazıya biçim ya da içerik yönünden katkı yapmamış olması, e) Yazar(lar) ve hakem arasında yargıya ya da etik kurullara intikal eden ihtilafların olmaması, f) Hakem ve yazar(lar) arasında akrabalık ilişkisinin olmaması g) Hakemin yazar(lar) hakkında kamuoyuna intikal etmiş önyargılarının bulunmaması, h) Hakem ve yazar(lar) arasında herhangi bir ticari ilişkisinin olmaması vb durumlar dikkate alınır. Dergi editörlüğünün gözünden kaçan durumların olması ihtimaline karşı hakemlerin de böyle bir durumda editörlüğü uyarması gerekir. Ayrıca hakemlerin;

- Sadece uzmanlık alanlarına giren makaleleri değerlendirmeleri,
- Değerlendirmeyi tarafsız, objektif ve gizlilik içinde yapmaları,
- Değerlendirmede milliyet, cinsiyet, dini inanç, siyasal düşünce, ticari kaygılar vb nedenlerle tarafsızlıklarını kaybetmemeleri,

- Görüş ve önerilerini akademik görgü kuralları içinde, yapıcı ve akademik bir dille yapmaları, kişisel polemik yaratacak üsluptan kaçınmaları,
- Yayın sürecini sebepsiz uzatacak şekilde değerlendirmelerini geciktirmemeleri istenir.

### **Değerlendirme İşlemi:**

**Ön Kontrol (Hakem değerlendirme öncesi) Süreci:** *Türkiye Jeol. Bült.*'ne sunulan makale ilk olarak, Baş Editör tarafından dergi amaç ve kapsamına uygunluğu açısından gözden geçirilir. Gönderilen makale, derginin amaç ve kapsamına uymuyorsa en geç 15 gün içerisinde reddedilir ve yazara bilgi verilir. Amaç ve kapsamı uygun bulunan makale, yapılan hakem değerlendirmesi öncesi yazım kuralları, dil ve anlatım açısından ve çalışmanın planlanması açısından incelenir. Bu konularda eksiklikleri bulunan makalelerin yazar tarafından düzeltilmesi istenir. Değerlendirme sürecinde yazarlar editör ve hakemlerin görüş, öneri ve eleştirilerine cevap vermekle yükümlüdürler. Yazarlar, hakem görüşlerini dikkate alarak sorulan soruları cevaplamak, görüş ve önerileri değerlendirmek, eleştirilere karşı olumlu ya da olumsuz karşılık vererek bunlara dair kanıtlarını ayrıntılı bir mektupla editöre bildirmek zorundadır. Bu karşı mektupta akademik üslup kullanılmalı, kişisel tartışmalardan kaçınılmalıdır. Hakem görüşleri doğrultusunda düzeltilmesi istenen makalelerin düzeltilmiş kopyası geçerli bir neden olmaksızın 30 gün içerisinde tekrar editöre gönderilmediği takdirde editörün makaleyi reddetme hakkı vardır. Yeniden düzenleme sonrası, düzeltilmiş makale editör tarafından gerekirse yeniden hakem değerlendirmesine gönderilir veya editör tarafından doğrudan kabul veya reddedilir.

**Hakem Değerlendirme Süreci:** Makalelerin tüm bölüm içerikleri incelenip hakem değerlendirmesi için uygun bulunduğu makaleler hakem değerlendirmesine alınır. Ancak, herhangi bir nedenle hakem değerlendirmesine uygun bulunmayan makaleler, editörün değerlendirme raporuyla birlikte reddedilir. Yazara en geç 15 gün içerisinde bilgi verilir. Hakem değerlendirmesinde makaleler, editör tarafından içerik ve uzmanlık alanlarına göre dergi hakem havuzundan ve/veya havuz dışından olmak üzere, en az üç hakeme gönderilir. Makale hakemlerinin belirlenmesinde yukarıda açıklanan çıkar çatışması/çakışması hususlarına özen gösterilir. Hakemler değerlendirme süreciyle ilgili hiçbir kimseyle bilgi ve belge paylaşmayacaklarını garanti etmek zorundadır. Hakem değerlendirme süreci için hakemlere verilen süre 30 gündür. Hakemler veya editörden gelen düzeltme önerilerinin yazarlar tarafından 30 gün içerisinde tamamlanması zorunludur. Hakemler makale için düzeltmelerini inceleyerek uygunluğuna karar verebilir veya gerekiyorsa birden çok defa düzeltme talep edebilir. Değerlendirme sonucu, hakemlerden gelen görüşler, editör tarafından en geç 15 gün içerisinde incelenir. İnceleme sonucunda, editör makaleye ilişkin nihai kararını vererek yazara iletir. Ret kararı verilen makaleler arşivlenir.

**Makale Geri Çekme:** Değerlendirme aşamasındaki makalesini geri çekme isteğinde bulunan yazar(lar), konuyu içeren ıslak imzalı dilekçeyi dergi e-mail adresi [tjbdergi@gmail.com](mailto:tjbdergi@gmail.com) üzerinden yayın kuruluna iletirler. Yayın Kurulu, geri çekme dilekçesini inceleyerek en geç 15 gün içerisinde cevap verir. Yayın Kurulu tarafından dilekçesi onaylanmayan bir makalenin yazar(lar)ı, makalelerini başka bir dergiye gönderemezler. Yazar(lar)ın yayınlanmış, erken görünüm veya değerlendirme aşamasındaki çalışmasıyla ilgili bir yanlış ya da hatayı fark etmesi durumunda, dergi editörüyle işbirliği yapma yükümlülüğü bulunmaktadır. Yazar(lar), bizzat kendilerine ait olmayan verileri kullanma hakkına sahip olduklarını, araştırma/analiz ile ilgili gerekli olabilecek izinleri gösteren belgelere sahip olmalıdır.

Editörler, derginin gelişimi ve yayınlanan çalışmaların kalitesini geliştirmeye yönelik süreçleri dikkatle takip eder. *Türkiye Jeol. Bült.* Yayın Kurulu basım aşamasında, değerlendirme aşamasında veya yayınlanmış bir makale için telif hakkı ve intihal şüphesi oluşması durumunda, makaleyle ilgili bir soruşturma başlatır. Yapılan soruşturma sonucunda, makalede telif hakkı ve intihal şüphesi tespit edilmesi durumunda, Yayın Kurulu makaleyi detaylı açıklama yaparak değerlendirme aşamasından geri çekme işlemi yazar(lar)a en geç 15 gün içerisinde bildirir.

**Gizlilik:** *Türkiye Jeol. Bült.* sistemindeki tüm kişisel bilgiler bilimsel amaçlarla kullanılmakta olup, üçüncü taraflarla paylaşılmamaktadır.

**Sorumluluk Reddi:** Baş Editör ve Yayın Kurulu üyeleri, yazarların görüşlerinden ve yazı içeriğinden sorumlu değildir. Yazarlar, yazılarındaki etik özgünlük ve olası hatalardan sorumludur. Son okuma (düzeltme okuması) öncesi ve sayfa düzenleme aşamasında oluşabilecek tüm hatalardan yazarlar sorumludurlar. Son okuma sonrası meydana gelen hatalar dergi yetkililerinin sorumluluğundadır.



## **GEOLOGICAL BULLETIN OF TURKEY**

### **AIM and SCOPE**

The Geological Bulletin of Turkey (*Geol. Bull. Turkey*) is one of the oldest and best-known journals in Turkey, published since 1947. It is published by the Chamber of Geological Engineers (CGE) with three issues every year. The journal accepts articles about earth science topics apart from engineering geology. Primary topics include geology, tectonics, structural geology, geochronology, geochemistry, sedimentology, biostratigraphy, paleontology, mineralogy, magmatic and metamorphic petrology, mineral deposits, geophysics and geomorphology, in addition to environmental and urban geology along with economic geology. Articles are accepted in both Turkish and English at current scientific levels in relation to these topics. Articles include primarily Turkey and surroundings, eastern Mediterranean, Middle East, Balkans, Black Sea and Caspian Sea areas, along with ranked articles from all other critical regions of the world. Articles including results with high scientific level from research completed within this scope are published without any fee. The journal is open access. The target audience for the journal is all earth scientists interested in these topics and this scope. The journal includes mainly original research articles and lower numbers of reviews and publications with other scientific qualities. Selected sessions at the Geological Congress of Turkey and other national and international meetings may later be published as special issues after reviewed publication processes.

### **PREPARATION OF MANUSCRIPTS**

The language of the GEOLOGICAL BULLETIN OF TURKEY is both Turkish and English. For manuscripts submitted in English “Genişletilmiş Özet”, for manuscripts submitted in Turkish “Extended Summary” should be given. If the author(s) are residents of a non-Turkish speaking country, titles, abstracts and captions of figures and tables are translated into Turkish by the Editors. It is strongly recommended that authors whose native language is not English, should ask a person whose native language is English to check the grammar and style of manuscript before submission. Paper should be original and comprise previously unpublished research, interpretations, or synthesis of two, or technical notes. Submission implies that the manuscript is not currently under consideration for publication elsewhere.

### **SUBMISSION PROCESS and ETHICAL STATEMENT**

All manuscripts must be submitted electronically via the Internet to the Geological Bulletin of Turkey through the online system DergiPark at <http://dergipark.gov.tr/tjb>. There are no page charges. Papers are accepted for publication on the understanding that they have not been published and are not going to be considered for publication elsewhere. Authors should certify that neither the manuscript nor its main contents have already been published or submitted for publication in another journal. The copyright release form, which can be found at <http://dergipark.gov.tr/tjb>, or [www.jmo.org.tr](http://www.jmo.org.tr) must be signed by the corresponding author on behalf of all authors and must accompany all papers submitted. After a manuscript has been submitted, it is not possible for authors to be added or removed or for the order of authors to be changed. Manuscripts may be rejected without peer review by the editor-in-chief if they do not comply with the instructions for authors or if they are beyond the scope of the journal. After a manuscript has been accepted for publication, i.e. after referee-recommended revisions are complete, the author will not be permitted to make changes that constitute departures from the manuscript that was accepted by the editor. Before publication, the galley proofs are always sent to the authors for corrections. The use of someone else’s ideas or words in their original form or changed without a proper citation is considered plagiarism and will not be tolerated.

## INSTRUCTIONS FOR CONTRIBUTORS

**Manuscripts should generally be structured as follows:**

- (a) Title (English and Turkish)
- (b) Names of authors (bold and in capital), their affiliations (italic and lower-case) and the name and e-mail address of the corresponding author.
- (c) Abstract (English and Turkish)
- (d) Key words (English and Turkish)
- (e) Introduction (aim, content and methodology)
- (f) Main text (methods, material studied, descriptions, analyses etc.)
- (g) Results and Discussion or Conclusions and Recommendations
- (h) Extended Summary / Genişletilmiş Özet
- (i) Acknowledgements (if necessary)
- (j) References
- (k) Tables
- (l) List of figure captions
- (m) Figures
- (n) Plates (if any)

The various levels of headings used in the manuscript should be clearly differentiated. All headings should be in left-aligned. Major headings should be bold capitals. Secondary headings should be considered as sub-headings. Primary- and secondary-subheadings should be given in lower-case and tertiary headings in italics. Headings should not be preceded by numerals or letters. Manuscripts (abstract, main text, acknowledgements, references, appendices and figure captions) should be typed on one side of the paper (A4 size: 29.7 cm x 21 cm) with wide margins (at least 2.5 cm) and 1.5 line-spaced throughout, at a font size of 12 point (Times New Roman) and with all pages numbered.

### Examples for headings:

**ABSTRACT**

**INTRODUCTION**

**PRIMARY HEADING**

**Primary Sub-Heading**

**Secondary sub-heading**

*Tertiary sub-heading*

**CONCLUSIONS**

**GENİŞLETİLMİŞ ÖZET / EXTENDED SUMMARY**

**ANCKNOWLEDGEMENTS**

**ORCID**

**REFERENCES**

### **Cover Page**

A cover page, separate from the main manuscript, must include the followings:

- a. Title of the paper
- b. Name(s) of author(s) (full forenames should be given)
- c. Full postal and e-mail addresses of all authors (the corresponding author should be indicated). Phone number for the corresponding author should also be provided.

### **Title and Authors**

The title of the paper should unambiguously reflect its content. If the paper is written in Turkish, the Turkish title (in bold-face type and first letter of the words capital) should be followed by the English title (italic and

first letter of the words capital). If the paper is in English, the English title should appear before the Turkish title in the style mentioned above. Authors should provide their Orcid ID which can be obtained from orcid.org website.

**The information related with authors should be given as follow:**

Ahmet Ahmetoğlu Ankara University, Engineering Faculty, Geological Engineering  
Department Tandoğan 06100 Ankara  
e-mail: a\_ahmetoğlu@ankara.edu.tr  
ORCID Number: 0000-0001-1458-0820

A. Hüsnu Hüsnuoğlu MTA Genel Müdürlüğü, Jeolojik Etüdlr Dairesi, 06520 Ankara  
e-posta: husnu56@mta.gov.tr  
ORCID Number: 0000-0001-1458-0830

**ABSTRACT**

The abstract not exceeding 300 words should be informative (aim of the study and main conclusive remarks). It should not contain references. The Abstract should be given in both Turkish and English. If the paper is written in Turkish, an English abstract (in italics) should follow the Turkish abstract, while a Turkish abstract (in italics) should appear after the English abstract in papers written in English.

**Keywords**

The abstract should include minimum 2, and not more than 7 keywords which reflect the entries the authors would like to see in an index. Keywords should be given in both Turkish and English. Keywords should be written in lower-case letters, separated by commas, and given in alphabetical order. For Technical Notes and Discussions, keywords should not be provided.

**GENİŞLETİLMİŞ ÖZET / EXTENDED SUMMARY**

The extended abstract should not exceed 2500 words. But it must be more bulky than abstract. The new figure or table should not be given. But reference can be given to figures and tables present in main text.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

Acknowledgements should be brief and confined to persons and organizations that have made significant contributions. Please use full names without titles and indicate name(s) of the organization(s) of the person(s) acknowledged.

**CITATIONS and REFERENCES**

**Citation in the text**

***A. If the article has one author***

Parenthetical citations: (Author, Year) e.g.: (Sönmez, 1996)

Narrative citations: Author (Year) e.g.: Sönmez (1996)

***B. If the article has two authors***

Parenthetical citations: (Author1 & Author2, Year) e.g.: (Merriman & Frey, 1999)

Narrative citations: Author1 and Author2 (Year) e.g.: Sönmez (1996)

***C. If the article has more than two authors***

Parenthetical citations: (Author1 et al., Year) e.g.: (Pettijohn et al., 1987)

Narrative citations: Author1 et al. (Year) e.g.: Pettijohn et al., (1987)

#### **D. Citing Multiple Works**

Parenthetical citations: (Merriman & Frey, 1999; Pettijohn et al., 1987; Sönmez, 1996)

Narrative citations: Merriman and Frey (1999), Pettijohn et al. (1987), Sönmez (1996)

#### **E. If more than one publication of the same authors published in the same year is cited**

In this case, letters such as a, b, c are given after the years of the articles in the References section. In the same way, these letters are used in the citations in the text.

In References:

Ahmetoğlu, A. & Hüsnuoğlu, H. (2022a). Article 1. *Full Name of Journal*, Vol.(No), pages. DOI number (if available)

Ahmetoğlu, A. & Hüsnuoğlu, H. (2022b). Article 2. *Full Name of Journal*, Vol.(No), pages. DOI number (if available)

Citations in the text:

Parenthetical citations: (Ahmetoğlu & Hüsnuoğlu, 2022a)

Narrative citations: Ahmetoğlu & Hüsnuoğlu (2022a)

### **References**

All references cited in the text, and in captions of figures and tables should be presented in a list of references under a heading of ‘REFERENCES’ following the text of the manuscript.

#### **A. Journals**

***Bundan sonrasında bir değişiklik yok araya yukarıdakileri ekleyeceğiz***

#### **A.**

##### A.1. Citing the periodicals:

Author(s), (Date). Title of paper. *Full Name of Journal*, Vol. (No), pages. DOI number (if available)

Hoek, E. & David, M. (1990). Estimating Mohr – Coulomb friction and cohesion values from Hoek – Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics*, 27 (3), 220-229. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)94333-O](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)94333-O)

##### A.2. Special cases:

*A.2.1. If the article was taken from an open (free) access website:*

Ketin, İ. (1949). Son on yılda Türkiye’de vukua gelen büyük depremlerin tektonik ve mekanik neticeleri hakkında. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 2(1), 1-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/issue/50279/650044>

*A.2.2. If the article has an article number:*

Açlan, M., Oyan, V. & Köse, O. (2020). Petrogenesis and the evolution of Pliocene Timar basalts in the east of Lake Van, Eastern Anatolia, Turkey: A consequence of the partial melting of a metasomatized spinel-rich lithospheric mantle source. *Journal of African Earth Sciences*, 168, Article 103844. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103844>.

#### **B. Proceedings and Abstracts:**

Author(s), (Date). Title of paper. Name of Editor(s), *Title of Symposium or Congress*, (pages). Name of Publisher. DOI number & internet address (If available).

Şanlıyüksel Yücel, D., İleri, B. (2019). Characterization of weak, stratified and clay bearing rock masses. In H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, B. Uzel, Ö. Sümer, M. Softa, Ç. Tepe, S. Eski (Eds.), *72<sup>nd</sup> Geological Congress of Turkey The Proceedings and Abstracts Book*, (s.63-64). Chamber of Geological Engineers of Turkey Publications No: 140. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893_ek.pdf)

### **C. Books:**

#### C.1. Citing of books:

Author(s), (Date). *Name of the Book*. Name of the Publisher. DOI number & internet address (if available).

Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R. (1987). *Sand and Sandstones* (2nd ed.). Springer-Verlag New York. <https://www.doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>

Ketin, İ. (2016). *Genel Jeoloji, Yerbilimlerine Giriş* (9. Baskı). İTÜ Vakfı Yayınları.

#### C.2. Citing of translated books:

Author(s), (Date). *Name of the Translated Book*. Name of the Publisher. (Original publishing date). DOI number & internet address (If available).

Komatina, M. M. (2011). *Tıbbi Jeoloji: Jeolojik Ortamların İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri* (Translator: Y. Örgün ve D. Bayrak). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (Original publication date: 2001).

### **D. Chapter in book:**

Author(s), (Date). Chapter Name. Name of Editors, *Name of Book* (Page numbers of the chapter). Name of Publisher.

Merriman, R. J. & Frey, M. (1999). Patterns of very low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In M. Frey & D. Robinson (Eds.), *Low Grade Metamorphism*, (pp. 61-107). Blackwell Sciences Ltd.

### **E. Reports and Thesis:**

#### E.1. Reports:

Author(s), (Date). *Title of report* (If any report no). Name of the Organization or Institution, (published or unpublished).

Kellogg, H. E. (1960). *Stratigraphic report, Derik-Mardin area Petroleum District V, Southeast Turkey* (Rapor no: 1367). TPAO (unpublished).

#### E.2. Thesis:

Author, (Date). *Title of Thesis* [published or unpublished & PhD or Msc Thesis]. Name of the Institution or University.

Sönmez, H. (1996). *TKİ ELİ Soma Linyitleri açık işletmelerinde eklemli kaya kütleli içindeki şevlerin duraylılığının değerlendirilmesi* [Unpublished Msc Thesis]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

### **F. Personal Communications:**

Sözbilir, H., 2005. Personal communication. Geological Engineering Department of Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey.

### **G. Information Downloaded from the Internet**

Name of the Organization, (Date). Web address, date of access to website.

KRDAE, (2020, 02, January). Boğaziçi University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center, <http://www.gov.tr>.

**Turkish references can also be given directly in Turkish. For such references please use Turkish characters.**

### **Mathematical Expressions**

Mathematical symbols and formulae should be typed. Equation numbers should appear in parentheses at the right-hand side of the equations and be numbered consecutively. For Greek or other non-Roman letters, identify the symbol in words in the left-hand margin just below the equation the first time it is used. In addition, the meaning of symbols used in equations should be given below the equations.

Instead of square-root symbol, an indice of 0.5 should be used (e.g.  $y=5x^{0.5}$ ). For the of multiplication sign do not use any symbol, however if necessary, the symbol “\*” can be preferred (e.g.  $y=5*10^{-3}$ ). Please use “/” for division instead of a horizontal line between numerator and denominator. In the expression of chemical reactions, ions should be given as Ca(2+) and CO<sub>3</sub>(2-) instead of Ca<sup>++</sup> and CO<sub>3</sub><sup>--</sup>. In the text, equations should be referred to as equation (1). Computer program listings, if appropriate, must be very clear in an Appendix.

### **Tables**

Tables with their titles should not exceed the printed area of the page (15.8 cm (wide) x 22.5 cm (deep)) and be numbered consecutively. Both Turkish and English titles should appear at the top of a table (do not print table captions on a separate sheet). If the manuscript is written in Turkish, English title in italics should follow the Turkish title. For manuscripts in English, a Turkish title should appear below the English title in italics. They should begin “Table 1.” etc. Tables should be referred to as Table 1 or Tables 1 and 2 (if more than one table is referred to). Tables can be written in a font size smaller than that of the text (10 or 11 point). Tables should be arranged to fit single column (7.3 cm wide) or double column (15.8 cm wide). No vertical rules should be used. Horizontal rules should only be used at the top and bottom of the tables, and to separate headings and numbers listed in the tables (Please check the previous issues of the Journal). Tables should not duplicate results presented elsewhere in manuscript (e.g. in graphs). Each table should be separately printed and appear after the text (after references). All abbreviations and symbols must be identified with smaller character underneath the tables (e.g. c: uniaxial compressive strength, etc).

### **Illustrations**

All illustrations, whether diagrams, charts and photographs, should be of high quality, referred to as “Figures” and be numbered consecutively as they appear in the text. They must be originals. The number of the figure should be given at top on the right-hand side of the paper. Illustrations should be provided in camera-ready form, suitable for reproduction (which may include reduction) without retouching. Figure captions should be supplied on a separate sheet and should begin “Figure 1.” etc. As with the rules given for tables, figure captions should also be given both in Turkish and English. All illustrations should be given with a list of figure captions. The maximum printed size of illustrations is 15.8 cm (wide) x 22.5 cm (deep) together with figure captions. It is recommended that all illustrations should be designed with the Journal’s single-column or two-column layout in mind, and where possible, illustrations should be designed for a single column. Illustrations, particularly maps, field sketches and photographs should have a metric bar scale rather than magnification factors. All maps should have a north mark. Regional maps may include National Grid or latitude/longitude number where appropriate. Map keys should be given on the figure, not in the figure caption.

Photographs, line drawings, or combinations may be grouped as figure parts (a), (b), etc. It is preferred that these are mounted. Letters or numerals should not be less than 1 mm after reduction. Avoid fine shading and

tones, particularly from computer graphics packages. Shading should be distinct. Photographs must be black and white and sharp, and exhibit good contrast.

All illustrations must be numbered in the order in which they are referred to and discussed in the text as Figure 1 or Figure 1 and 2 (if more than one figures is referred to). Illustrations consisting of a set of fossil photographs should be given as ‘Plates’ and mounted in the desired layout. The number of plates should be kept to a minimum. Explanations of plates should be given in both Turkish and English on the same page.

### **SUBMISSION OF MANUSCRIPTS**

Papers should be submitted electronically through web site DergiPark Academics ([dergipark.gov.tr/tjb](http://dergipark.gov.tr/tjb))

#### **EDITOR IN-CHIEF**

*Prof. Dr. Erdinç YİĞİTBAŞ*

*Tel: 286 2180018-20088*

*e-mail: [eyigitbas@comu.edu.tr](mailto:eyigitbas@comu.edu.tr)*

### **SUBMITTING ARTICLES ADMITTED TO PUBLICATION**

In cases where authors’ manuscripts are admitted to publication, authors should send revised final copies of their manuscripts to Editor through the DergiPark System. Manuscripts should be issued in \*DOCX format. All images, should be issued in Corel Draw. Besides, the resolution of the figures should not be less than 300 dpi. Both drawing (CDR) and image (JPG) files must be submitted through the DergiPark System.

### **PROOFING**

Proofing of articles are sent to Reference Author to check for typographical errors and misspelling. Revisions in proofing are limited to misspelling and any amendments and revisions by authors that may alter article in a way different than its final version are not acceptable. Proofing should be sent to editor within at latest three days after receipt by authors. Delayed revisions cannot be guaranteed for printing and therefore, authors are strictly recommended to precisely inspect proofing prior to sending.

### **COPYRIGHT**

The author or corresponding author on behalf of all authors (for papers with multiple authors) must sign the ‘Copyright Transfer’ agreement before the article can be published. This transfer agreement enables the Chamber of Geological Engineers to protect the copyrighted material for the authors, but does not relinquish the authors’ proprietary rights. The Copyright Transfer form should be sent to the Editor as soon as possible. Manuscripts accepted for publication will not be sent to print until this form is received by the Editor.

### **ETHICAL PRINCIPLES AND PUBLICATION POLICY**

The publisher and users (chief editor, editors, field editors, authors, reviewers, readers, etc.) of the Geological Bulletin of Turkey (*Geol. Bull. Turkey*) must abide by the ethical rules and responsibilities determined by the Committee of Publication Ethics (COPE).

#### **Journal Policy:**

**Open Access Policy:** The *Geol. Bull. Turkey* is a peer-reviewed journal. It publishes in print and online in the electronic environment and has an open-access system. Journal issues are published three times per year in the months of January, April and August. Publication processes ensure sharing of information produced freely and objectively with the scientific method. The review process for articles applies a blind review system. All issues of the *Geol. Bull. Turkey* published since 1947 are archived as both print and electronic versions by the publishing organization, the Chamber of Geological Engineers (CGE), and as electronic versions by TUBITAK – DergiPark.

**Price Policy:** The publishing organization of the *Geol. Bull. Turkey* is the CGE. The CGE and/or *Geol. Bull. Turkey* do not demand any fee or subscription costs for printed and electronic versions of the journal or any publishing costs or similar from authors.

**Copyright Transfer:** The CGE and/or *Geol. Bull. Turkey* receive written permission from authors to obtain the copyrights of articles that will be published. The relevant authors, as writer/owner in their own name and the name of other authors, transfer copyright of the article offered to the journal to the CGE and/or *Geol. Bull. Turkey*. It is mandatory to complete the **Copyright Transfer Form** and upload it to the journal system when submitting the manuscript. The responsible author must guarantee that this manuscript has not been published in similar form in other places, that the manuscript is original and that it will not be sent for publication elsewhere. All authors of the submitted manuscript must sign and transfer all rights and all copyright for the article to the CGE and/or *Geol. Bull. Turkey*. The CGE and/or *Geol. Bull. Turkey* receive the right to use all or part of the relevant article in future works like lessons/lesson notes, reports and textbooks/printed books without any payment and to copy the relevant manuscript for their own use. The CGE and/or *Geol. Bull. Turkey* reserve all rights apart from copyright, such as patent rights, except for commercial purposes.

**Article submission:** The authors of articles submitted for assessment by *Geol. Bull. Turkey* must first be members of DergiPark. The corresponding author must submit the study (original article, review, etc.) to *Geol. Bull. Turkey* through the DergiPark system.

**Plagiarism Policy:** In addition to the corresponding author submitting the article to the journal, they must upload a similarity report using “iThenticate Plagiarism Detection Software” or “Turnitin” or equivalent plagiarism program, along with the signed **Copyright Transfer Form** and the **Ethics Report Form** to the DergiPark system. The similarity index rate for articles must be below 20%, excluding the reference list.

**Author Contribution Statement and Conflict / Conflict of Interest Statement:** Each of the authors need to have made significant scientific contributions to each article, so every author is accepted as carrying equal ethical responsibility. All authors of an article are obliged to recall or make corrections in situations involving mistakes.

The authors must clearly state all types of conflict/conflict of interest in relation to topics such as other researchers studying similar topics and potential reviewers. In situations where no conflict/conflict of interest is considered to exist, this must be clearly stated.

**Blind review:** *Geol. Bull. Turkey* applies a blind review system with the aim of ensuring objective assessment of all scientific publications. In the stage of assigning reviewers for an article, care is taken that there is no conflict/conflict of interest between reviewers and author(s). With this aim, care is taken that between reviewers and author(s) a) there are no thesis advisor/student relationships, b) no common research or publications between author(s) and reviewers in the recent past (last 2 years), c) they are not employed in the same organization, d) they have not contributed to the manuscript submitted to the journal in terms of form or content, e) author(s) and reviewer have no disputes that were referred to judiciary or ethical committees, f) there is no kinship between reviewer and author(s), g) no publicly stated prejudice of the reviewer toward the author(s), h) no commercial relationship between reviewer and author(s), etc. In case of situations missed by the journal editors, the reviewers must warn the editors of such a situation. Additionally, reviewers are requested;

- To only assess articles that are within their field of expertise,
- To perform assessments unbiased, objectively and confidentially,
- To avoid bias in assessments due to reasons such as nationality, sex, religious beliefs, political leanings, commercial concerns, etc.,
- To provide opinions and recommendations within academic etiquette, with constructive and academic language, avoiding language which will create personal polemic,
- To avoid delaying assessments in a way which lengthens the publication process without reason.

### **Evaluation Process:**

**Preliminary Check (before reviewer assessment):** Firstly, manuscripts submitted to *Geol. Bull. Turkey* are reviewed by the chief editor for suitability in terms of the aims and scope of the journal. If manuscripts do not abide by the aim and scope of the journal, they are rejected within 15 days maximum and information is sent to the author. Manuscripts which are suitable for the aim and scope are first investigated for spelling, language and expression and study plan before reviewer assessment. Authors of manuscripts which are inadequate in this regard will be requested to revise the manuscript. During assessment, authors are responsible for responding to the opinions, recommendations and criticisms of the editor and reviewers. The authors must respond to questions asked based on reviewer opinions, assess opinions and recommendations, and provide positive or negative responses to criticisms with evidence in a detailed letter to the editor. Academic etiquette must be used in the letter, personal discussions should be avoided. If a corrected copy of manuscripts with revision requested in line with reviewer opinions is not received without a valid reason within 30 days, the editor reserves the right to reject the manuscript when it is re-submitted. After revisions, the revised manuscript may be sent by the editor for reviewer assessment again or may be directly accepted or rejected by the editor.

**Peer Review Process:** Manuscripts found suitable for peer review after investigating the content of all sections will be sent to the reviewers. However, articles that are not suitable for peer review for any reason will be rejected with the editor's assessment report. Information will be given to the authors within 15 days. Manuscripts sent for reviewer assessment will be sent to at least three reviewers by the editor from within or outside the journal pool according to content and area of expertise. Care will be taken about elements within the scope of conflict/conflict of interest mentioned above when determining reviewers for manuscripts. Reviewers must guarantee that they will not share any information or documents related to the review process with anyone. The duration for the review process is 30 days. Revision recommendations from the reviewers or editor must be completed by the authors within 30 days. Reviewers will investigate corrections on the article and decide on suitability or if necessary, request more revisions. The review result and opinions of reviewers will be investigated by the editor within maximum 15 days. As a result of the investigation, the editor will communicate the final decision about the manuscript to the author. Rejected manuscripts will be archived.

**Article Withdrawal:** Author(s) who wish to withdraw their manuscript during assessment must communicate a memo related to the topic with wet signature to the publication board via the journal email address [tjbdergi@gmail.com](mailto:tjbdergi@gmail.com). The Publication Board will investigate the withdrawal request and respond within maximum 15 days. Author(s) of manuscripts with request denied by the Publication Board will not be able to send their manuscript to another journal. If the author(s) become aware of any mistakes or errors related to the study after publication, in the early submission or review stages, they are obliged to cooperate with the journal editor. The author(s) must have the right to use any data which does not belong to themselves and must have documents showing necessary permissions related to the research/analysis.

The editors carefully manage processes to ensure development of the journal and increase the quality of published studies. In situations with suspicions raised about copyright or plagiarism for any manuscript in the publication stage, review stage or as unpublished manuscripts, the Publication Board of *Geol. Bull. Turkey* will begin an investigation related to the manuscript. If the investigation identifies copyright and plagiarism suspicions related to the manuscript, the Publication Board will withdraw the manuscript in the review stage making a detailed explanation and report to the author(s) within 15 days.

**Confidentiality:** All personal information in the *Geol. Bull. Turkey* system is used for scientific purposes and will not be shared with third parties.

**Disclaimer:** The chief editor and Publication Board members are not responsible for the opinions of authors or manuscript content. The authors are responsible for the ethical originality and possible errors in their manuscripts. The authors are responsible for all errors before final reading (proofreading) and that may occur when formatting pages. Errors occurring after final proofreading are the responsibility of the journal authorities.













# TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ

Geological Bulletin of Turkey

Nisan 2026 Cilt 69 Sayı 2  
April 2026 Volume 69 Issue 2

**Oğuz Mülayim**

**Yapay Zeka Destekli Araştırmalarda, Tahminin Yorumlamayı Gölgede Bıraktığı Durumlar: Jeolojide Veri Odaklı Yanılsama**

*When Accuracy Misleads Geological Interpretation: A Data-Driven Illusion..... 169*

**Semih Eski, Mehmet Akbulut**

**Remote Sensing of Listvenite Hydrothermal Alteration in Vezirler Mélange, Kula (Western Türkiye): Landsat-7 ETM+, Crosta-PCA and Band-Ratio Mapping**

*Kula (Batı Türkiye) Vezirler Karmaşığındaki Listvenitik Hidrotermal Alterasyonunun Uzaktan Algılanması: Landsat-7 ETM+, Crosta-PCA ve Bant-Oranı Haritalaması ..... 183*

**Alp Ünal**

**Güney Shetland Yayı (Batı Antarktika) Boyunca Çok Seviyeli Mafik Magma Yerleşimine Karşılaştırmalı Bir Örnek: Dee ve Cecilia İntrüzyonları**

*A Comparative Example of Multi-Level Mafic Magma Emplacement Along The South Shetland Arc (West Antarctica): The Dee and Cecilia Intrusions ..... 203*

**Okay Çimen, Cahit Dönmez**

**Nadir Toprak Elementlerinin Jeolojik Oluşum Ortamları: Dünya ve Türkiye'den Örnekler**

*Geological Formation Environments of Rare Earth Elements: Examples from Around the World and Türkiye ..... 225*

**Bülent Özmen, Bahattin Murat Demir**

**Türkiye'nin İlk Resmi Deprem Bölgeleri Haritası: 1945 Yer Sarsıntısı Bölgeleri Haritası**

*Türkiye's First Official Seismic Hazard Map: 1945 Seismic Hazard Map ..... 257*

**Yaşar Ergun Gökten**

**Re-Assessment of Seismic Risk Associated with the Furthest East of the Düzce-Kaynaşlı Segment of the North Anatolian Fault (Türkiye) Utilising Data Derived From 12 November 1999 Earthquake in the Bolu Basin (NW Anatolia)**

*Kuzey Anadolu Fayı Düzce-Kaynaşlı Segmentinin Doğusunda Sismik Riskin Yeniden Değerlendirilmesi; 12 Kasım 1999 Depreminde Bolu Havzasında (KB Anadolu) Gözlenen Etkiler ..... 273*

## Türkiye Jeoloji Bülteni makale dizin ve özleri:

Emerging Sources Citation Index (ESCI), Georef, Geotitles, Geoscience Documentation, Geo Archive, Geo Abstracts, Mineralogical Abstracts, EBSCO, SOBIAD ve ULAKBİM TR Dizin Veri Tabanlarında yer almaktadır.

## Geological Bulletin of Turkey is indexed and abstracted in:

Emerging Sources Citation Index (ESCI), Georef, Geotitles, Geoscience Documentation, Geo Archive, Geo Abstracts, Mineralogical Abstracts, EBSCO, SOBIAD and ULAKBİM TR Dizin Databases.

### Yazışma Adresi

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası  
PK. 464 Yenışehir, 06410 Ankara  
Tel: (0312) 434 36 01  
Faks: (0312) 434 23 88  
E-Posta: tjb@jmo.org.tr  
URL: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb>

### Corresponding Address

UCTEA Chamber of Geological Engineers of Turkey  
PO Box 464 Yenışehir, TR-06410 Ankara  
Phone: +90 312 434 36 01  
Fax: +90 312 434 23 88  
E-Mail: tjb@jmo.org.tr  
URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tjb>