

TÜRKİYE JEOLojİ BÜLTENİ

Geological Bulletin of Turkey

Ağustos 2026 Cilt 69 Sayı 3
August 2026 Volume 69 Issue 3

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

Düzgün ESİNA
Seçkin GÜLBUDAK
Çetin KURTOĞLU
Özgür DEĞİRMENCI
Gökhan ATICI
Zeynel Abidin GÖK
Burcu GÖRBİL

Başkan / *President*
İkinci Başkan / *Vice President*
Yazman / *Secretary*
Sayman / *Treasurer*
Mesleki Uygulamalar Üyesi / *Member of Professional Activities*
Sosyal İlişkiler Üyesi / *Member of Social Affairs*
Yayın Üyesi / *Member of Publication*

TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ
Geological Bulletin of Turkey
Yayın Kurulu / Publication Board

Baş Editör / Editor in Chief
Erdinç YİĞİTBAŞ
eyigitbas@comu.edu.tr

Editörler / Editors

Mustafa AVCIOĞLU
m_avcioglu@comu.edu.tr

İsmail Onur TUNÇ
onurtunc@comu.edu.tr

Catherine YİĞİT

İngilizce Editörleri / English Editors

Sercan Hamza BAĞLAMA

Editör Kurulu / Editorial Board

AKSOY Ercan (Elazığ, Türkiye)
ALDANMAZ Ercan (Kocaeli, Türkiye)
AYDOĞAN Mustafa Selman (Balıkesir, Türkiye)
BABA Alper (İzmir, Türkiye)
BOULTON, Sarah J. (Plymouth, Birleşik Krallık)
BOZKURT Erdin (Ankara, Türkiye)
ÇEMEN, İBRAHİM (Alabama, ABD)
EKİNCİ, Yunus Levent (Bitlis, Türkiye)
ERGİNAL, Ahmet Evren (Çanakkale, Türkiye)
EYÜBOĞLU Yener (Trabzon, Türkiye)
GÜRSOY Halil (Sivas, Türkiye)
HELVACI Cahit (İzmir, Türkiye)
KAYSERİ-ÖZER Mine Sezgül (İzmir, Türkiye)
KAZANCI Nizamettin (Ankara, Türkiye)
MÜLAYİM, Okan (Ankara, Türkiye)
NAZİK Atike (Adana, Türkiye)

OKAY, Nilgün (İstanbul, Türkiye)
ÖZDEN Süha (Çanakkale, Türkiye)
ÖZKUL Mehmet (Denizli, Türkiye)
ÖZSAYIN, Erman (Ankara, Türkiye)
PARLAK Osman (Adana, Türkiye)
ROBERTSON Alastair (Edinburg, Birleşik Krallık)
ROJAY Bora (Ankara, Türkiye)
SEYİTOĞLU Gürol (Ankara, Türkiye)
SÖZBİLİR Hasan (İzmir, Türkiye)
TAGLIASACCHI Ezher (Denizli, Türkiye)
TATAR, Orhan (Sivas, Türkiye)
ÜNLÜGENÇ Ulvi Can (Adana, Türkiye)
YALÇIN Hüseyin (Sivas, Türkiye)
YALÇIN Gürhan (Antalya, Türkiye)
YILMAZ İsmail Ömer (Ankara, Türkiye)
ZABÇI, Cengiz, (İstanbul, Türkiye)
ZAGORCHEV Ivan (Sofya, Bulgaristan)

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>

Yayın Türü	: Yaygın Süreli Yayın
Yayının 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
Yayının 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 Tarih	: Ağustos 2026
Baskı Adedi	: 500

TÜRKİYE JEOLojİ BÜLTENİ

Geological Bulletin of Turkey

Ağustos 2026 Cilt 69 Sayı 3

August 2026 Volume 69 Issue 3

İÇİNDEKİLER CONTENTS

- Çağlar Özkaymak, Muammer Can Ünsal, Hasan Sözbilir,
Doğukan Mert Özcan, İbrahim Tiryakioğlu, Halil İbrahim Solak**
**Genişlemeli Tektonik Rejimde Yeniden Aktif Olmuş Atkuyruğu Faylarına Yönelik Kinematik Kanıtlar:
Banaz Fayı ve Tektonik Anlamı, Batı Anadolu, Türkiye**
*Kinematic Evidence for Reactivated Horsetail Faults in an Extensional Tectonic Regime: The Banaz Fault and
Its Tectonic Implications, Western Anatolia, Türkiye*.....279
- Seray Çınar Yıldız, Süha Özden, Savaş Topal**
**Morphotectonic Segmentation and Uplift History of the Yalakdere Fault (NW Türkiye):
Results from χ Analysis and River Profile Inversion**
*Yalakdere Fayının (KB Türkiye) Morfotektonik Segmentasyonu ve Yükselme Geçmişi: χ Analizi ve Akarsu
Profili Ters Çözümleme Sonuçları*303
- Doğukan Mert Özcan, Çağlar Özkaymak, Volkan Karabacak
Ökmen Sümer, Furkan Şahiner, Seray Çınar Yıldız**
**İzmir-Balıkesir Transfer Zonu İçerisinde Bir Yapı: Gelenbe Fay Zonu'nun Geometrik ve
Kinematik Özellikleri**
Geometric and Kinematic Characteristics of the Gelenbe Fault Zone within the İzmir-Balıkesir Transfer Zone .. 323
- Deniz Şanlıyüksel Yücel**
**Çan İlçesinin (Çanakkale, KB Türkiye) Jeotermal Kaynakları ve Madencilik Potansiyelinin
Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi Perspektifinden Değerlendirilmesi**
*Geothermal Resources and Mining Potential of the Çan District (Çanakkale, NW Türkiye): A Sustainable
Resource Management Perspective*351
- Ferda Öner, Yaşar Arlı**
**Preliminary Results of Geological and GIS Studies from Surface Surveys at the Ancient City of Arneai
(SW Türkiye)**
Arneai Antik Kenti Yüzey Araştırmaları: Jeoloji ve CBS Çalışmalarının Ön Sonuçları (GB-Türkiye).....407
- Anıl Ardahanlıoğlu, Efe Demirci**
VEFEYÂT / OBITUARY
Dr. Korhan Esat'ın Ardından (1979- 2026)429
- Rezzan Pekcan Ekinci, Çağlayan Balkaya**
**Erratum: Estimation of Basement Relief in the Isparta Basin by Applying Spectral Filtering and Local
Optimisation-Based Inversion Techniques to Gravity Data**
*Düzeltilme: Gravite Verilerine Spektral Filtreleme ve Lokal Optimizasyon-Tabanlı Ters Çözüm Teknikleri
Uygulayarak Isparta Baseninde Temel Kaya Topografyasının Tahmini*.....435

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 JEOLojİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey



Genişlemeli Tektonik Rejimde Yeniden Aktif Olmuş Atkuyruğu Faylarına Yönelik Kinematik Kanıtlar: Banaz Fayı ve Tektonik Anlamı, Batı Anadolu, Türkiye

Kinematic Evidence for Reactivated Horsetail Faults in an Extensional Tectonic Regime: The Banaz Fault and Its Tectonic Implications, Western Anatolia, Türkiye

**Çağlar Özkaymak^{1,2}, Muammer Can Ünsal³, Hasan Sözbilir^{4,5},
Doğukan Mert Özcan^{3,*}, İbrahim Tiryakioğlu^{2,6}, Halil İbrahim Solak^{2,7}**

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
03200, Afyonkarahisar, Türkiye

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390 İzmir, Türkiye

⁵ Dokuz Eylül Üniversitesi, Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, 35390 İzmir, Türkiye

⁶ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

⁷ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü,
03200, Afyonkarahisar, Türkiye

• Geliş/Received: 09.06.2026

• Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 16.07.2026

• Kabul/Accepted: 07.08.2026

• Çevrimiçi Yayın/Available online: 26.08.2026

• Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Batı Anadolu, küresel ölçekte en hızlı genişleyen kıtasal bölgelerden biri olarak kabul edilmekte olup, Akşehir-Simav Fay Sistemi (ASFS) bu rejim içindeki sismik açıdan en aktif yapılardan birisidir. ASFS'nin kuzeybatı bölümünü temsil eden Simav Fay Zonu'nun segmentlerinden birisi olan Banaz Fayı (BF); yapısal haritalama, 11 lokasyondan elde edilen 155 fay çiziği verisinin paleogerilme analizi ve jeodezik veriler ışığında yeniden değerlendirilmiştir. Yaklaşık 37 km uzunluğundaki Banaz Fayı; Gürlek, Kızılcaören ve Derbent olarak adlandırılan üç farklı segmentten oluşan karmaşık bir yapı olarak tanımlanmıştır. Paleogerilme analizleri, yerel gerilme alanında belirgin mekânsal ve zamansal değişimler olduğunu göstermektedir. Kuzeybatıdaki Gürlek segmenti, yataya yakın σ_1 eksenini altında baskın sağ yanal doğrultu atımlı bir karakter sunar. Güneydoğuya doğru fay kavışlenerek Kızılcaören ve Derbent segmentlerine geçiş yapmakta, burada σ_1 ekseninin düşey konuma gelmesiyle mekanizma normal/oblik faylanmaya dönüşmektedir. Evrendede mevkiindeki birbirini üzerleyen kayma çizikleri, saf normal faylanmadan sağ yanal ve normal bileşenli oblik faylanmaya doğru bir geçişi ve σ_3 ekseninin zamanla saat yönünün tersine döndüğünü kanıtlamaktadır.

Jeolojik ve morfolotektonik analizler, Pliyo-Kuvaterner'den bu yana yaklaşık 0,1 mm/yıl düşey kayma hızı göstermekte olup bu değer güncel GNSS gerinim hızları (1-2 mm/yıl) ile uyumludur. Fay doğrultularına (K55°B ve K40°D) paralel gelişen sırt tipi travertenler, fayın güncel aktivitesine işaret etmektedir. Sismik tehlike analizleri, segmentlerin tek tek kırılması durumunda Mw 6,12 – 6,56 aralığında, tüm zonun eş zamanlı olarak kırılması durumunda ise Mw 6,9 büyüklüğünde bir deprem üretme potansiyeli bulunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak bu çalışma; genişlemeli rejimlerdeki atkuyruğu yapılarının üst üste binen farklı genişleme evreleri, segmentasyon kontrolü, sistematik atım dağılımı ve dinamik lokal gerilme değişimleri ile (eksen rotasyonları) geliştiğini; bu mekanizmaların ise derin hidrotermal akışkan yollarını doğrudan kontrol ettiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akşehir-Simav Fay Sistemi, at kuyruğu yapısı, Banaz Fayı, Batı Anadolu, kinematik, paleogerilme, sismik tehlike.

Abstract: Western Anatolia is widely recognized as one of the fastest-extending continental regions globally, with the Akşehir–Simav Fault System (ASFS) constituting one of the most seismically active structures within this extensional regime. Representing a segment of the Simav Fault Zone, which forms the northwestern section of the ASFS, the Banaz Fault (BF) was re-evaluated in this study based on structural mapping, paleostress analysis of 155 fault-slip data collected from 11 locations, and geodetic data. Rather than a single uniform strand, the ~ 37-km-long BF is redefined as a complex, multi-segmented structure comprising the Gürlek, Kızılcaören, and Derbent segments. Paleostress analysis reveals significant spatial and temporal variations in the local stress field. The northwestern Gürlek segment exhibits dominant right-lateral strike-slip character with sub-horizontal σ_1 axis. Southeastward, the fault traces a distinct map-view curvature into the Kızılcaören and Derbent segments, where the σ_1 axis transitions to sub-vertical position, shifting the kinematic mechanism to normal and oblique-slip faulting. Superimposed slickenlines at the Evrendede locality preserve a transition from older, pure normal faulting to younger, right-lateral oblique normal faulting, confirming dynamic, counter-clockwise rotation of the σ_3 axis over time.

Geological and morphotectonic analyses yield a long-term vertical slip rate of 0.1 mm/yr since the Plio-Quaternary, which is consistent with contemporary GNSS strain rates (1-2 mm/yr). The active status of the BF is further substantiated by newly-documented ridge-type travertines running strictly parallel to the fault strike (N55°W and N40°E). Seismic hazard assessments indicate that while individual segments have the capacity to generate earthquakes ranging from $M_w = 6.12$ to 6.56, full-segment rupture encompassing the entire zone poses a major seismic risk with potential magnitude of $M_w = 6.9$. Ultimately, this study demonstrates that extensional horsetail structures mature via superimposed extensional phases, structural segmentation control, systematic displacement partitioning, and dynamic local stress variations (axis rotations), mechanisms that directly dictate deep hydrothermal fluid circulation pathways.

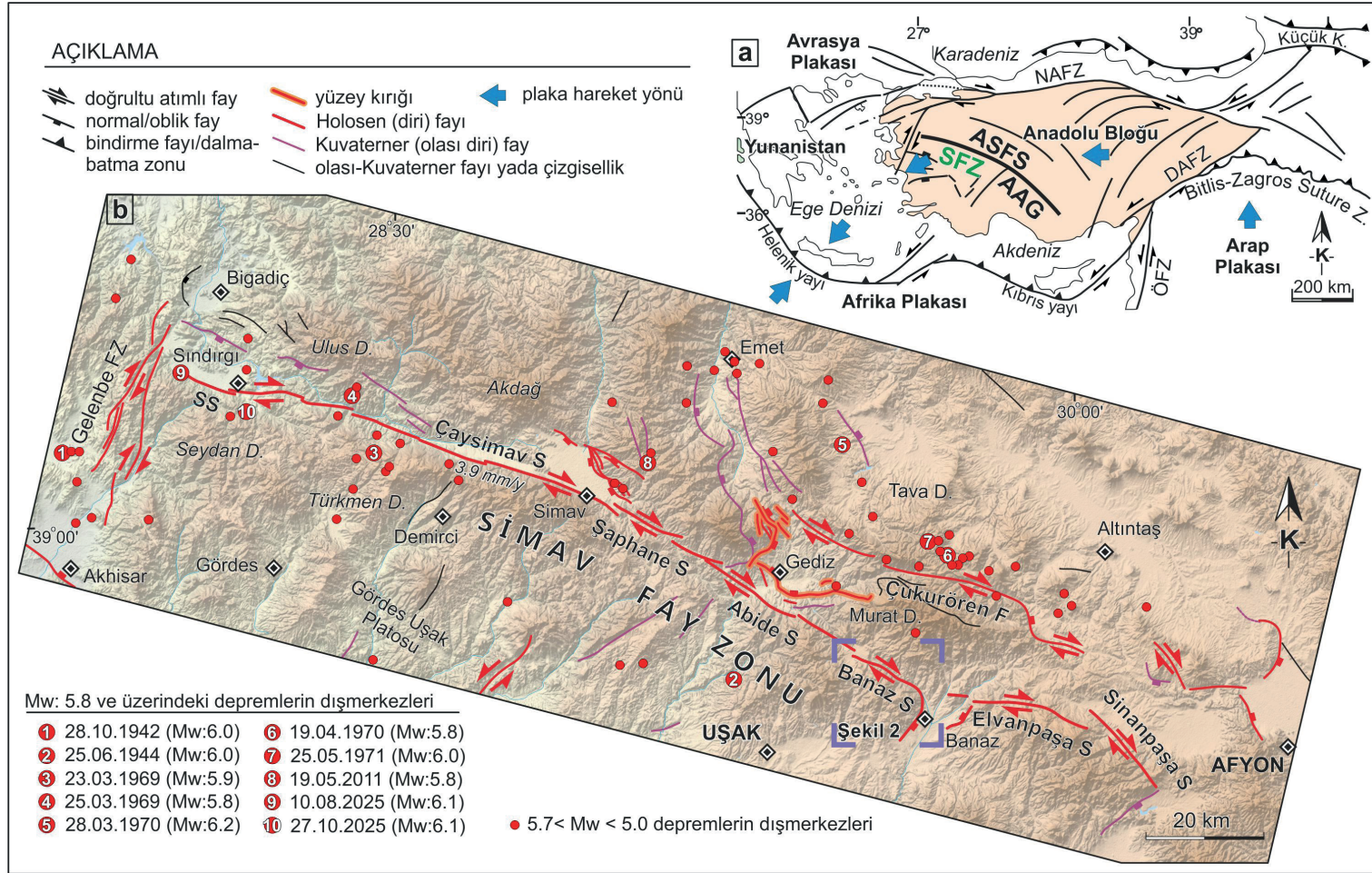
Keywords: Akşehir-Simav Fault System, Banaz Fault, kinematics, horsetail structure, paleostress, seismic hazard, Western Anatolia.

GİRİŞ

At kuyruğu (horsetail) yapıları, doğrultu atımlı fayların uçlarında gelişen genişlemeli veya sıkışmalı fay geometrileri olarak kabul edilir (Cabrera vd. 1988). Sıkışmalı yapılar boyunca sırtların oluşumuyla sonuçlanırken, genişlemeli yapılar derin kökenli akışkanların yerleşmesine izin veren çökme alanları ve sıçramalar (jogs) olarak dikkat çeker (Kim ve Sanderson, 2006). Bu nedenle, bu yapılar hem madencilik hem de enerji kaynağı aramalarında hedef alanlardır. Ayrıca sismik açıdan, ana fay segmenti üzerinde biriken gerilmenin at kuyruğu fayları arasında paylaşıldığı alanlar olarak da bilinirler (Xu vd. 2024). Genişlemeli tektoniğin etkisi altında deforme olan Batı Anadolu, bu tür yapıların gözlemlendiği önemli bölgelerden biridir (Şekil 1a). Batı Anadolu'yu KB-GD doğrultusunda kesen Akşehir-Simav Fay Sistemi boyunca yer alan ana fay segmentlerinin uçlarında bu yapıları gözlemlmek mümkündür (Şekil 1b). Sistemin batı kısmını oluşturan Simav

Fay Zonu (SFZ)'nin güneydoğu ucunda yer alan Banaz Fayı, genişlemeli tektonik rejimlerde gelişen at kuyruğu yapısına iyi bir örnek teşkil etmektedir.

Banaz Fayı'nın bulunduğu bölgede çeşitli jeolojik araştırmalar yapılmış olsa da fayın aktif tektonik, jeomorfolojik ve paleogerilme analizleriyle ilgili veriler kısıtlıdır. Özellikle fayın geometrik segmentasyonu ve kinematik davranışı üzerindeki farklı görüşler ve veri eksikliği, bölgedeki gerilme kuvvetlerinin tam olarak anlaşılabilmesi ve değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca birçok araştırmacı, Uşak-Afyonkarahisar arasında gelecekte yıkıcı bir deprem üretebilecek bir sismik boşluğun varlığına dikkat çekmektedir (Koçyiğit vd., 2002, Koçyiğit, 2007 ve Tiryakioğlu vd., 2024). Bu doğrultuda çalışma, Banaz Fayı'nın segment yapısını ve kinematik özelliklerini ayrıntılı saha verilerine dayanarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. a) Doğu Akdeniz bölgesinin neotektonik yapısı (Özkaymak, 2015; Özkaymak vd., 2019'dan derlenmiştir). Kısaltmalar: AAG: Afyon-Akşehir Grabeni; ASFS: Akşehir-Simav Fay Sistemi; DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu; KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu; SFZ: Simav Fay Zonu. **b)** Simav Fay Zonu'nun segmentlerini ve sismotektonik özelliklerini gösteren harita (faylar Emre vd., 2013'ten; deprem verileri KRDAE, 2026; AFAD, 2026'dan alınmıştır).

Figure 1. a) Neotectonic structures in the Eastern Mediterranean region (compiled from Özkaymak, 2015; Özkaymak et al., 2019). Abbreviations: AAG, Afyon-Akşehir Graben; ASFS, Akşehir-Simav Fault System; DAFZ: East Anatolian Fault Zone (EAFZ); KAFZ: North Anatolian Fault Zone (NAFZ); SFZ: Simav Fault Zone. **b)** Map showing the segments and seismotectonic characteristics of the SFZ (faults are taken from Emre et al., 2013; earthquake data are taken from KRDAE, 2026 and AFAD, 2026).

Bu amaçla, söz konusu jeolojik yapı 1/25.000 ölçeğinde haritalanmış ve yapıyı oluşturan fay segmentlerindeki gerilme eksenlerinin konumlarını belirlemek amacıyla kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler fayın karakterinin ortaya konulması, deprem üretme potansiyelinin belirlenmesi ve bölgenin aktif tektonik evriminin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Bununla beraber, SFZ boyunca bu tür asimetrik atkuyruğu geometrilerinin ve segment sınırlarının doğru tanımlanması, hem bölgedeki deprem tehlikesinin (sismik boşlukların) doğru analiz edilmesi hem de derin jeotermal/hidrotermal akışkan göç yollarının ve rezervuarlarının tespit edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bölgesel Jeoloji ve Tektonik

Doğu Akdeniz’de Helenik yayı kuzeyindeki yay gerisi genişleme ile Anadolu Bloğu’nun Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca batı/güneybatıya doğru kaçış mekanizması, Batı Anadolu’da genişlemeli bir neotektonik rejimin gelişmesine yol açmış ve Dünya’daki en hızlı genişleyen kıtasal alanlardan biri haline getirmiştir (McKenzie, 1978; Le Pichon ve Angelier, 1979; Şengör vd., 1985; Seyitoğlu ve Scott, 1991; Koçyiğit vd., 1999; Yılmaz ve Gürer, 2024) (Şekil 1a). Akşehir-Simav Fay Sistemi (ASFS), bu genişlemeli rejim içerisinde yaklaşık 400 km uzunluğunda, sismik olarak oldukça aktif bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Koçyiğit ve Deveci, 2005; 2007, Tiryakioğlu vd., 2015; 2018; Özkaymak vd., 2017; 2019) (Şekil 1b). Bu sistem içerisinde çok segmentli bir yapıda olan Simav Fay Zonu (SFZ), Sındırgı (Balıkesir) ile Sinanpaşa (Afyonkarahisar) arasında KB-GD genel uzanımında yaklaşık 200 km boyunca morfolojik olarak belirgindir. Bu zon, Emre vd. (2013, 2018) tarafından, Sındırgı, Çaysımav, Şaphane, Abide, Banaz, Elvanpaşa ve Sinanpaşa gibi yedi ana segmente ayırmıştır (Şekil 1b). Tarihsel dönemden beri sismik olarak aktivitesi bilinen SFZ ve

yakın çevresi boyunca, aletsel dönem içerisinde büyüklüğü 5,8 ve 6,2 arasında çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Şekil 1b). Zon boyunca son yıllarda meydana gelen 19 Mayıs 2011 Simav Depremi (Mw: 6,0) ve 10.08.2025 ve 27.10.2025 Sındırgı depremleri (Mw: 6,1) bölgenin sismik olarak aktif yapısını belgeleyen önemli depremlerdir (Tiryakioğlu vd., 2026; Sözbilir vd., 2026) (Şekil 1b). Ayrıca, SFZ’nin segment bazında üretebileceği maksimum deprem büyüklüğü 7,1 olarak hesaplanmış olup (Duman vd. 2018), GNSS verileri, kısa dönem kayma hızının 3,9 mm/yıl olduğunu göstermektedir (Aktuğ vd., 2009). SFZ’nin 2013 yılında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritasında (TDFH) diri fay statüsünde tanımlanmasına ve aletsel dönem deprem aktivitesine göre, zon boyunca istatistiksel olarak yaklaşık her 9 yılda bir yıkıcı deprem meydana gelmesine rağmen literatürde, SFZ’nin kinematik davranışına yönelik farklı görüşler bulunmaktadır. Banaz bölgesinde fayın oblik atımlı normal fay niteliğinde olduğu ileri sürülürken (Koçyiğit, 2007), güncellenen Türkiye Diri Fay Haritası ve sonraki çalışmalar SFZ’nin sağ yanal doğrultu atımlı bir karaktere sahip olduğuna işaret etmektedir (Emre vd., 2013; 2018; Duman vd., 2013, 2018). Buna karşılık, SFZ boyunca gerçekleştirilen jeolojik ve jeodezik çalışmalar, yaklaşık kuzey-güney yönlü genişleme rejimi altında gelişen normal faylanmaya ilişkin bulgular ortaya koymuştur (Gürboğa, 2013; Demirci vd., 2015; Dönmez ve Tiryakioğlu, 2018). Öte yandan, SFZ içerisindeki Çaysımav ve Şaphane segmentlerinde yürütülen paleosismolojik hendek çalışmaları, bu segmentlerin Holosen dönemindeki aktivitesinin sağ yanal doğrultu atımlı faylanma karakteri taşıdığını göstermektedir (Duman vd., 2013).

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında yürütülen araştırmalar; (i) uzaktan algılama, (ii) 1/25.000 ölçekli jeolojik

haritalama ve (iii) yapısal jeoloji (kinematik analiz) olmak üzere üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ön hazırlık aşamasında, Banaz Fayı ve yakın çevresinin morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Google Earth veri tabanında yer alan yüksek çözünürlüklü (Quickbird, Ikonos vb.) uydu görüntüleri kullanılmıştır. Bu görüntüler üzerinde fayın oluşturduğu çizgisel süreksizlikler, ötelenmiş drenaj kanalları ve fay sarplıkları gibi morfolojik göstergeler tespit edilmiştir. Ayrıca, bölgenin topografik analizlerini gerçekleştirmek ve üç boyutlu morfolojik yapıyı incelemek amacıyla SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) verilerinden üretilen Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) kullanılmıştır.

Saha çalışmaları kapsamında, Banaz Fayı ve civarında yüzlek veren litolojik birimlerin ve yapısal unsurların 1/25.000 ölçeğinde haritalanması yapılmıştır. Bu amaçla Uşak K23-a3, K23-a4 ve K23-d2 topografik harita paftaları altlık olarak kullanılmıştır. Haritalama sırasında birimlerin stratigrafik ilişkileri, dokanak özellikleri ve faya bağlı gelişen ikincil yapılar incelenerek bölgenin detaylı jeoloji haritası ve enine kesitleri oluşturulmuştur. Banaz Fayı'nın kinematik evrimini ve gerilme rejimini belirlemek amacıyla, fay düzlemleri üzerinde 11 farklı lokasyonda ölçümler yapılmıştır. Saha gözlemleri sırasında fay düzlemlerinin doğrultu ve eğimi ile bu düzlemler üzerindeki kayma çizikleri (striations), oluklar ve kertikler (fault groove/fault notch) ölçülmüştür. Farklı kinematik hareketlerin bağlı yaşları, kesen-kesilen yapı ilişkisine göre yapılmıştır. Elde edilen veriler; Angelier'in (1984, 1991, 1994) gerilme terslenme yöntemini kullanan BRUTE3 bilgisayar programı (Hardcastle ve Hills, 1991) ile kinematik analizler için geliştirilen FaultKinWin yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu analizlerle üç asal gerilme ekseninin (σ_1 , σ_2 , σ_3) konumları ve eksenel oran (Φ) hesaplanarak bölgedeki hakim tektonik rejim tanımlanmıştır. Gerilme rejimi, bu eksenlerin konumuna göre yapılmaktadır. En büyük asal gerilme eksen (σ_1) düşey düzlemde

iken genişlemeli, orta asal gerilme eksen (σ_2) düşey düzlemde iken doğrultu atımlı ve en küçük asal gerilme eksen (σ_3) düşey düzlemde iken sıkışmalı tektonik rejim söz konusudur (Angelier 1984; 1991; Özkaymak, 2013). Delvaux vd. (1997) gerilme rejiminin 0 ile 1 değerleri arasında değişen gerilim oranının fonksiyonuna bağlı olarak değiştiğini önermektedir: dairesel genişleme (σ_1 düşeyde, $0 < \phi < 0,25$), saf genişleme (σ_1 düşeyde, $0,25 < \phi < 0,75$), transtansiyon (σ_1 düşeyde, $0,75 < \phi < 1$ ya da σ_2 düşeyde, $1 > \phi > 0,75$), saf doğrultu atımlı (σ_2 düşeyde, $0,75 > \phi > 0,25$), transpresyonel (σ_2 düşeyde, $0,25 > \phi > 0$ ya da σ_3 düşeyde, $0 < \phi < 0,25$), saf sıkışma (σ_3 düşeyde, $0,25 < \phi < 0,75$) ve dairesel sıkışma (σ_3 düşeyde, $0,75 < \phi < 1$).

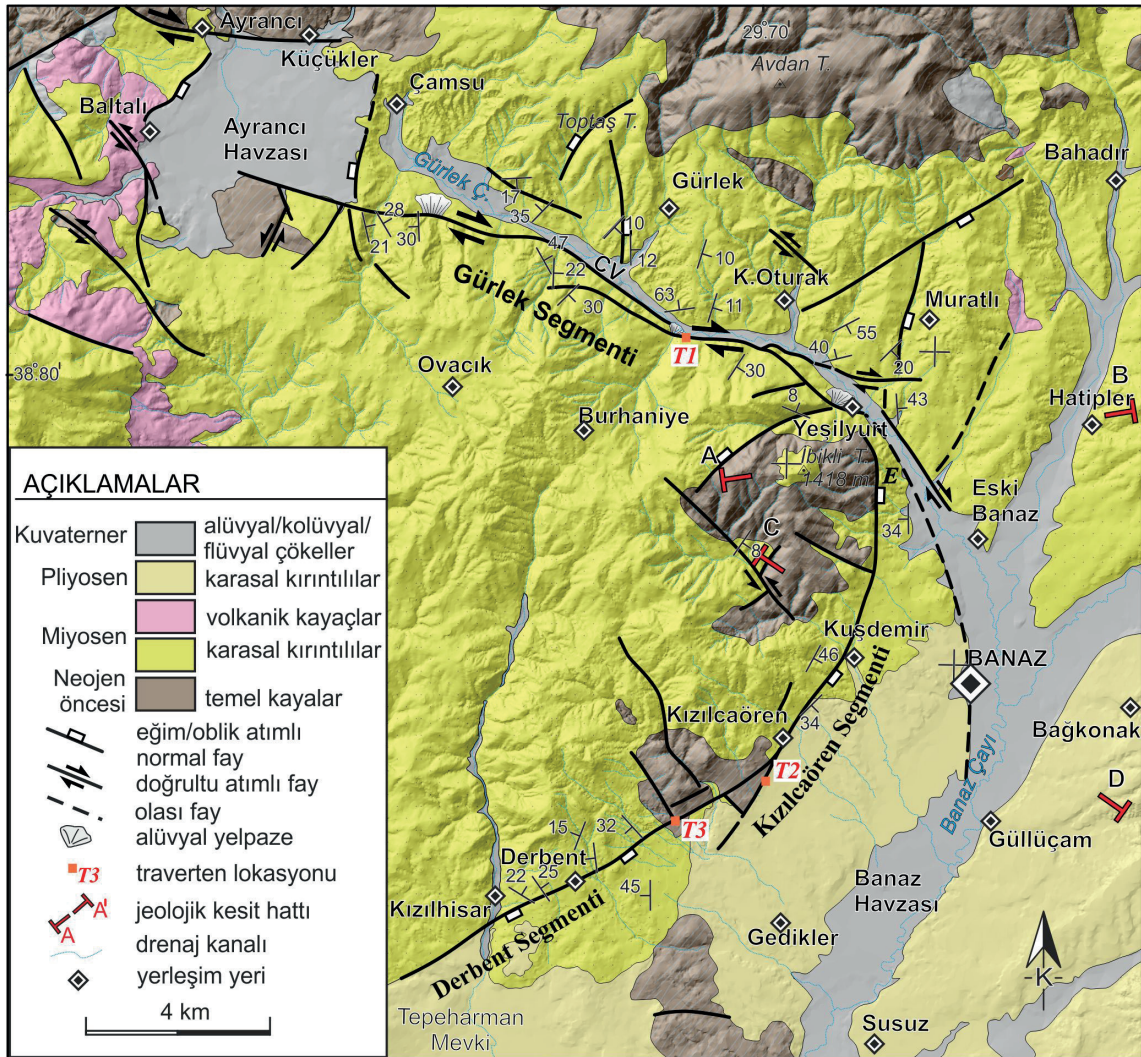
BULGULAR

Banaz Fayı

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Banaz Fayı ilk defa Koçyiğit (2007) tarafından Gürlek, Kızılcaören ve Derbent fayları şeklinde isimlendirilerek haritalanmış ve tanımlanmıştır. Şaroğlu vd. tarafından 1992 yılında hazırlanan TDFH'de yer almayan bu fay, 2013 yılında güncellenen TDFH'de SFZ'ye ait diri segmentlerden birisi olarak "Banaz Segmenti" adı ile yer almıştır. Fay kuzeybatıda Baltalı ile Yeşilyurt arasında Gürlek Çayı'nın aktığı Comburt Vadisi (CV) boyunca doğrusal bir geometri sunarken, Yeşilyurt ile Kızılcahisar arasında doğuya kavis yapan bir yay geometrisi sergilemektedir (Emre vd., 2013) (Şekil 2). Tiryakioğlu vd. (2024) tarafından 2016-2023 yılları arasında gerçekleştirilen kampanya ölçülerine göre bölge, 20-30 mm/yıl hızlarla güneybatı yönünde hareket etmektedir. Aynı çalışmada 40-50 ns/yıl arasında hesaplanan yamulma analizine göre Banaz Segmenti ve yakın civarında KKD-GGB doğrultulu açılmalar görülmektedir. Bölgenin sismik geçmişi incelendiğinde, Banaz Fayı boyunca aletsel dönemde yıkıcı bir deprem kaydı bulunmamaktadır. Bununla beraber, 1970 yılından

günümüze kadar olan dönemde büyüklükleri 1,2 ve 4,8 arasında olan toplam 71 deprem kayda geçmiştir (KRDAE, 2026). Bu depremlerden büyüklüğü 4 üzerinde olan 9'u 1970 – 1973 yılları arasında gerçekleşmiştir. Tarihsel dönem kayıtlarına göre ise, 30 Eylül 1887 Banaz depremi ($M_s:6,3$) en önemli olay olarak öne çıkmaktadır (Ambraseys, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998;

Duman vd., 2018, Satılmış, 2016). Bu depremin $M_s: 6,3$ büyüklüğünde olduğu (Ambraseys ve Jackson, 1998), deprem sırasında Comburt vadisi boyunca KB-GD doğrultusunda, yaklaşık 10 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuş olabileceği ve Banaz ile çevre köylerde büyük bir yıkım yaşandığı ifade edilmektedir (Satılmış, 2016).



Şekil 2. Banaz Fay Zonu ve yakın çevresinin jeoloji haritası. (Saha çalışmaları ile ulaşılamayan alanların jeolojik özellikleri Bingöl, 1974; Bingöl, 1977; Ercan vd., 1978; Akdeniz ve Konak, 1979; Leflef, 1980 çalışmalarından düzenlenmiştir). Kısaltmalar, CV: Comburt Vadisi; E: Evrendede Mevkii.

Figure 2. Geological map of the Banaz Fault Zone and immediate vicinity. (Geological features of areas inaccessible in field studies were compiled from Bingöl, 1974; Bingöl, 1977; Ercan et al., 1978; Akdeniz and Konak, 1979; Leflef, 1980). Abbreviations, CV: Comburt Valley; E: Evrendede locality.

Çalışma Alanının Jeolojik Özellikleri

Bölgede yüzlek veren birimler; Neojen öncesi temel kayalar (NÖT), Neojen yaşlı karasal sedimanter ve volkanik birimler ile Kuvaterner yaşlı çökeller olarak üç ana grupta toplanmaktadır (Şekil 2). İnceleme alanı, Batı Anadolu'nun tektonik evriminde kritik bir role sahip olan metamorfik kuşaklardan Menderes Masifi ile Afyon Zonu'nun sınırında yer almaktadır. Bu nedenle, çalışma alanında her iki kuşağa ait birimler de yüzylemektedir. NÖT, baskın olarak Paleozoyik yaşlı kristalize kireçtaşları ve şistler ile temsil edilmektedir. Üst Kretase yaşlı Murat Dağı Melanji (Bingöl, 1977), temel kayaçlar içerisinde geniş yayılım sunar ve harzburjit, serpantinit, dunit ile radyolarit/çört bloklarını içerir. Çalışma alanının kuzeybatı bölümünde Ayrancı ve Küçükler köyleri çevresinde; orta bölümünde Yeşilyurt Köyü güneyinde; güney bölümünde ise Kızılcaören ve Derbent köylerinin arasındaki bölgede gözlenmektedir. Koyu yeşilimsi ve siyahımsı renkli Murat Dağı Melanjına ait serpantinit kayaları ile Paleozoyik birimlerin ilişkisi tektoniktir. NÖT, üst seviyelerde Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal kırıntılılar ve volkanitler tarafından uyumsuz olarak örtülür. Tabanda metamorfik ve ofiyolitik kökenli çakıllardan oluşan flüviyal konglomera ile baskın karasal kırıntılılar üst seviyelere doğru görsel kumtaşı, silttaşı ve marn aralanması sunar (Ercan vd. 1978). Çalışma alanında oldukça geniş bir alanda yüzlek veren kırıntılılar, baskın olarak andezit ve trakiandezit bileşimli lav ve aglomeralardan oluşan Miyosen yaşlı volkanik istif ile yanal geçişlidir. Çalışma alanında gözlenen Neojen yaşlı birimler stratigrafik olarak üzerlerinde uyumsuz olarak yer aldıkları Miyosen öncesi temel kayaçlar ile çoğunlukla yapısal kontrollü olarak yan yana gelirler (Şekil 3). Kızılcaören Segmenti'nin yükselen bloğunda yer alan 1418 metre rakımlı İbikli Tepe'de temel kayaçları uyumsuz olarak üzerleyen Miyosen sedimanlarının tabanı yaklaşık 1300 metre rakımda gözlenmektedir. Bu noktadan

yaklaşık 1,2 km doğuda yer alan Kızılcaören Segmenti'nin düşen bloğunda ise, aynı sedimanların taban seviyesi yaklaşık 800 metre rakımında yer almaktadır (Şekil 3a). Bu verilere göre Miyosen sonrası (Pliyosen ve Kuvaterner) düşey yer değiştirme dikkate alındığında fay üzerindeki uzun dönem düşey kayma hızı yaklaşık 0,1 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Kuvaterner birimler, Comburt Vadisi ve Banaz Çayı'nın beslediği havza ve çevresinde geniş yayılım sunan alüvyal yelpaze çökelleri, flüviyal çökeller ve güncel havza dolgusu ile belirgindir (Şekil 2, 3a ve b). Alüvyal yelpaze çökelleri Comburt Vadisi'ni güneyden sınırlayan segment üzerinde Yeşilyurt, Höyük Deresi güneyi ve T1 lokasyonu (Şekil 2) yakın batısında gözlenmektedir. Bu alanlarda kaba kırıntılılar içeren çökelleri, Miyosen yaşlı birimleri uyumsuz olarak üzerler ve Comburt vadisini besleyen derelerin flüviyal çökelleri (Şekil 4a) ile yanal geçişli olarak gözlenirler. Güncel havza dolgusu genel olarak Ayrancı ve Banaz havzalarındaki düzlük alanlarda gözlenen alüvyal birimler ile temsil edilmektedir. Bununla beraber, BFZ segmentleri üzerinde 1/25.000 ölçeğinde haritalanamayacak boyutta, tabaka kalınlıkları birkaç cm olan sırt tipi travertenler saptanmıştır. Comburt vadisi içerisinde Banaz Fayı'nın genel doğrultusuna yaklaşık paralel uzanan ve Şekil 2'de T1 ile gösterilen sırt tipi travertenin merkezi çatlak doğrultusu K55°B olarak ölçülmüştür (Şekil 4b). Bu bölgede fayın gidişi K60-70°B arasındadır. T1 ile simgelenen traverten çökelleri, Miyosen yaşlı karasal kırıntılıları kesen kırık üzerinde çökelmiştir. Sırt tip travertenlere ait diğer ölçüm, çalışma alanının güney bölümünde Kızılcaören – Derbent yerleşim alanları arasında kalan, Şekil 2'de T2 ile gösterilen İçmeler mevkiinde yapılmış ve sırt doğrultusu K40°D olarak ölçülmüştür (Şekil 4c). Bu bölgede fayın gidişi K30-60°D arasında değişmektedir. T2 bölgesinde traverten çökelleri, NÖT ile Pliyosen yaşlı kırıntılıları yan yana getiren fay kolu üzerinde gözlenmiştir. Şekil 2'deki T3 lokasyonunda daha dar bir

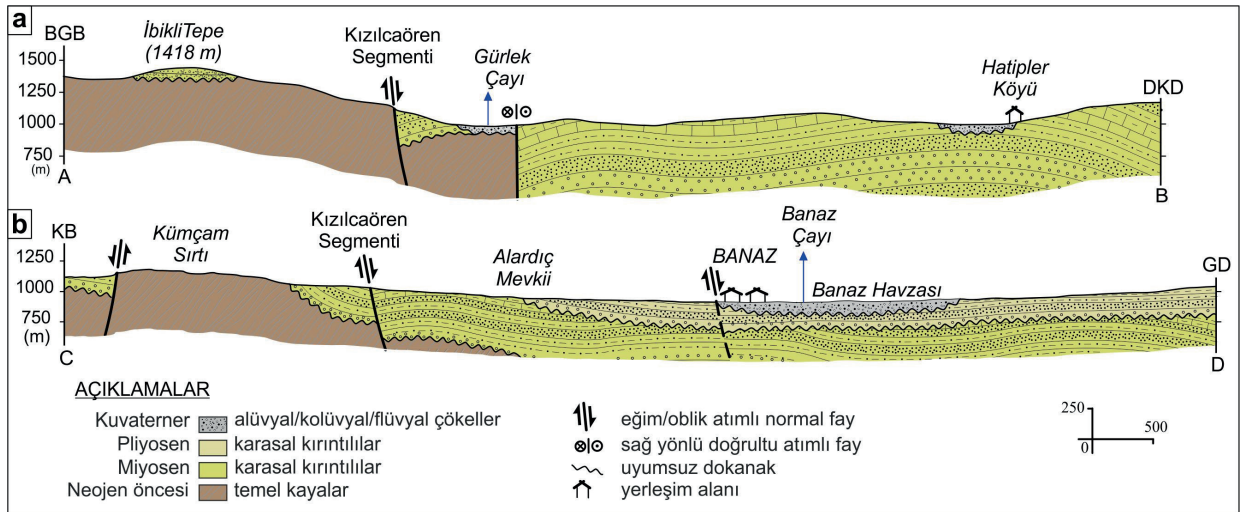
alanda gözlenen traverten çökelleri üzerinde ölçüm alınamamıştır. Ancak bu lokasyondaki traverten oluşumları Neojen öncesi temel kayalar ile Miyosen karasal kırıntılılar arasındaki fay üzerinde gözlenmiştir. T3 travertenleri, BFZ'nin yaklaşık K65°D uzanımı kolu ile fayın yükselen bloğunda haritalanan K30°B uzanımlı fayın kesiştiği alanda haritalanmıştır. Travertenlerin lokasyonları ile haritalanan fayların yeri ve geometrileri karşılaştırıldığında, travertenlerin tektonik kontrollü olduğu ve genellikle birden fazla fay kolunun birleştiği alanlarda olduğu gözlenmektedir. Travertenlerin tabaka kalınlıkları birkaç cm'yi geçmez ve ince kristalli bantlı travertenler şeklinde gözlenir. Travertenler üzerinde yapılan gözlemlere göre, merkezi çatlaklar bantlı travertenlerle doldurulmuş ve merkezleri boyunca açıklık görülmemektedir. Fay üzerinde oluşan bu travertenler ve bunların oluşum yaşları üzerine literatürde herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Bununla beraber, Koçyiğit (2007) tarafından gerçekleştirilen saha çalışmalarında ilgili faylar üzerinde olmasa

da yakın çevrede sırtı tipi traverten oluşumu ve sıcak su kaynaklarından (örneğin: Banaz Havzası kuzeydoğusundaki Burak Kaplıcası gibi) bahsedilmektedir.

Segment Özellikleri ve Fay Geometrisi

Bu çalışmada haritalanan fayların yüzey geometrileri ve kinematik özellikleri dikkate alınarak, Emre vd. (2013; 2018) tarafından Banaz Segmenti olarak isimlendirilen yapı Banaz Fayı olarak adlandırılmış; Gürlek, Kızılcaören ve Derbent olarak isimlendirilen 3 farklı segmente ayrılmıştır (Şekil 2). Segment isimlendirmelerinde fayları ilk defa tanımlayan Koçyiğit (2007) çalışmasında verilen isimlere sadık kalınmıştır.

SFZ'ye ait yaklaşık D-B uzanımlı Abide Segmenti, çalışma alanının kuzeyindeki Ayrancı Havzası'nı kuzeyden sınırlayarak, Küçükler Köyü civarında benzer doğrultudaki Banaz Fayı'nın Gürlek Segmenti'ne sıçrama yapar. Bu sıçrama Ayrancı çek-ayır havzasının oluşumu ile de belirgindir. Saha çalışmaları



Şekil 3. a) A-B ve b) C-D kesit hatları boyunca jeolojik birimlerin stratigrafik ve yapısal ilişkisini gösteren enine jeolojik kesitler. (Kesit hatları için Şekil 2'ye bakınız)

Figure 3. Geological cross-sections along the A-B (a) and C-D (b) section lines showing the stratigraphic and structural relationships of geological units (See Figure 2 for section lines).



Şekil 4. Saha çalışmalarında ait arazi fotoğrafları: a) Comburt vadisi içerisinde gözlenen asılı kalmış genç flüviyal çökeller b) T1, c) T2 lokasyonunda gözlenen sırt tipi traverten çökelleri. Beyaz dolgulu oklar sırt doğrultularını göstermektedir. (Lokasyonlar için Şekil 2'ye bakınız)

Figure 4. Field photographs from geological fieldwork: a) Young fluvial deposits observed within the Comburt Valley, b) T1, and c) T2 sites showing ridge-type travertine deposits. White arrows indicate the orientations of the ridges (See Figure 2 for locations).

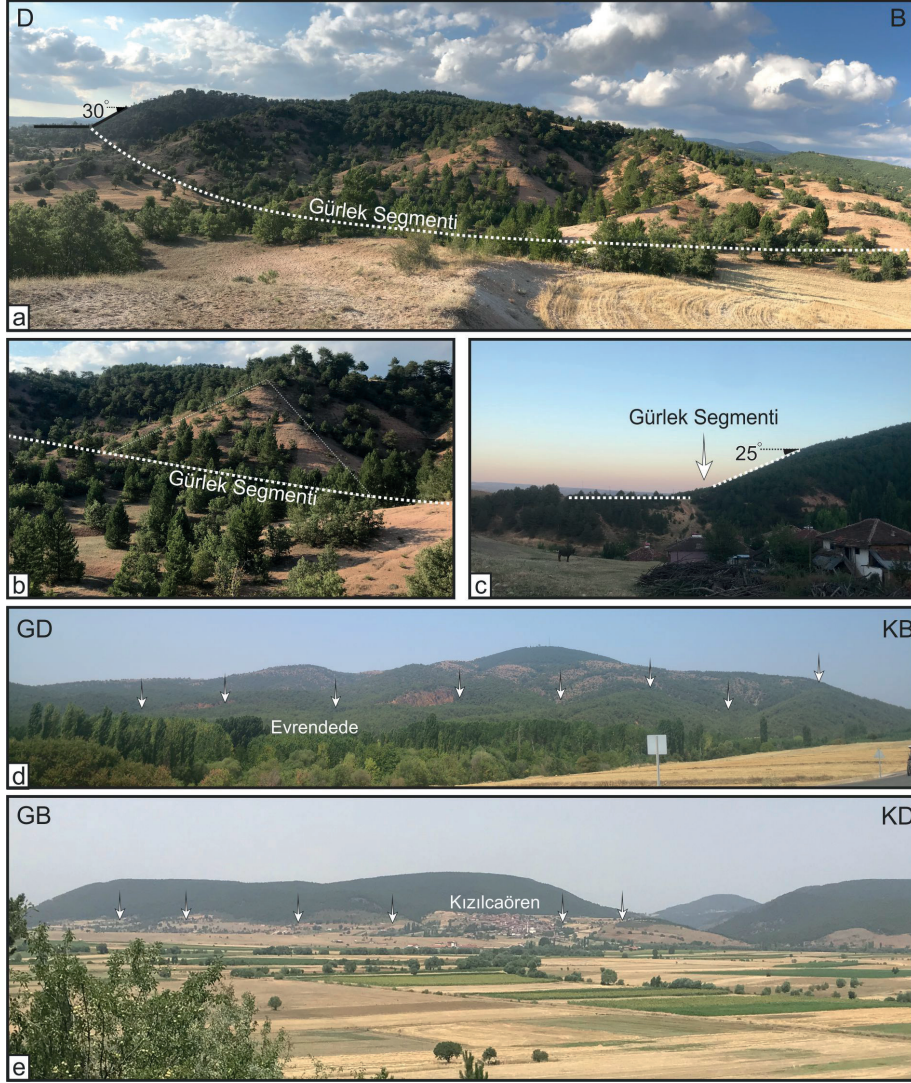
Ayrancı Havzası'nın doğu ve batı kenarlarının ana fay zonuna yaklaşık dik konumlu normal faylar ile kontrol edildiğine işaret etmektedir (Şekil 2).

Gürlek Segmenti, kuzeybatıdaki Baltalı köyü ile doğuda Eski Banaz köyü arasında, BKB-DGD genel uzanımında, yaklaşık 1,5 km genişliğinde ve 19 km uzunluğunda normal bileşene sahip sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay segmentidir. Kuzeybatıda Ayrancı Havzası'nı K80°B uzanımında güneyden sınırlayan segment, doğuya

doğru dalgalı bir geometri sunarak Gürlek köyü güneyinde K60°B doğrultusuna dönüş yapar. Bu alanda yaklaşık 3 km boyunca birbirine paralel/yarı paralel iki fay kolu ile temsil edilir. En kuzeydeki kol Miyosen yaşlı gölsel kırıntılılar ile Comburt Vadisi'nin genç çökelleri arasındaki yapısal sınırı oluşturur. Güneydeki kol ile kuzeydeki kolun birleştiği alandan itibaren (T1 traverteni) batıya doğru yaklaşık D-B doğrultusunda devam eden segment, Yeşilyurt Köyü yakın batısında iki kola

ayrılarak birkaç km doğuda sonlanır. K60°B doğrultusuna dönen güney kol Yeşilyurt yerleşim alanı yakınından geçer. Bu kol boyunca üçgen yüzey oluşumları, dağ önündeki eğim kırılması ve

alüvyal yelpaze oluşumu belirgindir (Şekil 5a, b ve c). Kuzeydeki kol ise yaklaşık D-B uzanımında devam ederek Muratlı güneyinde sonlanır.



Şekil 5. Saha çalışmalarına ait arazi fotoğrafları: **a)** Comburt Vadisi boyunca haritalanan Gürlek Segmenti'nin genel görünüşü, **b-c)** Gürlek Segmenti boyunca üçgen yüzey oluşumu ve topografik eğim kırılmasını gösteren fotoğraflar, **d)** Kızılcaören Segmenti'nin Evrendede mevki civarında gözlenen büyük fay sarplıkları ve morfolojik izini gösteren panoramik arazi fotoğrafı, **e)** Kızılcaören Segmenti'nin Kızılcaören yerleşim alanı yakınından geçtiği çizgisel gidişli dağ önünü gösteren fotoğraf.

Figure 5. Field photographs from geological fieldwork: **a)** General view of the Gürlek Segment mapped along the Comburt Valley, **b-c)** Triangular facets and topographic slope breaks observed along the Gürlek Fault, **d)** Panoramic field photograph showing major fault scarps and morphological trace of the Kızılcaören Segment observed around the Evrendede locality, **e)** The linear mountain front where the Kızılcaören Segment passes beneath Kızılcaören settlement area.

Kızılcaören Segmenti, kuzeyde Yeşilyurt ile güneyde Gedikler köyleri arasında yaklaşık 10 km uzunluğunda KKD-GGB genel uzanıma ve genel olarak güneydoğuya eğimli oblik atımlı normal bir faydır (Şekil 2). Fayın yüzey geometrisi genel olarak doğuya bakan bir yay geometrisi sunar. En kuzeyde K20°B doğrultusuna sahip ve temel kayalar ile Miyosen kırıntılılar arasındaki sınırı oluşturan segment güneye doğru yaklaşık K-G doğrultusu kazanır. Kuşdemir ile Kızılcaören yerleşim alanları yakınlarında yaklaşık K30°D doğrultusunda devam eden segment morfolojik olarak sarpıklık ve çizgisel gidişli dağ önü ile belirgindir (Şekil 5d ve e). Daha güneybatıda, doğrultusunu değiştirmeden Gedikler Köyü kuzeydoğusundaki düzlük alan içerisine girer ve bu noktadan daha güneyde takip edilemez. Derbent Segmenti ise, Kızılcaören ile Tepeharman Mevki arasında 8 km uzunluğunda, yaklaşık K60°D uzanımlı doğrusal bir geometriye sahiptir ve eğim atımlı normal fay karakterindedir. Bu alanda Kızılhisar ve Derbent yerleşim alanları yakınlarından geçer ve morfolojik olarak belirgin

sarpıklık sunar. En güneybatıda, Miyosen ve Pliyosen yaşlı sedimanları birbirinden ayıran çizgisel bir geometri ile tipiktir.

Fay uzunluğu ile oluşturabileceği maksimum deprem büyüklüğü arasındaki Wells ve Coppersmith'in (1994) kuramsal formülüne göre, bu çalışmada haritalanan fay segmentlerinden Gürlek Fayı Mw: 6,56 Kızılcaören Fayı Mw: 6,24 ve Derbent Fayı Mw: 6,12 maksimum büyüklüğünde deprem üretme potansiyeline sahiptir. Tüm segmentlerin aynı anda kırılmasını içeren çoklu segment kırılması durumunda ise BFZ'nin toplam 37 km uzunluğunda olduğu esas alınarak, meydana gelebilecek maksimum deprem büyüklüğü Mw: 6,9 olarak hesaplanmıştır.

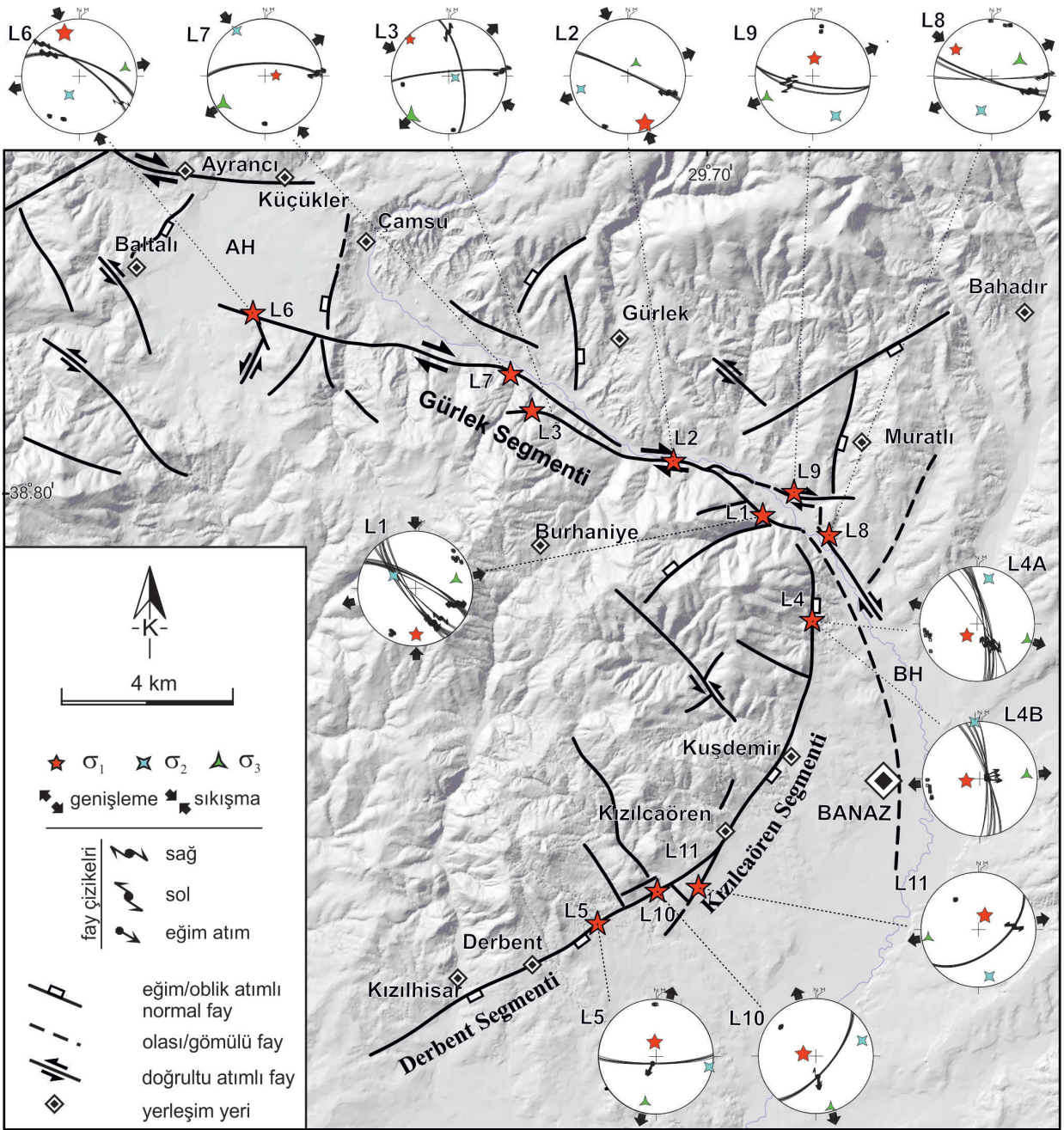
Paleogerilme Analiz Sonuçları

Banaz Fayı'nın paleogerilme analizinin yapılabilmesi ve gerilim yönlerinin hesaplanabilmesi amacıyla, çalışma alanında 11 farklı lokasyondan toplamda 155 adet kinematik veri toplanmıştır (Çizelge 1, Şekil 6).

Çizelge 1. Çalışma alanı içerisindeki segmentler boyunca ölçülen kinematik verilerin paleogerilme analiz sonuçları. Kısaltmalar: L: Lokasyon.

Table 1. Paleostress analysis results for kinematic data measured along the segments in the study area. Abbreviations: L: Location.

L	Segment	Fay Türü	Veri Sayısı	σ_1	σ_2 (Derece)	σ_3	Φ	Max ANG
1	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	27	179/21	301/54	78/29	0,439	6
2	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	9	160/13	254/16	033/69	0,259	7
3	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	14	314/08	101/80	223/05	0,707	10
4B	Kızılcaören	eğim atımlı normal	14	262/71	355/01	085/19	0,175	9
4A	Kızılcaören	oblik atımlı normal	16	221/68	014/20	108/09	0,407	6
5	Derbent	eğim atımlı normal	8	355/70	101/06	193/19	0,132	6
6	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	16	341/21	206/60	079/20	0,236	35
7	Gürlek	oblik atımlı normal	9	088/74	328/08	236/13	0,669	10
8	Gürlek	sağ doğrultu atımlı	13	307/24	197/38	061/43	0,576	10
9	Gürlek	eğim atımlı normal	11	005/65	150/21	245/13	0,508	4
10	Derbent	eğim atımlı normal	9	280/72	071/16	164/08	0,221	3
11	Kızılcaören	eğim atımlı normal	9	024/68	167/18	261/12	0,316	2



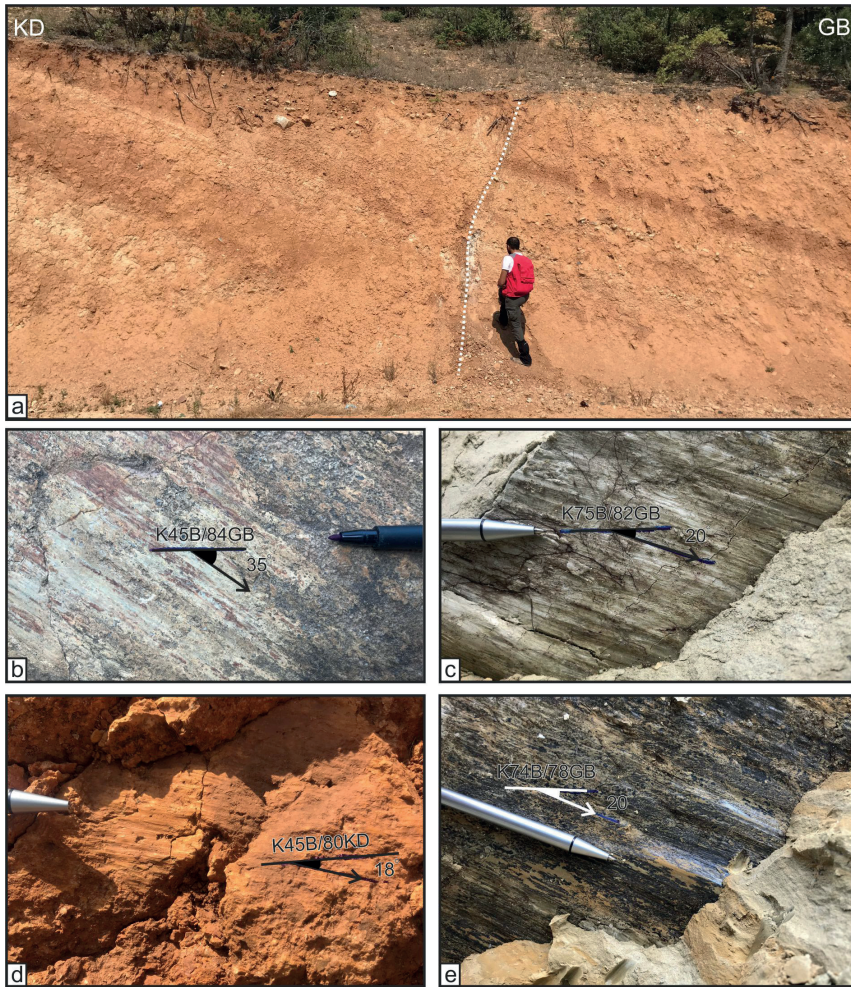
Şekil 6. İncelenen fay segmentleri üzerinde gerçekleştirilen paleogerilme analizleri. Eşit alanlı alt yarı küre stereografik izdüşümleri; fay kayma yüzeyi, kayma yönü ve asal gerilme eksen yönleri ile asal gerilme eksenlerinin konumunu göstermektedir. Büyük daireler fay yüzeylerini, oklar ise kayma çiziklerini temsil etmektedir (detaylar için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 6. Palaeostress analyses carried out on the studied fault segments. Equal area lower hemisphere stereoplots illustrate fault-slip surface, slip direction and principal stress axis orientation data and position of principal stress axes. Great circles are fault surfaces, the arrows are striations (see Table 1 for details).

Gürlek Segmenti

Fayın Baltalı ile Muratlı arasında uzanan Gürlek Segmenti boyunca gözlenen fay düzlemlerinden toplanan kinematik ölçümler baskın olarak sağ yönlü doğrultu atımlı karakter sunmaktadır. Bu bölümde gözlenen KB-GD genel uzanımlı ve düşeye yakın eğimli fay düzlemleri üzerinde baskın olarak 15-24° arası rake açıları ölçülmüştür (Şekil 7a, b, c ve d). Bu segment üzerinde ve yakınlarındaki (Lokasyonlar: 1, 2, 3, 6, 7, 8 ve 9) paleogerilme analizleri, fayın bu bölümünün

yaklaşık KB-GD doğrultulu sıkışma ve KD-GB doğrultulu genişleme kuvvetleri etkisi altında sağ yönlü doğrultu atımlı çalıştığına işaret etmektedir. İlgili lokasyonlardan toplanan kayma verilerinin paleogerilme analizlerine göre, en büyük asal gerilme eksenini olan σ_1 baskın olarak yataya yakın dalıma sahip iken (08° ila 24° arasında) en küçük asal gerilme eksenini σ_3 dalımları genel olarak yataya yakın olup 05° ila 29° arasında değişmektedir. Ortaç asal gerilim eksenini σ_2 dalımları ise baskın olarak düşeye yakındır (21 ila 80° arasında, Çizelge 1).



Şekil 7. Gürlek Segmenti boyunca kinematik verilerin toplandığı fay düzlemlerinin saha fotoğrafları. **a)** Lokasyon 8; **b)** Lokasyon 1; **c** ve **e)** Lokasyon 9; **d)** Lokasyon 6.

Figure 7. Field photographs showing fault planes measured along the Gürlek Segment. **a)** Location 8; **b)** Location 1; **c** & **e)** Location 9; **d)** Location 6).

Bununla beraber, L7'de hesaplanan σ_1 dalım açısı (74°) ile Lokasyon 8 ve 2'de hesaplanan σ_3 dalım açıları (sırasıyla 43° ve 69°) nispeten yüksek iken L2 ve 7'de hesaplanan σ_2 değerleri nispeten küçüktür (sırasıyla 16° ve 08°). Bu lokasyonlardan elde edilen ϕ değerleri, 0,236 ila 0,707 arasında hesaplanmıştır. Segment üzerinde elde edilen kinematik verilerin paleogerilme analizleri (Delvaux vd. (1997) tarafından önerilen sınıflamaya göre), Gürlek Segmenti boyunca saf doğrultu atımın (σ_2 düşeyde, $0,75 > \phi > 0,25$) baskın olduğuna işaret etmektedir.

Kızılcaören Segmenti

Kızılcaören segmenti boyunca iki farklı lokasyonda (L4 ve L11) ölçümler toplanmıştır (Şekil 6). Bu segmentin en iyi korunmuş fay sarplıkları ve kayma düzlemlerinin gözlemlendiği Evrendede mevkinde birbirini üzerleyen fay çizdiği setleri ve fayın hareket yönünü açıkça gösteren fay olukları ve basamak yapıları gibi kinematik göstergeler analiz edilmiştir. Bu lokasyondaki onlarca metre yüksekliğindeki dik fay düzlemleri morfolojik olarak oldukça belirgin sarplıklar sunmaktadır. Bu sarplıklarda gözlenen iyi korunmuş kayma çizikleri ve birbirlerini üzerleyen farklı fay çizdiği setleri, Banaz Fayı'nın kinematik evrimindeki zamansal değişimi anlamak açısından anahtar rol oynamaktadır (L4, Şekil 8a, b ve c). K20°B doğrultulu ve 75° kuzeydoğuya eğimli kayma düzlemi üzerinde 59° rake açısında sahip oblik atımlı normal kayma çiziklerinin 88° rake açısına sahip eğim atımlı normal fay çiziklerini keserek üzerledikleri açık olarak gözlenmektedir (Şekil 8d).

Bununla beraber bu sarplığa ait ölçülen tüm düzlemlerdeki ilk harekete ait rake açıları 76° ila 89° arasında değişmektedir. Bu lokasyonda, birbirini üzerleyen iki farklı fay çizdiği setinden genç olanı (L4A, Şekil 6) bu segmentin BKB-DGD doğrultulu genişleme kuvvetleri etkisi altında oblik atımlı normal fay olarak çalıştığına

işaret etmektedir. 16 farklı ölçümün gerçekleştiği bu lokasyonda hesaplanan σ_1 yönlem ve dalımı sırasıyla, 221° ve 68° iken σ_2 ve σ_3 dalım açıları yataya yakındır (sırasıyla, 20° ve 09°). Bu lokasyondan elde edilen ϕ değeri 0,407 olarak hesaplanmıştır. Segment üzerinde elde edilen kinematik verilerin paleogerilme analizleri (Delvaux vd. (1997) tarafından önerilen sınıflamaya göre) segment boyunca baskın olarak saf genişleme (σ_1 düşeyde, $0,75 > \phi > 0,25$) olduğuna işaret etmektedir. Bu lokasyondaki bir önceki hareket (L4B) ise D-B doğrultulu genişleme kuvvetleri etkisi altında eğim atımlı normal faylanmaya işaret eden yüksek rake açılı kayma çizikleri seti ile hesaplanmıştır. 11 adet kayma yüzeyi ölçümünün paleogerilme analizleri σ_1 'in 71° ile düşeye yakın dalımına işaret eder. Hesaplanan σ_2 ve σ_3 dalım açıları yataya yakındır (sırasıyla, 01° ve 19°). 4 numaralı lokasyonda gözlenen kesen-kesilen ilişkisi bu fay üzerindeki σ_3 'ün zaman içerisinde saat yönünün tersine doğru hareket ettiğine işaret etmektedir.

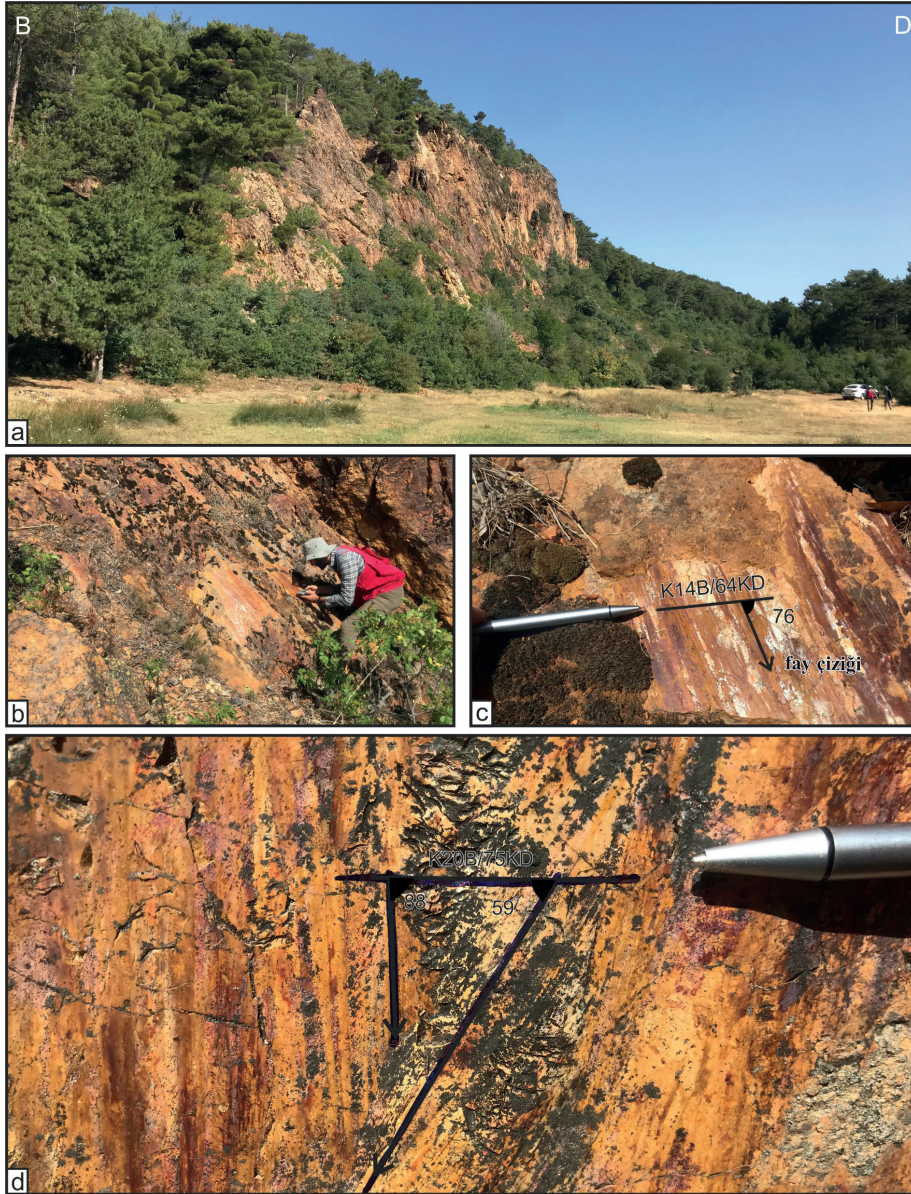
Kızılcaören segmenti üzerindeki diğer ölçüm lokasyonu (L11) segmentin güneybatı ucuna yakın yerdedir (Şekil 6). Hesaplanan yaklaşık D-B doğrultulu saf genişleme kuvvetleri etkisi 4 numaralı lokasyondaki ölçümlerin paleogerilme analizleri ile uyumlu olarak sonuç vermiştir. 9 adet kayma yüzeyi ölçümünün paleogerilme analizleri σ_1 'in 68° ile düşeye yakın dalımına işaret eder. Hesaplanan σ_2 ve σ_3 dalım açıları yataya yakındır (sırasıyla, 18° ve 12°).

Derbent Segmenti

Derbent Segmenti üzerinde 2 farklı lokasyonda (L5 ve L10, Şekil 6) toplanan ölçümler baskın olarak σ_1 'in düşeyde olduğu (sırasıyla, 70° ve 72°) σ_2 ve σ_3 'ün ise yataya yakın olduğu (06° - 19° arasında, Çizelge 1) hesaplanmıştır. Bu durum Derbent Segmenti'nin baskın olarak genişlemeli kuvvetler etkisi altında şekillendiğine işaret etmektedir. Elde edilen paleogerilme sonuçlarına göre,

genişleme doğrultuları KKB-GGD ile KKD-GGB arasında değişmektedir (Şekil 6). Bu lokasyondan elde edilen ϕ değeri 0,25 altında hesaplanmıştır (sırasıyla, 0,132 ve 0,221) olarak hesaplanmıştır. Segment üzerinde elde edilen kinematik verilerin

paleogerilme analizleri (Delvaux vd. (1997) tarafından önerilen sınıflamaya göre) segment boyunca baskın olarak dairesel genişleme (σ_1 düşeyde, $0 < \phi < 0,25$) olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 8. Kızılcaören Segmenti üzerindeki Evrendede mevkiinde (L4, Şekil 6) gözlenen fay düzlemlerini gösteren saha fotoğrafları.

Figure 8. Field photographs showing fault planes observed at the Evrendede location (L4) on the Kızılcaören Segment.

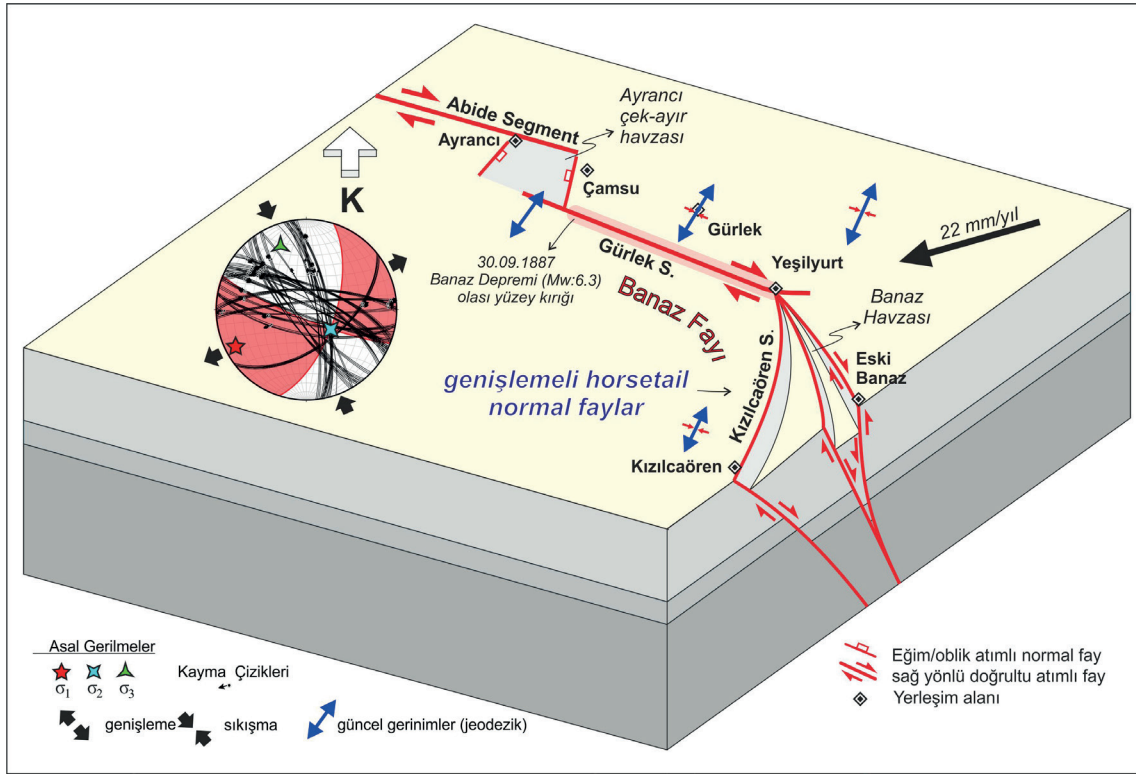
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma, Banaz Fayı'nın (BF) geometrik ve kinematik özelliklerini detaylandırarak, genişleme sistemlerinde gelişen at kuyruğu yapısına (horsetail structure) ait yeni veriler sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında 11 farklı lokasyondan elde edilen 155 adet fay düzlemi ölçümü, fayın tek bir mekanizma ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir segmentasyon sunduğunu kanıtlamaktadır. Emre vd. (2013, 2018) tarafından tek bir segment olarak tanımlanan yapı, bu çalışmada sunulan saha verileri ışığında; Gürlek, Kızılcaören ve Derbent olmak üzere üç farklı segmentten oluşan bir fay olarak tanımlanmıştır.

Paleogerilme analizlerinde Gürlek Segmenti'nin kuzeybatı kesiminde saptanan yataya yakın σ_1 ve düşeye yakın σ_2 eksenleri, fayın bu kesiminde sağ yanal saf doğrultu atımlı karakterin baskın olduğunu göstermekte olup, bu bulgu Emre vd. (2013) tarafından önerilen sağ yanal hareket modeli ile örtüşmektedir. Ancak, fayın güneydoğuya doğru kavis yaparak Kızılcaören ve Derbent segmentlerine geçiş yaptığı alanlarda, σ_1 ekseninin düşey konuma geçmesi ve kayma verilerinin normal/oblik karakter sunması, Koçyiğit (2007) tarafından öne sürülen normal faylanma görüşünü destekler niteliktedir. Evrendede mevkiinde (L4) saptanan birbirini üzerleyen farklı fay çizdiği setleri, bölgedeki σ_3 gerilme ekseninin zaman içerisinde saat yönünün tersine doğru bir rotasyona uğradığını kanıtlamaktadır. Bununla beraber, kesme ilişkilerine göre belirlenen yaşlı hareketin (L4B) saf normal faylanma, genç hareketin (L4A) ise sağ yanal bileşenli normal faylanma olması, bölgedeki gerilme alanının statik olmadığını göstermektedir. σ_3 ekseninin zaman içerisinde saat yönünün tersine (counter-clockwise) rotasyonu, Batı Anadolu'daki genişlemeli rejimin yerel tektonik blok rotasyonları veya ASFS'nin doğu ve batı kesimleri arasındaki gerilme transferi ile ilişkili olabilir.

Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre, Banaz Fayı'nın Kızılcaören Segmenti üzerindeki

Pliyo-Kuvaterner dönem düşey kayma hızı kabaca 0,1 mm/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer, fay boyunca jeodezik yöntemlerle hesaplanan güncel deformasyon hızı ile uyum göstermektedir. Tiryakioğlu vd. (2024) tarafından sunulan GNSS verileri ve yamulma analizleri, bölgede yıllık yaklaşık 1–2 mm mertebesinde bir deformasyonun varlığını ve KD-GB doğrultulu bir açılmanın hakim olduğunu göstermektedir. Ancak bu sonuçlar, 2017–2023 yılları arasındaki yaklaşık altı yıllık dönemde gerçekleştirilen yıllık kampanya tipi GNSS ölçülerine dayanmaktadır. Kampanya tipi GNSS ağlarında gözlem süresinin sınırlı olması ve ölçü periyotlarının seyrekliği nedeniyle düşey hız bileşenlerine ait standart sapmaların genellikle 2–3 mm/yıl düzeyinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle hesaplanan 1–2 mm/yıl büyüklüğündeki düşey hızlar, hata sınırları içerisinde değerlendirilmekte olup istatistiksel açıdan anlamlı bir deformasyona işaret etmemektedir. Bölgedeki düşey hareketlerin güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için daha uzun süreli jeodezik gözlemlere ihtiyaç bulunmaktadır. Benzer şekilde Dönmez ve Tiryakioğlu (2018) çalışmasında SFZ üzerinde yanal atımla birlikte normal faylanmalara işaret edebilecek faya dik yönde gerinim birikimleri olduğundan bahsedilmektedir. Bu çalışmada, paleogerilme analizi ile elde edilen KB-GD doğrultulu sıkışmayla ilişkili KD-GB doğrultulu genişleme, Banaz Fayı ve yakın civarındaki güncel jeodezik çalışmalarda (Tiryakioğlu vd., 2024) elde edilen gerinim yönleri ile uyum göstermektedir (Şekil 9). Bu durum, fayın sadece paleotektonik bir yapı olmadığını, güncel gerilme rejimi altında aktif olarak deformasyon biriktirmeye devam ettiğini kanıtlamaktadır. Bununla beraber, fayın kuzeybatısındaki Ayrancı Havzası'nın kenarları ile fayın güneydoğu bölümündeki Kızılcaören Segmenti üzerindeki yaklaşık D-B doğrultulu genişlemeler sırasıyla, zonun sağa sıçrama yaptığı alandaki çek-ayır etkisi ve horsetail gelişimine bağlı lokal stress değişimleri ile açıklanabilir.



Şekil 9. Simav Fay Zonu içerisindeki Abide ve Banaz Fayları'nın genel sağ yanal geometrisini, oluşan çek ayır havzası ve genişlemeli horsetail yapılarının geometrisini gösteren şematik blok diyagram. Bölgede jeodezik çalışmalarda elde edilen güncel gerinimler (Tiryakioğlu vd., 2024) ve bu çalışmadaki Gürelek ve Kızılcaören segmentleri üzerinden toplanan tüm kinematik verilerin bütüncül fay düzlemi çözümü ve paleogerilme analiz sonucu tek stereonet üzerinde gösterilmiştir.

Figure 9. Schematic block diagram showing general right-lateral geometry of the Abide and Banaz Faults within the Simav Fault Zone, the resulting pull-apart basin, and the geometry of the extensional horsetail structures. The current strain obtained from geodetic studies in the region (red arrows: compression, blue arrows: extension) (Tiryakioğlu et al., 2024) and the holistic fault plane solution and paleostress analysis results for all kinematic data collected along the Gürelek and Kızılcaören segments in this study are shown on a single stereonet.

1887 Banaz Depremi'nin (Ms: 6,3) Comburt Vadisi boyunca 10 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuş olabileceği ifade edilmektedir (Ambraseys ve Jackson, 1998). Bu çalışmada hesaplanan segment uzunlukları (Mw: 6,12 - 6,56) bu tarihsel veriyi doğrular niteliktedir. Ancak, tüm zonun (37 km) tek seferde kırılması durumunda ortaya çıkabilecek Mw: 6,9 büyüklüğündeki deprem potansiyeli teorik olarak üst sınır (maksimum) büyüklük değeridir ve bölgedeki sismik tehlikenin ciddiyetini ortaya koymaktadır. 1973'ten bu

yana 4,0 üzerindeki deprem aktivitesinin durmuş olması ve Tiryakioğlu vd. (2024) tarafından Banaz Fayı üzerinde ve yakın civarında saptanan 22 ± 1 mm/yıl hızındaki güneybatı yönlü hareket (Avrasya plakası sabit iken, Şekil 9), bölgede daha önce Koçyiğit vd. (2002), Koçyiğit (2007) ve Tiryakioğlu vd., (2024) tarafından tanımlanmış olan bir "sismik boşluk" (seismic gap) olasılığını güçlendirmektedir. 1887 yılında meydana gelen ve 6,3 büyüklüğünde olduğu hesaplanan yıkıcı depremin Comburt Vadisi boyunca bir yüzey

kırığı oluşturduğu varsayıldığında; faylanma ile boşalan enerjinin, fay kırılma mekanizması gereği fayın uç kısımlarına aktarıldığı ve bu doğrultuda güncel gerilim birikiminin özellikle vadinin doğu ve batı uçlarında yoğunlaşmasının beklendiği dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada ilk defa saptanan sırt tipi travertenler (T1, T2, T3), fayın güncel aktivitesinin ve derin kökenli akışkan dolaşımının somut kanıtları olarak değerlendirilmiştir. Özellikle traverten sırtlarının fay doğrultularına (K55°B ve K40°D) paralellığı, bu oluşumların doğrudan tektonik kontrol altında geliştiğini göstermektedir. Banaz Fayı yakın doğusunda, çalışma alanı dışındaki faylar üzerinde gelişen sırt tipi traverten oluşumları Koçyiğit (2007) tarafından da tanımlanmıştır.

Bu çalışmada sunulan veriler ışığında, “at kuyruğu” (horsetail) fay yapılarının oluşma şartları ve geometrik özelliklerini şu şekilde açıklanmaktadır: Bu yapılar, (1) tek bir genişleme evresi yerine, iki farklı doğrultuda gerçekleşen genişlemenin üst üste binmesi sonucu oluşmuştur. Başlangıç evresinde oluşan faylar (preexisting faults) ikinci evredeki gerilme ile yeniden aktifleşerek horsetail yapısının ana mekanizmasını meydana getirmektedir. (2) Ana fayın segmentlere ayrılması horsetail yapısının tam olarak nerede konumlanacağını doğrudan kontrol etmektedir. (3) Ana faya mekansal olarak bağlanan eğim/oblik atımlı faylar, asimetrik bir “at kuyruğu” geometrisini sonuçlamıştır. (4) Ana fayın uzunluğu ve üzerindeki atım miktarı, horsetail yapısını oluşturan ikincil faylara göre çok daha büyüktür. Bu karakteristik özelliklerin anlaşılması, özellikle jeotermal sistemlerin göç yollarının ve birikim alanlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Banaz Fay Zonu’nun sismik riskini ve tektonik evrimini tam olarak anlayabilmek adına gelecekte aşağıdaki çalışmaların yapılmasının öncelikli olduğu düşünülmektedir. Mevcut bilinenler (Ambraseys ve Jackson, 1998; Satılmış,

2016) 1887 Banaz Depremi’nin (Ms: 6,3) Comburt vadisini kontrol eden Gürlek segmentinden kaynaklandığına ve bu segmentin Comburt vadisi boyunca yaklaşık 10 km uzunluğunda bir parçasının kırılmış olabileceğine işaret etmektedir. Bununla beraber fayın diğer segmentleri üzerinde meydana gelen son yüzey kırığı oluşturan depremler henüz bilinmemektedir. Banaz Fayı’nın, özellikle geç Pleyistosen-Holosen dönemi uzun dönem kayma hızını, geçmiş deprem tekrarlanma periyotlarını ve en son yüzey kırılması tarihini netleştirmek amacıyla uygun lokasyonlarda (özellikle Comburt Vadisi ve Kızılcaören civarı) mutlak tarihlendirme yöntemleri ile paleosismolojik hendek çalışmaları yapılmalıdır. Bölgedeki yamulma (strain) birikimi, fay kilitlenme derinliği ve düşey deformasyonun zamansal-mekânsal davranışının güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için sabit GNSS istasyonlarından oluşan sürekli bir izleme ağının kurulması veya mevcut kampanya tipi GNSS gözlemlerinin daha uzun süreli veri setleri oluşturacak şekilde sürdürülmesi gerekmektedir. 1,0 – 3,0 büyüklüğündeki mikrosismik aktivitenin odak mekanizması çözümleriyle fayın derinlikteki geometrisi ve güncel kinematiği sürekli izlenmelidir. Fay üzerinde ve fayların kesişim alanlarında ilk defa bu çalışmada saptanan sırt tipi travertenler, fayın güncel aktivitesini ve bölgedeki hidrotermal akışkan dolaşımını doğrudan belgeleyen morfotektonik unsurlar olarak göz önüne alındığında, bu travertenlerin oluşum yaşlarının tarihlendirilmesi ve kırık sistemleri ile ilişkilerinin ortaya konması, BFZ’nin evrimi ve aktif tektonik yapısının daha iyi anlaşılmasına katkılar sağlayacaktır.

EXTENDED SUMMARY

Western Anatolia is recognized as one of the most rapidly extending continental regions globally, with the Akşehir-Simav Fault System (ASFS) serving as a major seismically active structure within this regime. The Banaz Fault (BF), which

constitutes one of the southeastern segments of the Simav Fault Zone (SFZ) forming the northwestern part of the ASFS, represents a critical structures whose geometric evolution, segmentation, and kinematic history remain a subject of debate. While previous studies either generalized the fault zone as a single structural segment or debated its dominant slip mechanism, this study provides a comprehensive re-evaluation of the BF. By integrating structural mapping, paleostress inversion, and geodetic data, this paper details the geometric and kinematic characteristics of the BF, offering a refined model for horsetail fault development within overprinted extensional tectonic regimes

The structural architecture of the BF was investigated through detailed (1/25.000 scale) field mapping and the collection of 155 kinematic data points across 11 distinct structural localities (L1 to L11). Paleostress inversion techniques were applied to fault-slip vectors to reconstruct the temporal and spatial evolution of the local stress fields ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Additionally, long-term geological slip rates calculated from Plio-Quaternary vertical offsets were integrated with modern regional geodetic velocities derived from recent Global Navigation Satellite System (GNSS) campaign measurements and strain analyses to evaluate contemporary deformation accumulation along the zone.

Field data demonstrate that the BF exhibits a complex, multi-segmented structural framework rather than a uniform fault line. Honoring the fundamental nomenclature of Koçyiğit (2007), the BF is herein redefined as a composite structure consisting of three distinct segments: the Gürlek, Kızılcaören, and Derbent segments. The Gürlek Segment, located in the northwestern sector of the fault zone, is characterized by sub-horizontal maximum principal stress (σ_1) and sub-vertical intermediate principal stress (σ_2) axes. This configuration confirms a dominant right-lateral

strike-slip character, aligning with the kinematic model proposed by Emre et al. (2013). As the fault zone traces toward the southeast (Kızılcaören and Derbent Segments), it exhibits a distinct map-view curvature. Concurrently, the stress regime transitions markedly; the σ_1 axis rotates to a sub-vertical position, and fault-slip indicators display normal to oblique-slip characteristics. This kinematic shift supports the normal-faulting model originally proposed by Koçyiğit (2007).

At the Evrendede locality (L4), superimposed sets of slickenlines preserve a record of transient stress fields. Cross-cutting relationships reveal that an older, pure normal faulting phase (L4B) was overprinted by a younger, right-lateral oblique normal faulting event (L4A). This temporal variation proves that the local stress field is dynamic, characterized by counter-clockwise rotation of the least principal stress (σ_3) axis over time. This rotation is interpreted as a manifestation of localized tectonic block rotations or stress transfer mechanisms between the eastern and western segments of the SFZ.

Geological and morphotectonic evaluations along the Kızılcaören Segment yield a long-term vertical slip rate of approximately 0.1 mm/yr since the Plio-Quaternary. This geological rate is consistent with modern geodetic deformation rates. Recent GNSS data (e.g., Tiryakioğlu et al., 2024) indicate general NE-SW extension with strain accumulation of about 1-2 mm/yr in the region. However, because these data are derived from campaign-type measurements spanning 2017–2023, the vertical velocity uncertainties 2-3 mm/yr fall within the margin of error. Thus, while the horizontal NE-SW extension vector is robust, the geodetic vertical rates are not yet statistically significant on their own, highlighting the need for continuous geodetic monitoring. Furthermore, localized E-W extensional fields observed near the Ayrancı basin (northwest) and the Kızılcaören Segment (southeast) are effectively explained

by pull-apart basin mechanics at right-stepping steps and localized stress perturbations within the developing horsetail termination, respectively. The spatial orientation of newly-documented ridge-type travertines (T1, T2, T3), which run parallel or sub-parallel to the fault trends (N55°W and N40°E), confirms that the BF may act as an active conduit for deep hydrothermal fluid circulation within the contemporary stress field.

Empirical scaling relationships based on individual segment lengths yield potential earthquake magnitudes ranging from $M_w = 6.12$ to 6.56, consistent with historical reports of the 1887 Banaz Earthquake (estimated $M_s = 6.3$ by Ambraseys and Jackson, 1998), which may generate 10 km surface rupture along the Comburt Valley (Gürlek Segment). However, full-segment rupture encompassing the entire 37 km length of the zone could generate a catastrophic event of maximum $M_w = 6.9$.

Given that seismic quiescence has persisted along the fault for moderate ($M > 4.0$ since 1973) and strong ($M > 6.0$ since 1887) events and considering the region exhibits a southwestward geodetic motion of 22 ± 1 mm/yr relative to the stable Eurasian plate, our findings strongly corroborate the existence of a seismic gap along the BF. Stress accumulation and transfer are likely concentrated at the tips of the 1887 rupture zone within the Comburt Valley.

Based on integrated datasets, this study establishes four primary criteria governing the development of asymmetric horsetail structures at fault terminations within extensional regimes:

1. *Superimposed Extension:* They develop by overprinting of two distinct extensional phases rather than a single event, where pre-existing faults are selectively reactivated under the younger stress field.
2. *Segmental Control:* Structural segmentation along the master fault controls the exact spatial nucleation of the horsetail geometry.

3. *Kinematic Asymmetry:* Spatial linkage of normal and oblique-slip faults to the master strike-slip component results in an asymmetric map-view “horsetail” geometry.
4. *Displacement Partitioning:* The master fault retains significantly greater cumulative length and slip magnitude compared to the secondary branching faults. Understanding these criteria provides critical insight into defining migration pathways and reservoirs for geothermal fluids

The Banaz Fault is an active, highly segmented structure that accommodates complex oblique extension in Western Anatolia. To mitigate regional seismic hazards and refine the evolutionary model of the zone, future research should prioritize: (1) *Paleoseismological Trenching:* Trenches should be dug across the Comburt Valley and Kızılcaören sectors to constrain the recurrence intervals, late Quaternary slip rate and exact dates of historical surface-rupturing events. (2) *Continuous Geodetic Monitoring:* A permanent, continuous GNSS network should be established to accurately isolate vertical velocity components from error margins and map fault locking depths. (3) *Microseismic Networks:* High-resolution seismic arrays should be employed to resolve 1.0-3.0 magnitude micro-earthquakes and clarify the deep focal mechanisms. (4) *U-Series/AFT Dating:* Ridge-type travertines should be dated to establish an absolute chronological framework for the fault's fluid-flow history and morphotectonic evolution.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No: AKÜ BAP 21TEMATİK02) tarafından desteklenmiştir. Aynı zamanda bu makalenin bazı verileri, proje ekibinde görev alan makale yazarlarından Muammer Can Ünsal'ın Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde

yürüttüğü yüksek lisans tezi kapsamında oluşturulmuştur.

ORCID

Çağlar Özkaymak  <https://orcid.org/0000-0002-0377-1324>

Muammer Can Ünsal  <https://orcid.org/0000-0002-7914-9865>

Hasan Sözbilir  <https://orcid.org/0000-0002-3777-4830>

Doğukan Mert Özcan  <https://orcid.org/0000-0002-2693-0789>

İbrahim Tiryakioğlu  <https://orcid.org/0000-0002-4954-7109>

Halil İbrahim Solak  <https://orcid.org/0000-0001-5286-0369>

KAYNAKLAR / REFERENCES

AFAD, (2026, 01 Haziran). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı. *Deprem Kataloğu*. <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>

Akdeniz, N. ve Konak, P. N. (1979). *Simav-Emet-Taşvanlı-Dursunbey-Demirci yöresinin jeolojisi* (Rapor No: 6547). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara (yayınlanmamış).

Aktuğ, B., Nocquet, J. M., Cingöz, A., Parsons, B., Erkan, Y., England, P., Lenk, O., Gürdal, M. A., Kılıçoğlu, A., Akdeniz, H. & Tekgöl, A. (2009). Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B110), Article B10404. <https://doi.org/10.1029/2008JB006000>

Ambraseys, N. N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.

Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133(2), 390–406. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00508.x>

Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835–5848. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835>

Angelier, J. (1991). Inversion of field data in fault tectonics to obtain regional stress III: A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, 103(2), 363–376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01777.x>

Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental Deformation*, (pp. 53–100). Pergamon Press.

Bingöl, E. (1974). *Muratdağı merkezi kesiminin jeolojisi, magmatik ve metamorfik kayaların petrolojisi ve jeokronolojisi* [Yayınlanmamış Tez], İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 105 s.

Bingöl, E. (1977). Murat Dağı jeolojisi ve ana kayaç birimlerinin petrolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni (Türkiye Jeoloji Bülteni)*, 20(2), 13–66. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/e2265684fe2d0d6_ek.pdf

Cabrera, L., Roca, E. & Santanach, P. (1988). Basin formation at the end of a strike-slip fault: The Cerdanya Basin (eastern Pyrenees). *Journal of the Geological Society*, 145, 261–268. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.145.2.0261>

Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. & Sankov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1–4), 1–38. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00090-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00090-9)

Demirci, A., Özden, S., Bekler, T., Kalafat, D. & Pınar, A. (2015). An active extensional deformation example: 19 May 2011 Simav earthquake (Mw = 5.8), Western Anatolia, Turkey. *Journal of Geophysics and Engineering*, 12(4), 552–565. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/12/4/552>

Dönmez, E. ve Tiryakioğlu, İ. (2018). Gediz Fayı Yerkabuğu Hareketlerinin GNSS Gözlemleri ile İzlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 1110–1117. <https://izlik.org/JA68XL59XM>

Duman, T. Y., Elmacı, H., Özalp, S., Olgun, Ş. ve Emre, Ö. (2013). Simav Fay Zonu'nda ilk

- paleosismolojik bulgular. Özmen, B. (Ed.), 66. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, = (s.: 28-29), 01-05 Nisan 2013, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara.
- Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadirioğlu, F. T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., Arslan, S., Özalp, S., Kartal, R. F., Kalafat, D., Karakaya, F., Eroğlu Azak, T., Özel, N. M., Ergintav, S. A., Akkar, S., Altınok, Y., Tekin, S., Cingöz, A. & Kurt, A. İ. (2018). Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3277–3316. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. (2013). *Türkiye Diri Fay Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30. Ankara-Türkiye.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F. & Olgun, Ş. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Ercan, T., Dinçel, A., Metin, S., Türkecan, A. ve Günay, E. (1978). Uşak yöresindeki Neojen havzaların jeolojisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni (Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni)*, 21(2), 97–106. https://jmo.org.tr/resimler/ekler/be2561d497flea9_ek.pdf
- Gürboğa, Ş. (2013). 28 March 1970 Gediz earthquake fault, western Turkey: Palaeoseismology and tectonic significance. *International Geology Review*, 55(10), 1191–1201. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.771420>
- Hardcastle, K. C. & Hills, L. S. (1991). BRUTE3 and SELECT: Quick Basic 4 programmes for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous populations of fault slip data. *Computers & Geosciences*, 17(1), 23–43. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90078-R](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90078-R)
- Kim, Y.-S. & Sanderson, D. J. (2006). Structural similarity and variety at the tips in a wide range of strike-slip faults: A review. *Terra Nova*, 18(5), 330–344. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2006.00697.x>
- Koçyiğit, A. (2007). *Çukuroren-Çobanlar (Afyon) arasındaki deprem kaynaklarının (aktif fayların) belirlenmesi* (Proje No: ÇAYDAĞ-106Y209). TÜBİTAK Final Raporu, Ankara, 71 s.
- Koçyiğit, A. ve Deveci, Ş. (2005). Akşehir-Simav Fay Sistemi: Güneybatı Türkiye’de neotektonik rejimin başlama yaşı ve depremsellik. *Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, Bildiri Özleri Kitabı*, Kocaeli, s.: 26.
- Koçyiğit, A. & Deveci, Ş. (2007). A N-S-trending active extensional structure, the Şuhut (Afyon) Graben: Commencement age of the extensional neotectonic period in the Isparta Angle, SW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 391–416.
- Koçyiğit, A., Bozkurt, E., Kaymakçı, N. ve Şaroğlu, F. (2002). Şubat 2002 Çay (Afyon) Depreminin kaynağı ve ağır hasarın nedenleri: Akşehir Fay Zonu. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Tektonik Araştırma Birimi Jeolojik Ön Raporu*, Ankara.
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society of London*, 156(3), 605–616. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.3.0605>
- KRDAE, (2026, 1 Haziran). *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi*. Deprem Kataloğu. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- Le Pichon, X. & Angelier, J. (1979). The Hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean area. *Tectonophysics*, 60(1–2), 1–42. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90131-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90131-8)
- Leflef, D. (1980). *Muratdağı güneyi Neojen havzasının çökel ortamları ve paleocoğrafik evrimi* (Rapor No: 6812). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara (Yayınlanmamış).
- McKenzie, D. P. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: The Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 55(1), 217–254. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x>

- Özkaymak, Ç. (2013). *Manisa Havzası'nın Aktif Tektoniği ve Depremselliği, Batı Anadolu, Türkiye* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 251 s.
- Özkaymak, Ç. (2015). Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications. *Geodinamica Acta*, 27(2–3), 110–129.
<https://doi.org/10.1080/09853111.2014.957504>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ. ve Baybura, T. (2017). Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) gözlenen yüzey deformasyonlarının jeolojik, jeomorfolojik ve jeodezik analizi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 60(2), 169–189.
<https://doi.org/10.25288/tjb.302914>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Geçievi, M. O. & Tiryakioğlu, İ. (2019). Late Holocene coseismic rupture and aseismic creep on the Bolvadin Fault, Afyon Akşehir Graben, Western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28, 787–804.
<https://doi.org/10.3906/yer-1906-13>
- Satılmış, S. (2016). 30 Eylül 1887 Banaz Depremi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, 38, 79–96.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128(2), 155–166.
<https://doi.org/10.1017/S0016756800018343>
- Sözbilir, H., Eytemiz, C., Bayık, Ç., Arca, D., Utku, M., Özel Füzün, S., Bakak, Ö., Özdağ, Ö. C., Aksaz, M., Tatar, O., Türkoğlu, M., Kılıçarslan, Ö. & Kaplan, M. (2026). Seismic Source Analysis of the 10 August 2025 M_w 6.1 Sındırgı and the 27 October 2025 M_w 6.1 Sındırgı Earthquakes (Western Anatolia Extensional Province, Türkiye) Based on Geological, Seismological, and InSAR Data. *Seismological Research Letters*,
<https://doi.org/10.1785/0220250346>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1992). *1:1.000.000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 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 K. Biddle & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*, (pp. 227–264). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 37.
<https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211>
- Tiryakioğlu, İ., Baybura, T., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Sandıkçioğlu, A., Erdoğan, S., Yılmaz, İ., Uysal, M., Yılmaz, M., Yıldız, A., Dereli, M. A., Yalçın, M., Dumlupınar, İ., Yalım, H. A. ve Ertuğrul, O. (2015). Sultandağı Fayı Batı Kısmı Fay Aktivitelerinin Multidisipliner Çalışmalarla Belirlenmesi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 7–16.
- Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Baybura, T., Sözbilir, H. & Uysal, M. (2018). Comparison of palaeostress analysis, geodetic strain rates and seismic data in the western part of the Sultandağı Fault in Turkey. *Annals of Geophysics*, 61(3), GD335.
<https://doi.org/10.4401/ag-7591>
- Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Solak, H. İ., Öztürk, M., Akyar, B. E., Eyübagil, E. E. ve Çakanşimşek, E. B. (2024). Jeodezik ölçülerle Banaz Fayı'nın güncel tektonik deformasyonu, Akşehir-Simav Fay Sistemi, Batı Anadolu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 873–881.
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1448674>
- Tiryakioğlu, İ., Gezgın, C., Aktuğ, B., Solak, H.İ., Özkaymak, Ç., Şafak Yaşar, Ş., Şahiner, F., Yıldırım, M. C., Aladoğan, K., Çakanşimşek Ünlükaya, E.B., Özcan, D.M., Bezcioglu, M., Şentürk, M. D. & Akgül, M. F. (2026). Revealing the source mechanism of the August 10, 2025 Sındırgı Earthquake (Mw 6.3) with geological and geodetic evidence. *Advances in Space Research*, 78(2), 580–598.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.04.047>
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974–1002.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>

- Xu, H., Lao, H., Li, G., Dong, G. & Xia, S. (2024). Origin of horsetail faults in an extensional regime using physical experiments for the Linnan Sag. *Interpretation*, 12(3), T289–T301. <https://doi.org/10.1190/INT-2023-0033.1>
- Yılmaz, Y. & Gürer Ö. F. (2024). Tectonic development of western Anatolian extensional province. *International Geology Review*. 66(3) 755-785. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2209865>



**Morphotectonic Segmentation and Uplift History of the Yalakdere Fault (NW Türkiye):
Results from χ Analysis and River Profile Inversion**
*Yalakdere Fayının (KB Türkiye) Morfotektonik Segmentasyonu ve Yükselme Geçmişi: χ Analizi ve
Akarsu Profili Ters Çözümleme Sonuçları*

Seray Çınar Yıldız^{1*}, Süha Özden², Savaş Topal³

¹ Çanakkale Onsekiz Mart University, School of Graduate Studies, Department of Geological Engineering,
Çanakkale, Türkiye

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
Terzioğlu Kampüsü, Çanakkale/Merkez, Türkiye

³ Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi B Blok, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 20160
Kınıklı Kampüsü, Pamukkale/Denizli, Türkiye

• Geliş/Received: 22.05.2026 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 30.07.2026 • Kabul/Accepted: 03.08.2026
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 24.08.2026 • Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Abstract: Northwestern Anatolia contains many active fault segments with different strikes, tectonic regimes and slip rates. In this study, the tectonic control on topography along the Yalakdere Fault, a right-lateral strike-slip fault located south of the Gulf of İzmit, is investigated using a multi-scale morphometric approach. Mountain front morphology (Smf, Vf), basin-scale indices (AF, Bs, HI, HC), channel steepness (ksn), and drainage divide stability (χ) analyses are integrated with river profile inversion modeling to constrain the spatial and temporal variability of uplift. Results reveal significant morphotectonic contrasts between the southwestern and northeastern segments of the fault. River profile inversion results show that uplift rates have varied throughout the Pleistocene, with peak uplift occurring during the Early Pleistocene. These findings demonstrate that the morphotectonic evolution of the Yalakdere Fault is controlled by fault segmentation, lithological variability and differential uplift. The results further indicate that tectonic forcing, rather than climatic variability, represents the dominant control on landscape evolution.

Keywords: Morphotectonic, NW Anatolia, segmentation, uplift, Yalakdere Fault.

Öz: Kuzeybatı Anadolu, farklı doğrultulara, tektonik rejimlere ve kayma hızlarına sahip aktif fay segmentlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, İzmit Körfezi'nin güneyinde yer alan sağ yanal doğrultu atımlı bir fay olan Yalakdere Fayının tektoniğin topoğrafya üzerindeki etkisi ve çok ölçekli morfometrik bir yaklaşım kullanılarak araştırılmıştır. Dağ önü morfolojisi indisleri (Smf, Vf), havza ölçekli indisler (AF, Bs, HI, HC), kanal diklik indisi (ksn) ve drenaj bölümü stabilitesi (χ) analizleri, yükselmenin mekânsal ve zamansal değişkenliğini sınırlandırarak, akarsu boyu profil ters çözüm modelleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, fayın güneybatı ve kuzeydoğu segmentleri arasında belirgin morfotektonik farklılıkların bulunduğunu ortaya koymaktadır. Akarsu boyu profil ters çözüm sonuçları, yükselme oranlarının Kuvaterner boyunca zamansal değişimler gösterdiğini ve maksimum yükselmenin Erken Pleyistosen döneminde gerçekleştiğini göstermektedir. Bulgular, Yalakdere Fayı'nın morfotektonik evriminin fay segmentasyonu, litolojik değişkenlik ve diferansiyel yükselme tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar ayrıca, bölgenin evriminde baskın kontrolün iklim değişkenliğinden ziyade tektonik kuvvetlerden kaynaklandığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: KB Anadolu, morfotektonik, segmentasyon, Yalakdere Fayı, yükselme.

* Correspondence / Yazışma: seraycinar@gmail.com

INTRODUCTION

NW Anatolia is one of the most tectonically dynamic regions in the world, mainly characterized by active strike-slip fault systems developed under a compressional regime. Strike-slip faults are not limited to horizontal displacements; they commonly involve vertical components and complex deformation patterns that play a significant role in shaping topographic evolution. However, the long-term geomorphic impacts of such faults, particularly their uplift history at the segment scale and their influence on drainage systems, remain insufficiently constrained. The Yalakdere Fault is an active right-lateral strike slip fault (Emre et al., 2018) located south of the Gulf of İzmit, extending along a morphologically prominent mountain front (Figure 1). Although the regional topography exhibits clear morphotectonic indicators such as linear mountain fronts, asymmetric valleys, and well-organized drainage networks, the temporal evolution of these features and their relationship with fault kinematics have not been systematically investigated. In particular,

the impact of localized uplift and subsidence along strike-slip faults on drainage systems requires quantitative morphometric approaches beyond classical fault geometry interpretations.

In recent years, morphometric indices (e.g., Smf, Vf, AF, Bs, HI, HC), channel-scale analyses (e.g., ksn, χ), and river profile inversion models have emerged as powerful tools for disentangling tectonic signals from topography. Nevertheless, the integrated application of these methods within a multi-scale framework remains limited, especially in the context of resolving the spatial and temporal variability of uplift rates along strike-slip fault zones. This study aims to investigate the tectonic control on topography along the Yalakdere Fault using a multi-scale approach. In this context, mountain front morphology is characterized using Smf and Vf indices; basin-scale deformation is evaluated using AF, Bs, HI, and hypsometric curve (HC) analyses; and channel-scale processes are analyzed using the normalized steepness index (ksn) and drainage divide stability parameter (χ).

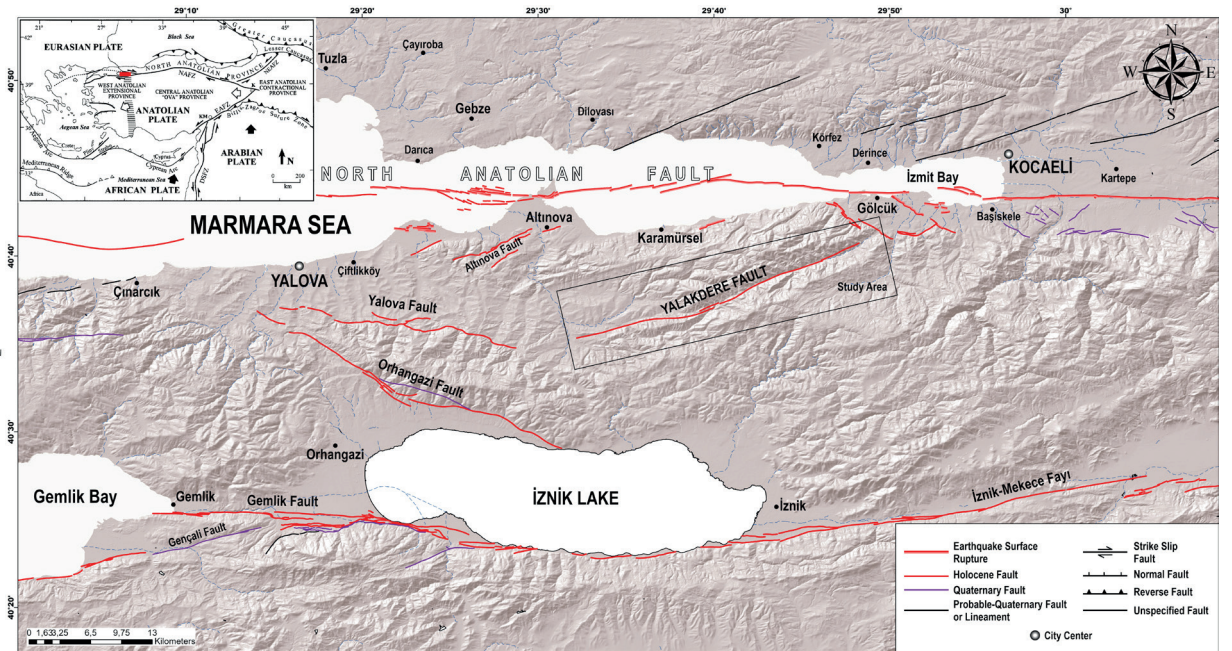


Figure 1. Location map of the study area.

Şekil 1. Çalışma sahasının yer buldurur haritası.

In addition, a river profile inversion model is applied to longitudinal stream profiles to quantitatively constrain the spatial and temporal variations in uplift rates along the fault. The primary objective of this study is to reveal not only the surface morphology of the Yalakdere Fault but also its long-term tectonic evolution and segmentation behavior. The results are expected to contribute to ongoing discussions about the geomorphic response and seismic potential of strike-slip faults in NW Anatolia.

REGIONAL GEOLOGICAL SETTING

The study area is located in the eastern part of the Armutlu Peninsula and the southern part of the Kocaeli Peninsula in northwestern Anatolia. According to Yiğitbaş et al. (2004), the eastern Marmara region is composed of several major morphotectonic domains, including the Thrace–Kocaeli Peneplain, the Armutlu–Almacık Highland, the Çamdağ–Akçakoca Highland, and the Marmara Basin, all of which are structurally related to the evolution of the North Anatolian Fault Zone. The Western Pontides represent a tectonic mosaic formed by the progressive accretion of continental and oceanic fragments during the Paleozoic and Mesozoic periods (Yiğitbaş et al., 1999). Rock assemblages belonging to the İstanbul and Sakarya zones were brought into contact along the Intra-Pontide suture, which developed as a result of the closure of the Intra-Pontide Ocean during Early Eocene–Oligocene time. The North Anatolian Fault currently follows the trace of this suture zone (Şengör and Yılmaz, 1981; Okay and Görür, 1995). The neotectonic evolution of the eastern Marmara region began during the Late Miocene–Early Pliocene with the initiation of the North Anatolian Fault Zone, which subsequently evolved into a broad fault system composed of several active strands in northwestern Anatolia (Yiğitbaş et al., 2004). The Armutlu–Ovacık Zone is defined as a mixing zone between these two tectonic units, bounded by the İstanbul Zone to the north and the Sakarya Zone to the south (Elmas and Yiğitbaş, 2005). The Armutlu–Ovacık Zone comprises a metamorphic sequence ranging from

Lower Paleozoic to Upper Cretaceous in age, an Upper Cretaceous ophiolitic melange, and relics of Neo-Tethyan ophiolites (Yılmaz et al., 1995). These units are unconformably overlain by an Upper Cretaceous sedimentary succession initiated by marine transgression, within which four mega sequences developed between the Late Cretaceous and Eocene (Özcan et al., 2012). The first mega sequence consists of Turonian–Late Campanian volcanic and volcanoclastic rocks interbedded with turbidites and calciturbidites, representing arc-related and forearc basin deposits. The overlying unit is composed of pelagic limestones and marls deposited from the Late Campanian to Late Paleocene. The third sequence corresponds to a thick Early Eocene flysch wedge deposited unconformably, whereas the fourth sequence comprises a thick volcanic and volcanoclastic succession spanning from the Early to Middle Eocene (Özcan et al., 2012; Yiğitbaş et al., 1999). These basement units are unconformably covered by Miocene and younger sedimentary deposits (Figure 2). The spatial distribution of these sediments indicates that Neogene units are predominantly preserved on elevated topography, whereas Quaternary deposits are concentrated within depression zones developed along the North Anatolian Fault (Emre et al., 1998). The Neogene succession is characterized by Late Miocene–Pliocene fluvial and alluvial fan-delta deposits, consisting of alternating conglomerate, sandstone, siltstone, mudstone, and claystone (Gökten, et al., 2001). These deposits are overlain by Late Pleistocene fluvial terraces above an angular unconformity. The overlying sequence, which records a transgressive–regressive series, is composed of loosely consolidated, fossil-rich sands, clayey silts, and marls (Bargu and Sakaç, 1989). Quaternary sediments accumulated under the influence of the evolving North Anatolian Fault system, with Late Pliocene–Pleistocene basin fills and alluvial fan deposits recording continued tectonic activity in the region (Yiğitbaş et al., 2004). The youngest deposits in the region are Quaternary alluvium, composed of unconsolidated block-, gravel-, and sand-sized materials deposited along river valleys and coastal zones (Figure 2).

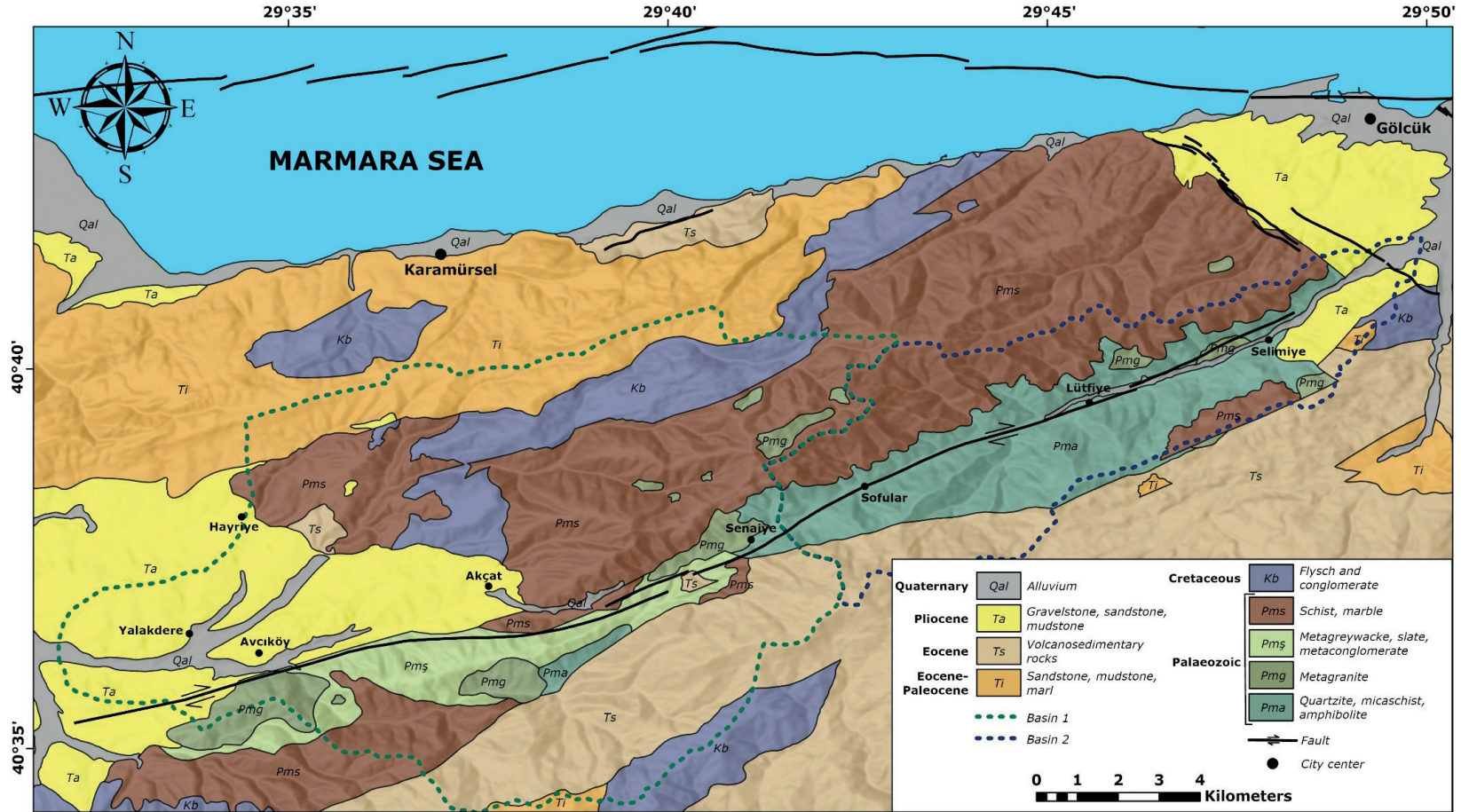


figure 2. Geological map of the study area and surroundings (Modified from Göncüoğlu et al., 1986; Bargu and Sakıncı, 1989).

Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Göncüoğlu vd., 1986; Bargu ve Sakıncı, 1989'dan değiştirilmiştir).

Geology Along the Yalakdere Fault Zone

The Yalakdere Fault extends from south of Gölcük to Yalakdere village and is approximately 25 km long, with NE-SW strike and forms a segmented structure along the valley. Along the fault trace, basement rocks belonging to the Armutlu–Ovacık Zone are exposed, including Paleozoic units of the İznik Metamorphics and Pamukova Metamorphics (Figure 2). The Pamukova Metamorphics represent high-grade metamorphic rocks in the study area, consisting predominantly of amphibolites and metagranites, along with metaclastic units containing quartzite and granitic clasts. The lower levels comprise quartzite, mica schist, amphibolite, and volcanogenic amphibolite (Pma). Upsection, metagranites, altered granites, and aplite dykes (Pmg) become dominant. The uppermost part of the sequence consists of metaclastic rocks, including metagreywacke, slate, and metaconglomerate (Pmş), which unconformably overlie the underlying units (Göncüoğlu et al., 1986). The İznik Metamorphics (Pms) include multiple lithological levels. The lower parts are represented by a low-grade metamorphosed volcanoclastic flysch sequence, whereas the upper levels consist of an olistostromal unit containing blocks, lenses, and wedges of ophiolite and marble embedded within sedimentary and volcanic rocks (Göncüoğlu et al., 1986). These units are overlain by a Lower Upper Cretaceous deep-marine volcanosedimentary assemblage, followed conformably by an Upper Late Cretaceous regressive sandstone sequence containing plant fragments, coal debris, and blocks derived from underlying units (Yiğitbaş et al., 1999). The Maastrichtian succession (Kb) begins with flysch and conglomerate and consists of sandstone, shale, mudstone, and limestone, incorporating both autochthonous and allochthonous blocks within a heterogeneous matrix (Göncüoğlu et al., 1986). In the northwestern part of the study area, an unconformable unit (Ti) composed of alternating sandstone, mudstone, and marl is observed.

This Paleocene–Eocene flysch sequence begins with a basal conglomerate and includes volcanic intercalations toward the upper levels (Göncüoğlu et al., 1986). It gradationally transitions into the Eocene volcanosedimentary succession (Ts), which crops out extensively in the southwestern part of the study area and more locally south of Ereğli. This unit starts with marl at the base and continues upward with alternating sandstone, siltstone, and marl, including limestone levels and three distinct tuff horizons (Bargu and Sakınç, 1989). Another widespread unit (Ta), exposed south of Gölcük and around Yalakdere, Avcıköy, and Hayriye villages, consists mainly of weakly-cemented clastic rocks with local cross-bedding. This Miocene–Pliocene unit comprises gravelly sand and medium-grained sand at the base, transitioning upward into sand, silt, and locally sandy limestone (Bargu and Sakınç, 1989). Finally, Holocene alluvial deposits (Qal), consisting of block-, gravel-, and sand-sized materials transported by rivers, are widely distributed along valley floors (Bargu and Sakınç, 1984).

Tectonic Framework of the Study Area

The study area is located in the northwestern part of Türkiye, within the Eastern Marmara region. The North Anatolian Fault (NAF), which constitutes the present-day tectonic framework of the region, is a right-lateral strike-slip transform fault system that separates the Eurasian and Anatolian plates (Ketin, 1957; Şengör, 1979). The NAF extends approximately 1500 km in an east–west direction from Karlıova to the North Aegean Sea. The fault zone is commonly subdivided into three main segments, known as eastern, central, and western NAF. While the eastern and central segments are characterized by a narrow deformation zone, the western NAF exhibits a broader deformation zone (Emre et al., 2018). In the Eastern Marmara region, the NAF bifurcates into northern and southern branches. The southern branch, which

diverges in a right-stepping manner between Bandırma and the Dokurcun Valley, consists of three major fault segments: Geyve, İzmit and Gemlik extending from east to west (Özalp et al., 2013). The northern branch of the NAF enters the Gulf of İzmit from Bolu and continues westward toward the North Aegean Trough in a segmented structure. The study area is located between these two major branches, south of the Gulf of İzmit. Small-scale fault segments surrounding the main strands of the North Anatolian Fault are interpreted as secondary structures developed under a right-lateral shear regime, commonly exhibiting low-angle oblique components (Alpar and Yalıtırak, 2002). The Yalakdere Fault is situated between the northern branch of the NAF extending through the Gulf of İzmit and the southern branch extending westward south of Lake İzmit. It initiates on the northern valley slopes east of Selimiye village (Gölcük) and continues in a N70°E orientation toward Lütfiye village. Approximately 1 km east of the village, it steps southward and continues along the southern valley slope, maintaining a similar trend. Between Senaiye and Akçat villages, the fault exhibits a segmented and discontinuous geometry. The western segment of the Yalakdere Fault steps southward east of Akçat and continues with a northward bend toward Yalakdere (Figure 1). According to the Active Fault Map of MTA (2018), it is mapped as a right-lateral strike-slip fault with an approximate length of 25 km.

METHODS

In this study, a multi-scale morphometric analysis approach was applied to investigate the tectonic control on topography along the Yalakdere Fault. The analyses were conducted at three principal scales: (i) mountain front morphology, (ii) basin-scale morphometry, and (iii) channel network and river profile analyses. This multi-layered framework enables the evaluation of both the spatial distribution and temporal evolution of fault

activity. Drainage networks and basin boundaries were automatically extracted from a Digital Elevation Model (DEM) within a Geographic Information Systems (GIS) environment. All geomorphic analyses were performed using ArcGIS, MATLAB, and TopoToolbox v2 (Schwanghart and Scherler, 2014), which provides quantitative tools for topographic and river-profile analyses in tectonically active landscapes. The topographic dataset used in this study consists of a 12.5 m spatial resolution ALOS PALSAR DEM obtained from the Alaska Satellite Facility database. Prior to the analyses, the DEM was hydrologically corrected using sink-filling algorithms to ensure continuous flow routing. Flow direction and flow accumulation grids were subsequently derived, and drainage networks were extracted using an area threshold approach. Basin boundaries and channel networks were manually checked and corrected where necessary. River profiles were normalized using the χ -transformation in order to separate tectonic signals from topographic and drainage-area effects. A reference concavity value (m/n) of 0.45 was used throughout the analyses following commonly adopted values for tectonically active landscapes (Wobus et al., 2006; Perron and Royden, 2013). The reference drainage area (A0) was set to 1 m².

Mountain Front Morphometry

Mountain front morphology represents one of the most prominent geomorphic expressions of active tectonics (Bull and McFadden, 1977). In this study, mountain front sinuosity (Smf) and valley floor width-to-height ratio (Vf) indices were used to evaluate the relationship between tectonic activity and mountain front geometry. Lower Smf values generally indicate relatively linear mountain fronts associated with active uplift, whereas Vf values provide information about valley incision and valley-floor development (Table 1; Figure 3).

Table 1. Indices and methods for multi-scale morphometric analyses along the Yalakdere Fault.**Çizelge 1.** Yalakdere Fayı boyunca çok ölçekli morfolometrik analizlerle elde edilen indeksler ve yöntemler.

Scale	Indices	Formula / Approach	Explanation	Reference
Mountain front	Mountain front sinuosity, Smf	$Smf = Lmf / Ls$	Indicates whether the mountain front is linear; low values suggest high tectonic activity	Bull and McFadden, 1977
	Valley floor width-to-height ratio, Vf	$Vf = 2Vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]$	A tectonic activity indicator based on valley cross-sectional geometry	Bull and McFadden, 1977
Basin	Asymmetry factor, AF	$AF = (Ar / At) \times 100$	Reveals the direction of basin tilting and tectonic inclination	Hare and Gardner, 1985
	Drainage basin shape, Bs	$Bs = Bl / Bw$	Reflects the degree of basin elongation and structural control	Schumm, 1956
	Hypsometric integral, HI	$HI = (hmean - hmin) / (hmax - hmin)$	Indicates the degree of erosion and topographic maturity	Strahler, 1952
	Hypsometric curve, HC	—	Evaluates morphological evolution based on the elevation–area relationship	Strahler, 1952
Channel	Normalized steepness index, ksn	$ksn = ks \times A^\theta$	Enhances sensitivity to uplift by normalizing channel slope	Wobus et al., 2006
	χ (chi)	$\chi = \int (Ao/A)^(m/n) dx$	Used to assess drainage equilibrium and divide stability	Perron and Royden, 2013
Time-series analysis	Linear inversion of river profiles	$z(x) = zo + \int U(t) \cdot G(x,t) dt$	Determines the temporal and spatial variation of uplift rates based on knickpoint migration	Goren et al., 2014

Basin-Scale Morphometric Analyses

To evaluate tectonic deformation at the basin scale, asymmetry factor (AF), basin shape index (Bs), hypsometric integral (HI), and hypsometric curve (HC) analyses were performed (Schumm, 1956; Strahler, 1952; Keller and Pinter, 2002). The AF index provides information about basin tilting and tectonic asymmetry, while the Bs index reflects basin elongation and structural control. HI and HC analyses were used to assess erosional maturity and geomorphic evolution of the drainage basins.

Channel-Scale Analyses

The normalized channel steepness index (ksn) and χ analyses were used to evaluate channel response to tectonic forcing (Wobus et al., 2006; Perron and Royden, 2013). The ksn index is sensitive to spatial variations in uplift and incision, whereas χ analyses provide information about drainage equilibrium, divide stability, and potential drainage reorganization processes (Table 1; Figure 3).

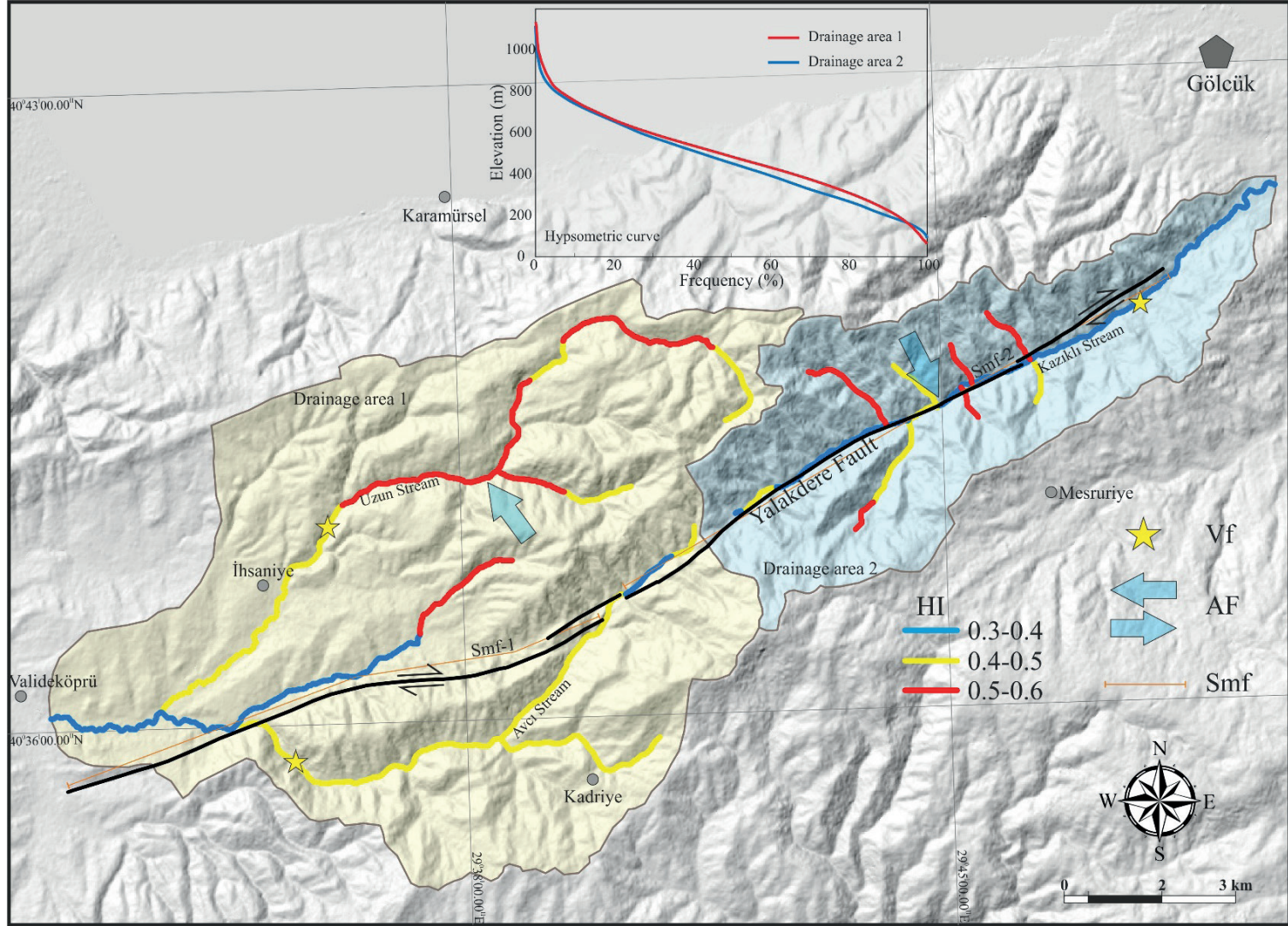


Figure 3. Geomorphic indices calculated on the Yalakdere Fault controlled mountain front and drainage areas (Smf and Vf calculation sites, tilting directions determined by AF index).

Şekil 3. Yalakdere Fayı kontrollü dağ cephesi ve drenaj alanlarında hesaplanan jeomorfik indeksler (Smf ve Vf hesaplama sahaları, AF indeksi ile belirlenen eğim yönleri).

River Profile Inversion Model

River profile inversion modelling was applied to longitudinal stream profiles to reconstruct the temporal evolution of uplift along the Yalakdere Fault following the stream-power based inversion framework of Goren et al. (2014). The inversion approach follows the detachment-limited stream power incision framework proposed by Goren et al. (2014), in which river profiles preserve information about transient uplift histories through upstream-migrating knickpoints. Longitudinal river profiles were transformed into χ -space, and uplift histories were reconstructed through linear inversion of χ -elevation profiles. The inversion model assumes that erosional parameters remain spatially uniform through time and that knickpoint retreat follows stream-power scaling relationships. The inversion model adopts a spatially uniform effective erodibility coefficient (K), following the original formulation of Goren et al. (2014). Consequently, lithology-dependent variations in rock erodibility are not explicitly represented. Spatial variations in lithology may locally influence incision efficiency and knickpoint retreat rates; therefore, uncertainty in K mainly affects the absolute timing of reconstructed uplift events rather than the relative shape of the inferred uplift histories. Accordingly, the inversion results are interpreted as first-order approximations of long-term tectonic forcing. Observed and modelled χ -elevation profiles were compared in order to evaluate model performance and goodness of fit. The reconstructed uplift histories were interpreted in terms of temporal and spatial variations in tectonic activity along different fault segments (Table 1). The inversion results should be interpreted within the assumptions of detachment-limited stream power incision models and spatially uniform erosional parameters. The time coordinate (τ) produced by the inversion represents model time derived from χ -space rather than a directly dated geological timescale. Consequently, the τ axis should be interpreted as a relative temporal

framework. References to geological ages (e.g., the Early Pleistocene or approximate Ma ranges) are intended only as approximate correlations based on the adopted inversion parameters and the regional geological framework, rather than independently constrained numerical ages. Accordingly, the inversion is primarily designed to reconstruct the relative temporal evolution of uplift rather than to establish absolute chronologies of uplift events. Lithological heterogeneity, localized sediment cover, drainage reorganization, and transient climatic variations may locally influence river profile geometry and knickpoint migration rates. Therefore, reconstructed uplift histories are interpreted as first-order approximations of long-term tectonic forcing rather than absolute uplift histories.

RESULTS OF MORPHOMETRIC ANALYSES

Morphometric analyses conducted along the Yalakdere Fault were evaluated comprehensively by differentiating between drainage basins and considering the southwestern and northeastern segments of the fault (Table 2).

Table 2. Morphometric indices calculated for the drainage basins along the Yalakdere Fault.

Çizelge 2. Yalakdere Fay Hattı boyunca uzanan drenaj havzaları için hesaplanan morfometrik indeksler.

Drainage area	Geomorph indices					
	Smf	Vf	HI	AF	Bs	ksn (mean)
1	1.57	0.17 0.25	0.45	0.72	2.12	46
2	1.32	0.12	0.44	0.45	3.98	50

Mountain Front Morphometry (Smf, Vf)

In the southwestern segment of the fault, the calculated Smf values fall within a low range, indicating that the mountain front parallel to the fault trace exhibits a largely linear morphology with limited irregularities. In the same segment,

Vf values are also low, particularly along Uzun Dere and its tributaries, corresponding to narrow and deeply incised valleys characterized by steep slopes and limited valley floor width. In contrast, in the northeastern segment of the fault, Smf values are consistently higher than those observed in the southwestern segment, suggesting a more irregular mountain-front morphology. In this area, Vf values increase along Kazıklı and its surrounding drainage network, indicating broader valley floors and more open valley cross-sectional geometries.

Basin-Scale Indices (AF, Bs, HI, HC)

For Drainage Basin 1 (southwestern segment), AF values indicate a distinctly asymmetric basin form, with the drainage network systematically deflected relative to the main channel axis. The calculated Bs values indicate an elongated basin, reflecting strong structural control on basin development. HI values indicate moderate topographic dissection, and the corresponding hypsometric curve exhibits a slightly more convex profile.

In contrast, Drainage Basin 2 (northeastern segment) displays a different asymmetry pattern, reflecting a distinct drainage orientation relative to the main channel. Lower Bs values indicate a shorter and wider basin, whereas HI values are slightly lower than those of Drainage Basin 1. The corresponding hypsometric curve is slightly smoother and less convex. Overall, the hypsometric curves of both drainage basins are broadly similar, differing only subtly in curvature (Figure 3).

RESULTS OF CHANNEL-SCALE ANALYSES

Normalized Channel Steepness (ksn)

Channel-scale analyses along the Yalakdere Fault reveal pronounced spatial variability in

normalized channel steepness (ksn) between the two drainage basins. In Drainage Basin 1 (southwestern segment), low ksn values (<30) are mainly confined to tributaries connected to the main channel and to the western part of the basin. Moderate ksn values (31–60) become more common in the central sector and closer to the fault trace, whereas high ksn values (>60) are concentrated in short, steep tributaries adjacent to the fault trace. Around Uzun Dere, the drainage network exhibits a heterogeneous distribution of ksn values, with low, moderate, and high values occurring along neighbouring channel reaches. Overall, moderate and high ksn values are more widespread in Drainage Basin 1, indicating greater spatial variability in channel steepness.

In Drainage Basin 2 (northeastern segment), ksn values are represented by fewer stream segments. Low ksn values occur mainly along the main channel and several tributaries, whereas moderate and high ksn values are restricted to short channel reaches in the central and northern parts of the basin. High ksn values are less extensive and occur in fewer channels than in Drainage Basin 1, indicating that elevated channel steepness is more localized within the drainage network (Figure 4).

χ Analysis and Drainage Divide Position

Evaluation of χ distribution together with the topographic profile shows that the drainage divide is located in the central part of the study area and corresponds to the highest elevation along the profile. χ values increase progressively towards the divide, reaching their highest values near the ridge crest. The χ distribution is asymmetric across the divide, with consistently higher values in Drainage Basin 2 (eastern side) and lower values in Drainage Basin 1 (western side). In map view, the divide forms a sinuous and irregular boundary rather than a linear geometry, particularly in its central and northern sectors. The inferred divide migration is from east to west.

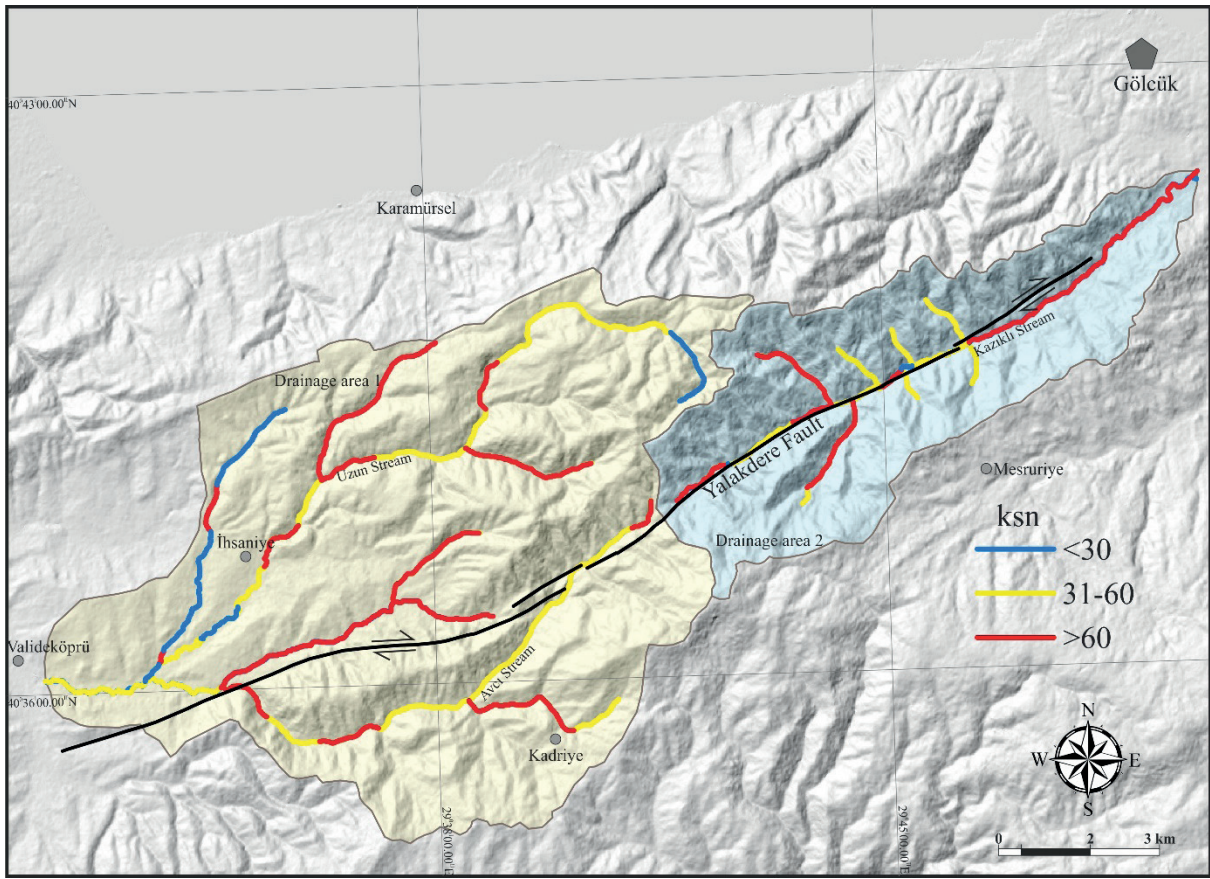


Figure 4. Spatial distribution of normalized channel steepness (ksn) values along the Yalakdere Fault.

Şekil 4. Yalakdere Fayı boyunca normalize edilmiş kanal dikliği (ksn) değerlerinin mekansal dağılımı.

Drainage-divide stability was evaluated by comparing χ values between neighbouring channel heads immediately adjacent to the divide, following the approach of Willett et al. (2014) and Forte and Whipple (2018). Accordingly, the aggressor–victim interpretation is based on these local χ contrasts rather than on the longitudinal χ profile, which is included only to illustrate the overall spatial variation in χ (Figure 5).

RESULTS FOR RIVER PROFILE INVERSION

River-profile inversion results were evaluated separately for Drainage Basins 1 and 2. The reconstructed uplift histories are presented using

the inversion timescale, with the corresponding geological ages representing approximate temporal correlations based on the adopted model parameters.

For Drainage Basin 1, reconstructed uplift rates during the Late Pliocene–Early Pleistocene (~2.5–1.8 Ma) are relatively low (~0.18–0.22 mm/yr). During the Early Pleistocene (~1.8–1.2 Ma), uplift rates increase gradually to ~0.25–0.35 mm/yr, reaching a maximum of approximately 0.35 mm/yr at ~1.2–1.0 Ma. During the Middle Pleistocene (~1.0–0.5 Ma), uplift rates decrease to ~0.14–0.20 mm/yr before increasing slightly during the Late Pleistocene (~0.5–0.1 Ma), when they range between ~0.18 and 0.22 mm/yr.

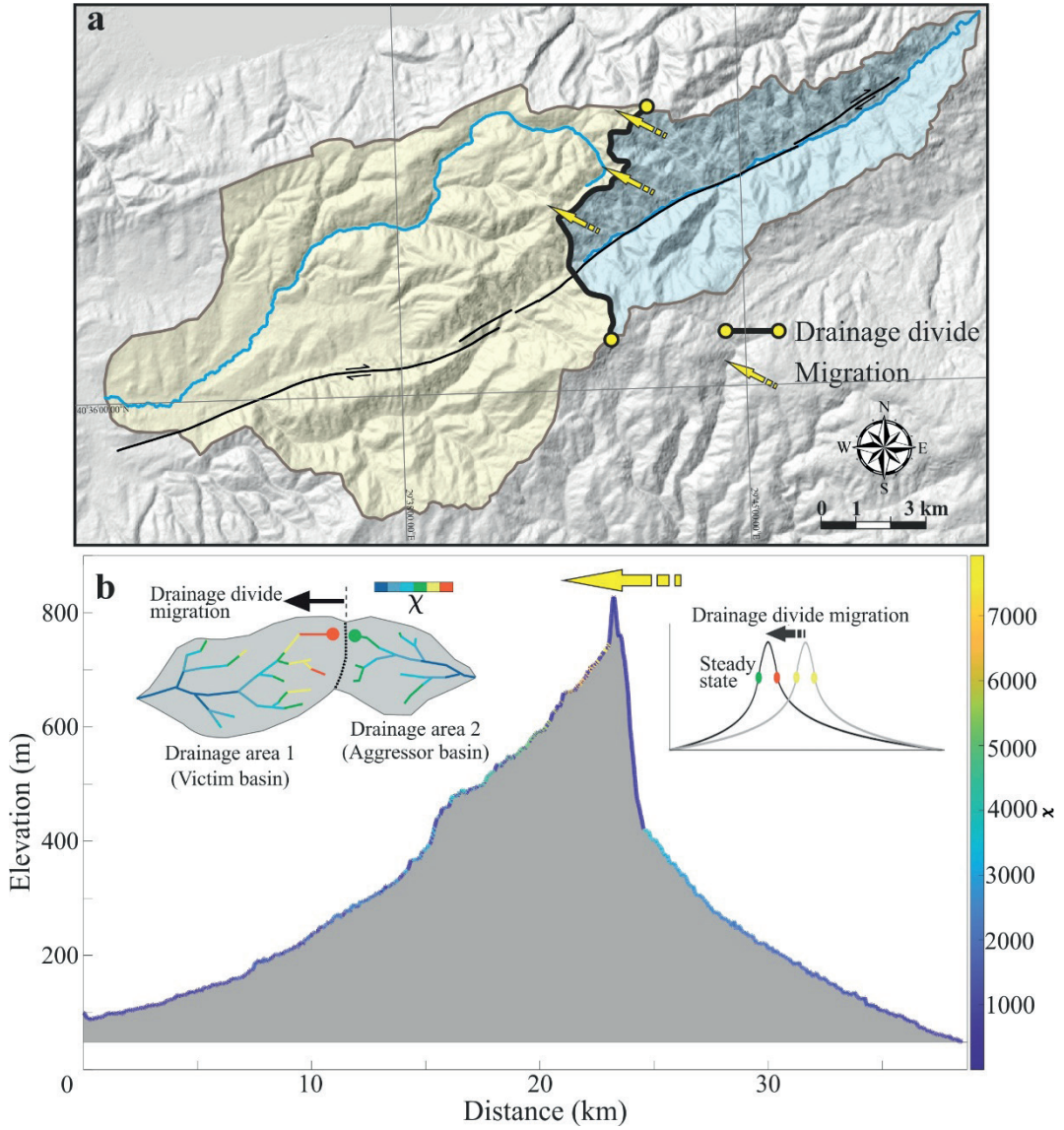


Figure 5. a) Spatial distribution of χ values and drainage-divide geometry. **b)** Longitudinal χ profile extracted along the transect shown in panel (a). The profile illustrates the overall variation of χ along the selected transect and is not intended as the primary basis for evaluating drainage-divide disequilibrium. The aggressor–victim interpretation is derived from χ contrasts between neighbouring channel heads immediately adjacent to the drainage divide.

Şekil 5. a) χ değerlerinin mekânsal dağılımı ve drenaj bölümü geometrisi. **b)** (a) panelinde gösterilen kesit boyunca elde edilen boyuna χ profili. Bu profil, seçilen kesit boyunca χ değerlerinin genel değişimini göstermek amacıyla sunulmuş olup, drenaj bölümü dengesizliğinin değerlendirilmesinde birincil dayanak olarak kullanılmamaktadır. Saldırgan–kurban (aggressor–victim) havza yorumu, drenaj bölümüne doğrudan komşu kanal başları arasındaki χ karşıtılıklarına dayanmaktadır.

For Drainage Basin 2, reconstructed uplift rates during the Late Pliocene–Early Pleistocene (~1.8–1.5 Ma) range from ~0.20 to 0.26 mm/

yr. During the Early Pleistocene (~1.5–1.0 Ma), uplift rates increase to ~0.30–0.38 mm/yr. In the Middle Pleistocene (~1.0–0.6 Ma), they fluctuate

between ~ 0.24 and 0.30 mm/yr before decreasing slightly during the Late Pleistocene (~ 0.6 – 0.2 Ma) to ~ 0.18 – 0.25 mm/yr.

Comparison of the observed and modelled χ –elevation (χ – z) profiles shows good agreement for both drainage basins, indicating that the inversion model reproduces the observed river profiles reasonably well. The agreement is stronger for Drainage Basin 2, whereas Drainage Basin 1 has greater scatter between the observed and reconstructed χ – z profiles (Figure 6).

DISCUSSION and CONCLUSION

Basin-scale morphometric indices reveal clear morphotectonic contrasts between the southwestern and northeastern segments of the Yalakdere Fault. Low Smf and Vf values in the southwestern segment indicate a relatively straight mountain front and narrow, deeply incised valleys, consistent with stronger tectonic control (Bull and McFadden, 1977; Silva et al., 2003). In contrast, the northeastern segment is characterized by higher Smf and Vf values, reflecting a more irregular mountain-front morphology and broader valleys.

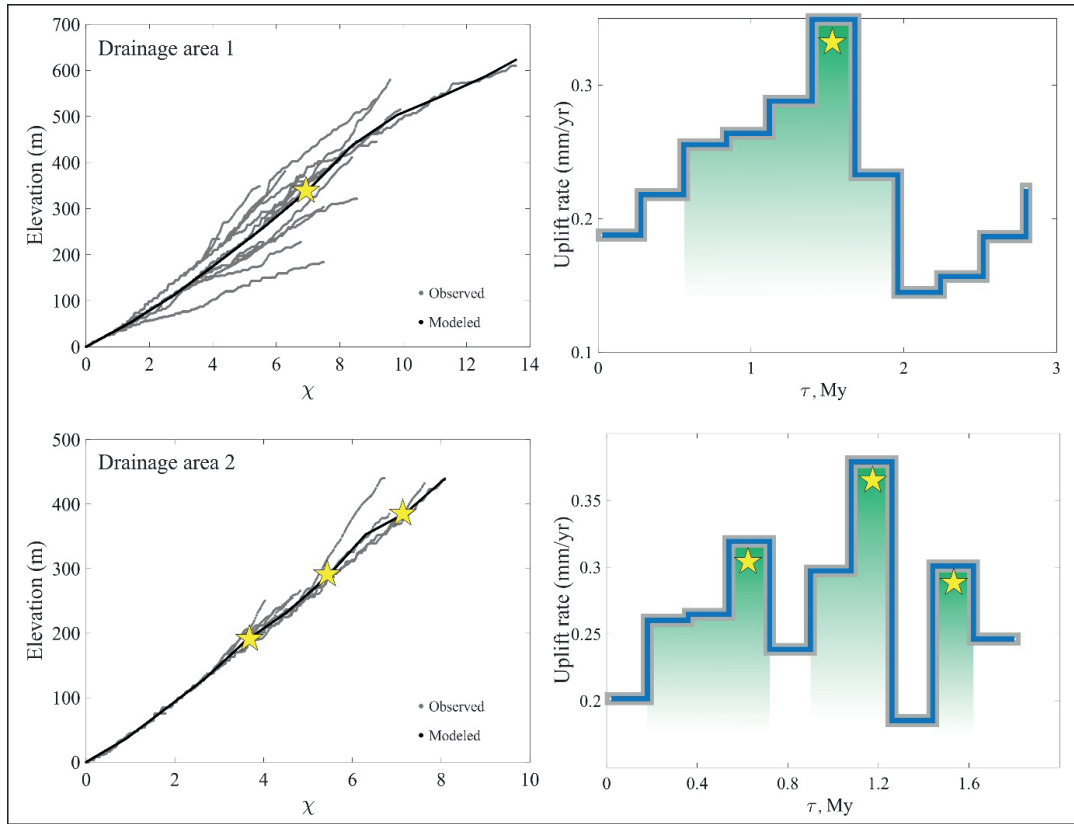


Figure 6. Observed and modelled χ –elevation profiles (left panels) and reconstructed uplift histories (right panels) for Drainage Basins 1 and 2. The horizontal axis (τ) represents inversion model time derived from χ -space rather than independently-dated geological time. Geological age assignments discussed in the text are therefore approximate correlations intended to facilitate regional geological interpretation.

Şekil 6. 1 ve 2 numaralı drenaj havzaları için gözlemlenen ve modellenen χ -yükseklik profilleri (sol) ve yeniden oluşturulan yükselme geçmişi (sağ). Yatay eksen (τ), bağımsız olarak tarihlendirilmiş jeolojik zamandan ziyade χ -uzayından türetilen tersine çevirme modeli zamanını temsil eder. Bu nedenle metinde tartışılan jeolojik yaş atamaları, bölgesel jeolojik yorumlamayı kolaylaştırmak amacıyla yaklaşık korelasyonlardır.

The AF, Bs, and HI indices further indicate stronger structural control and more heterogeneous deformation within Drainage Basin 1, consistent with localized differential block tilting (Keller and Pinter, 2002; Topal, 2012). Although the hypsometric curves for the two drainage basins are broadly similar, the slightly higher HI values in Drainage Basin 1 indicate a relatively less eroded landscape, while the subtly more convex hypsometric curve provides supporting evidence. Overall, these basin-scale morphometric indices suggest that landscape evolution along the southwestern segment of the Yalakdere Fault was more strongly influenced by tectonic processes than along the northeastern segment.

The spatial distribution of normalized channel steepness (ksn) is consistent with the morphotectonic contrast between the two segments of the Yalakdere Fault. The more widespread and heterogeneous distribution of ksn values in the southwestern segment reflects greater spatial variability in channel gradients, particularly near the fault trace where the highest ksn values are concentrated (Topal and Irfan, 2025). Elevated ksn values are commonly interpreted as indicators of enhanced rock uplift and transient channel adjustment in actively deforming landscapes (Wobus et al., 2006; Kirby and Whipple, 2012; Topal, 2024). Accordingly, the concentration of high ksn values in the southwestern segment suggests stronger tectonic control than in the northeastern segment, where elevated ksn values are more localized and channel gradients are comparatively uniform. Together with the basin-scale morphometric indices, these observations indicate that tectonic deformation is the primary control on fluvial adjustment along the Yalakdere Fault.

χ -based analyses provide important insights into drainage equilibrium and divide stability (Willett et al., 2014; Forte and Whipple, 2018; Topal, 2019; Topal et al., 2025). Along the Yalakdere Fault, the asymmetric distribution of

χ values indicates pronounced disequilibrium between the adjacent drainage basins, suggesting that the drainage divide is actively evolving rather than stable. The irregular and sinuous geometry of the divide, particularly in its central and northern sectors, further supports ongoing drainage reorganization. Higher χ values in Drainage Basin 2 and lower values in Drainage Basin 1 indicate a persistent imbalance in erosional potential between the two basins. Following the framework of Willett et al. (2014) and Forte and Whipple (2018), these χ contrasts identify Drainage Basin 2 as the aggressor basin and Drainage Basin 1 as the victim basin. This interpretation is based on local χ contrasts between neighbouring channel heads immediately adjacent to the divide rather than on the longitudinal χ profile shown in Figure 5. The inferred east-to-west migration of the divide, together with its irregular geometry, suggests that divide migration is locally influenced by differential tectonic uplift associated with fault segmentation rather than occurring uniformly along the fault. These observations are consistent with drainage-basin reorganization in tectonically active regions, where spatial variations in uplift promote divide migration through headward erosion (Willett et al., 2014).

River-profile inversion results indicate that uplift rates along the Yalakdere Fault have varied through time. Because the reconstructed uplift histories are expressed in inversion-model time (τ), the corresponding geological ages should be regarded as approximate temporal correlations rather than absolute numerical ages. Accordingly, the results are interpreted primarily in terms of the relative timing and evolution of uplift. In both drainage basins, uplift rates fluctuate throughout the Pleistocene, indicating that uplift was not constant. Drainage Basin 1 records a pronounced uplift peak during the Early Pleistocene followed by a gradual decline, whereas Drainage Basin 2 exhibits more frequent fluctuations, with peak uplift occurring over shorter intervals. These

contrasting uplift histories are consistent with previous studies showing that river-profile inversion can resolve along-strike variations in uplift associated with fault segmentation and differential block motion (Goren et al., 2014).

The geological framework of the study area indicates that the two drainage basins contain different proportions of resistant metamorphic rocks and younger sedimentary units, suggesting spatial variations in bedrock erodibility (K). These lithological contrasts may influence local incision efficiency and introduce uncertainty into the conversion of χ -space to geological time, although no independent constraints on spatial variations in K are available. Therefore, the inversion was performed using a single effective erodibility coefficient, following Goren et al. (2014). The reconstructed uplift histories should therefore be interpreted as relative temporal trends rather than precise geological chronologies. Furthermore, the longer temporal record reconstructed for Drainage Basin 1 most likely reflects the larger $\chi_{\max}$ and greater basin extent, which increase the recoverable inversion window, rather than being evidence for an older phase of tectonic activity.

The along-strike morphotectonic contrasts observed along the Yalakdere Fault may reflect progressive localization of deformation within the eastern Marmara region. Based on integrated geomorphological, geophysical, and sedimentological evidence, Forte et al. (2014) proposed that tectonic deformation has evolved since the Late Pleistocene from a broad deformation zone characterized by large step-overs and en echelon fault systems to a more localized principal deformation zone. The morphotectonic patterns documented in this study, including higher channel steepness (k_{sn}), greater drainage disequilibrium (χ), and spatial variations in reconstructed uplift histories, are consistent with this regional model of tectonic evolution. In particular, the southwestern segment of the Yalakdere Fault appears to represent a

more localized zone of active deformation, where fault geometry and differential uplift exert stronger influence on landscape evolution than in the northeastern segment. The geomorphic characteristics documented in this study are consistent with regional observations reported by Tarı and Tüysüz (2016), who showed that active deformation along the eastern Marmara sector of the North Anatolian Fault has produced fault-controlled drainage networks, asymmetric drainage basins, straight mountain fronts, and deeply incised valleys. Similar geomorphic characteristics are observed along the Yalakdere Fault, particularly in the southwestern segment where lower Smf values, higher channel steepness (k_{sn}), and greater drainage disequilibrium (χ) indicate stronger tectonic control than in the northeastern segment. The integrated multi-scale morphometric analyses presented here further show that tectonic deformation varies significantly along strike, reflecting the combined influence of fault segmentation and differential uplift on geomorphic development.

The morphotectonic evolution of the Yalakdere Fault reflects the combined influence of lithological heterogeneity, fault segmentation, and long-term tectonic deformation. The spatial patterns of morphometric indices, normalized channel steepness (k_{sn}), χ anomalies, and reconstructed uplift histories indicate that the observed topography cannot be explained by climatic forcing alone but instead records dominant tectonic influence modified by local geological conditions. Although minor lithological heterogeneities are present, both drainage basins are predominantly underlain by resistant crystalline basement rocks, including metagranite and high-grade metamorphic units with younger sedimentary deposits confined to limited local exposures. Consequently, variations in rock strength alone are unlikely to explain the pronounced morphotectonic contrasts across the study area. Instead, these contrasts primarily

reflect differential uplift associated with the segmented geometry of the Yalakdere Fault. The discontinuous step-over geometry of the fault, particularly between Senaiye and Akçat, likely promotes localized variations in uplift and strain accumulation, which are expressed by spatial variations in channel steepness, χ disequilibrium, and reconstructed uplift histories. Together, these observations indicate that the drainage network is actively adjusting to differential uplift and evolving base-level conditions. The temporal variability in reconstructed uplift rates further suggests that deformation has changed through time, most likely in response to variations in slip distribution among individual fault segments within the broader North Anatolian Fault system.

This study presents a comprehensive multi-scale morphometric analysis of the Yalakdere Fault by integrating mountain-front morphometry, basin-scale indices, normalized channel steepness (ksn), χ -based analyses, and river-profile inversion to evaluate the tectonic controls on landscape evolution. The results reveal distinct morphotectonic differences between the southwestern and northeastern fault segments. The southwestern segment is characterized by straighter mountain fronts, narrower and more deeply incised valleys, greater spatial variability in channel steepness, and stronger drainage disequilibrium, whereas the northeastern segment exhibits more subdued geomorphic development and less variable morphometric characteristics. χ -based analyses indicate that the drainage divide is not in equilibrium and is migrating from Drainage Basin 2 towards Drainage Basin 1, reflecting ongoing drainage reorganization driven by differential uplift. River-profile inversion reveals temporally variable uplift histories, indicating that deformation has evolved differently along individual fault segments through time. Overall, the results show that the geomorphic evolution of the Yalakdere Fault is primarily controlled by fault segmentation and differential tectonic

uplift, whereas lithological heterogeneity exerts a secondary influence on landscape development. More broadly, this study demonstrates the value of integrating multi-scale morphometric analyses with river-profile inversion to investigate the long-term evolution of active strike-slip fault systems and provide a quantitative framework for comparable tectonically active regions.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Kuzeybatı Anadolu, aktif deformasyonun yoğun olduğu ve yüksek sismotektonik aktiviteye sahip doğrultu atımlı fay sistemlerinin geliştiği önemli bir tektonik kuşaktır. Bölgenin güncel tektoniğini kontrol eden Kuzey Anadolu Fay Zonu, yalnızca yatay yer değiştirmeler değil, aynı zamanda topoğrafik değişimi doğrudan etkileyen düşey bileşenli deformasyonlar da sergilemektedir. Yalakdere Fayı, sağ yönlü doğrultu atımlı fay karakteri, segmentli geometrisi ve belirgin topoğrafik izi ile Doğu Marmara bölgesindeki neotektonik süreçlerin anlaşılması açısından önemli yapılardan biridir. Bununla birlikte, fay boyunca gelişen yükselme tarihçesi, segment ölçeğindeki deformasyon farklılıkları ve drenaj sistemlerinin tektonik kontrollü evrimi henüz ayrıntılı biçimde ortaya konulamamıştır. Bu çalışma, Yalakdere Fayı boyunca topoğrafyanın tektonik denetimini çok ölçekli morfometrik analizler ve akarsu profili ters çözümleme modeli kullanarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında topoğrafik analizler üç temel ölçekte gerçekleştirilmiştir: (i) dağ önü morfolojisi, (ii) havza ölçekli morfometri ve (iii) kanal ağı ile akarsu profili analizleri. Analizlerde Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verileri kullanılmış; drenaj ağları ve havza sınırları CBS tabanlı yöntemlerle otomatik olarak türetilmiştir. Dağ önü morfolojisinin değerlendirilmesi amacıyla dağ önü eğriselliği (S_{mf}) ve vadi tabanı genişlik/yükseklik oranı (V_f) indisleri hesaplanmıştır. Havza ölçeğinde asimetri faktörü

(AF), havza şekli (Bs), hipsometrik integral (HI) ve hipsometrik eğri (HC) analizleri uygulanmıştır. Kanal ölçeğinde ise normalize kanal diklik indisi (ksn) ile χ (chi) tabanlı drenaj bölümü kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, akarsu boyu profillerine uygulanan ters çözümleme modeli yardımıyla yükselme oranlarının zamansal değişimi nicel olarak değerlendirilmiştir.

Dağ önü morfometrisi sonuçları, fayın güneybatı segmentinde düşük Smf değerlerinin baskın olduğunu ve dağ önü çizgisinin belirgin biçimde doğrusal karakter sunduğunu göstermektedir. Aynı segmentte düşük Vf değerleri, dar ve derine yarılmış vadilerin geliştiğini ortaya koymaktadır. Bu durum aktif yükselme ve güçlü tektonik kontrol ile uyumludur. Buna karşılık kuzeydoğu segmentinde daha yüksek Smf ve Vf değerleri hesaplanmış olup, burada daha düzensiz dağ önü geometrisi ve geniş vadi tabanları gözlenmektedir. Havza ölçekli analizlerde güneybatı segmentindeki havzaların belirgin asimetrik karakter sunduğu belirlenmiştir. AF değerleri drenaj ağının sistematik biçimde eğimlendiğini gösterirken, yüksek Bs değerleri yapısal kontrollü uzamış havza geometrisini işaret etmektedir. HI değerlerinin orta-yüksek aralıkta olması ve hipsometrik eğrilerin çoğunlukla konveks karakter göstermesi, topoğrafyanın genç ve aşınım açısından tam olgunlaşmamış olduğunu ortaya koymaktadır. Kuzeydoğu segmentinde ise daha düşük HI değerleri ve konkav hipsometrik eğriler daha ileri aşınım evresini göstermektedir.

Kanal ölçekli analizler boyunca hesaplanan ksn dağılımları, fay segmentleri arasında belirgin mekânsal farklılıklar olduğunu göstermektedir. Güneybatı segmentinde yüksek ksn anomalileri özellikle fay izine yakın kısa ve dik yan kollarda yoğunlaşmaktadır. Bu durum, kanal eğimlerinin aktif yükselme süreçlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Aynı havza içerisinde düşük, orta ve yüksek ksn değerlerinin ardışık biçimde gözlenmesi, kanal profillerinin mekânsal olarak heterojen deformasyona yanıt verdiğini ortaya

koymaktadır. Kuzeydoğu segmentinde ise yüksek ksn değerleri daha sınırlı alanlarda gözlenmekte ve kanal ağı genelinde daha homojen bir dağılım sergilemektedir.

χ analizleri, drenaj bölümlerinin dinamik denge durumundan sapmış olduğunu göstermektedir. Topoğrafik bölünme çizgisi çalışma alanının merkezi kesiminde yer almakta ve maksimum yükseltiye karşılık gelmektedir. χ değerleri bölünmeye doğru artmakta, ancak bölünmenin doğu ve batı taraflarında belirgin asimetri sunmaktadır. Özellikle doğu havzasında daha yüksek χ değerleri gözlenirken, batı havzasında daha düşük değerler hâkimdir. Bu durum iki havza arasında enerji dengesizliği bulunduğunu göstermektedir. Harita görünümünde drenaj bölümü doğrusal bir geometri sunmamakta; özellikle orta ve kuzey kesimlerde sinüzoidal ve düzensiz bir karakter sergilemektedir. χ dağılımları, drenaj bölümü göçünün genel olarak doğudan batıya doğru gerçekleştiğini göstermekte olup, bu durum diferansiyel yükselme ve aktif topoğrafyanın yeniden şekillenmesiyle ilişkilendirilmiştir.

Akarsu profili ters çözümleme sonuçları, Yalakdere Fayı boyunca yükselme oranlarının zaman içerisinde önemli değişimler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Güneybatı havzasında Geç Pliyosen–Erken Pleyistosen döneminde görece düşük yükselme oranları belirlenmiş, Erken Pleyistosen boyunca yükselme hızlarının arttığı ve yaklaşık Erken-Orta Pleyistosen geçişinde maksimum değerlere ulaştığı saptanmıştır. Orta Pleyistosen’de yükselme oranlarında azalma gözlenirken, Geç Pleyistosen boyunca yeniden artış meydana gelmiştir. Kuzeydoğu havzasında ise yükselme oranları daha kısa zaman aralıklarında dalgali değişim göstermektedir. Her iki havza için gözlenen yükselme tarihçeleri, fay segmentasyonu ve diferansiyel blok hareketleriyle uyumlu sonuçlar sunmaktadır. Gözlenen ve modellenen χ -yükseklik profilleri arasındaki yüksek uyum, uygulanan ters

çözümleme modelinin topoğrafik gelişimi başarılı biçimde temsil ettiğini göstermektedir.

Elde edilen tüm morfometrik ve zamansal veriler birlikte değerlendirildiğinde, Yalakdere Fayı boyunca topoğrafik evrimin litolojik heterojenite, segmentli fay geometrisi ve uzun dönemli tektonik aktivitenin ortak etkisi altında geliştiği anlaşılmaktadır. Güneybatı segmentinde gözlenen yüksek morfotektonik aktivite, daha dirençli metamorfik kayaların varlığı ve fay geometrisinin lokal deformasyonu yoğunlaştırması ile ilişkilendirilmiştir. Kuzeydoğu segmentinde ise daha zayıf litolojiler ve daha düşük topoğrafik enerji koşulları baskındır. χ tabanlı analizlerin ortaya koyduğu drenaj bölümü kararsızlığı, topoğrafyanın hâlen denge durumuna ulaşmadığını ve aktif olarak yeniden organize olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, çok ölçekli morfometrik analizlerin doğrultu atımlı fay sistemlerinin topoğrafik etkilerini ortaya koymada yüksek duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Yalakdere Fayı boyunca belirlenen morfometrik anomaliler ve zamansal yükselme değişimleri, fayın aktif neotektonik karakterini açık biçimde ortaya koymaktadır. Çalışma ayrıca, Doğu Marmara bölgesindeki doğrultu atımlı fay sistemlerinin jeomorfolojik evriminin anlaşılması açısından nicel morfotektonik yöntemlerin etkinliğini vurgulamakta ve bölgedeki uzun dönemli tektonik süreçlere ilişkin yeni veriler sunmaktadır.

ACKNOWLEDGMENT

This study was carried out within the scope of TÜBİTAK KAMAG 1007 project number 123G013 for MTA (General Directorate of Mineral Research and Exploration in Türkiye), the client institution. We thank the Editor and reviewers who evaluated the article for their valuable contributions and TÜBİTAK for their contribution. This article is also derived from a

section of the PhD thesis work of Seray ÇINAR YILDIZ, a student at ÇOMÜ School of Graduate Studies.

ORCID

Seray Çınar Yıldız  <https://orcid.org/0009-0005-7048-8456>

Süha Özden  <https://orcid.org/0000-0001-6321-0812>

Savaş Topal  <https://orcid.org/0000-0001-7451-6606>

REFERENCES / KAYNAKLAR

- Alpar, B. & Yaltrak, C. (2002). Characteristic features of the North Anatolian Fault in the eastern Marmara region and its tectonic evolution. *Marine Geology*, 190(1-2), 329-350.
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00353-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00353-5)
- Bargu, S. ve Sakıncı, M. (1984). *Armutlu Yarımadası'nda Karamürsel ile İzmit Gölü Arasındaki Kesimin Doğal Agregat Potansiyelinin Araştırılması ve Değerlendirilmesi* (Rapor no: TBAG-587). TÜBİTAK.
- Bargu, S. & Sakıncı, M. (1989). Geology and structural properties of the region between the İzmit Gulf and İzmit Lake. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 6(1-2) 45-76.
- Bull, W. B. & McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology North and south of the Garlock fault, California. In: Doehring, D.O. (Eds.), *Geomorphology in Arid Regions. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium* (pp.: 115-138). State University of New York, Binghamton.
<https://doi.org/10.4324/9780429299230>
- Elmas, A. & Yiğitbaş, E. (2005). Comment on "Tectonic evolution of the Intra-Pontide suture zone in the Armutlu Peninsula, NW Turkey" by Robertson and Ustaömer. Discussion. *Tectonophysics*, 405(1-4), 213-221.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.007>
- Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M. & Ünay, E. (1998). Neogene-Quaternary evolution of the eastern Marmara region, northwest Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 120, 119-145.
<https://izlik.org/JA66NT78JL>

- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H. & Çan, T. (2018). *Active fault database of Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-3275.
<https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Forte, A. M. & Whipple, K. X. (2018). Criteria and tools for determining drainage divide stability. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.026>
- Forte, E., Sugan, M., Del Ben, A., Pipan, M., Gasperini, L. & Kurt, H. (2014). Multidisciplinary analyses to understand the tectonic activity and the evolution of the North Anatolian Fault in the Hersek Peninsula (Izmit Gulf, Turkey). *Bollettino Di Geofisica Teorica e Applicata*, 55(3), 589-616. <https://doi.org/10.4430/bgt0122>
- Gökten, E., Havzoğlu, T. & Şan, Ö. (2001). Tertiary evolution of the central Menderes Massif based on structural investigations of metamorphics and sedimentary cover rocks between Salihli and Kiraz (western Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 745-756.
<https://doi.org/10.1007/s005310000099>
- Göncüoğlu, M. C., Erendil, M., Tekeli, O., Ürgün, B.M., Aksay, A. ve Kuşçu, İ. (1986). *Armutlu Yarımadasının doğu kesiminin jeolojisi* (Rapor No.: 7786). MTA (Unpublished), Ankara.
- Goren, L., Fox, M. & Willett, S.D. (2014). Tectonics from fluvial topography using formal linear inversion: Theory and applications to the Inyo Mountains, California. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(8), 1651-1681. <https://doi.org/10.1002/2014JF003079>
- Hare, P. W. & Gardner, T.W. (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In M. Morisawa & J. T. Hack (Eds.), *Tectonic Geomorphology: Proceedings of the 15 Annual Binghamton Geomorphology Symposium* (pp.: 75-104), September 1984. Boston. Allen and Unwin.
- Keller, E. A. & Pinter, N. (2002). *Active tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape*. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 362.
- Ketin, İ. (1957). Kuzey Anadolu deprem fayı. *I.T.Ü. Bull.*, 15(2).
- Kirby, E. & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009>
- Okay, A. & Görür, N. (1995). Time and space relations in the formation of the West Black Sea and Thrace Basins. *Proc Symp on the Geology of the Thrace Basin*, 9-10.
- Özalp, S., Emre, Ö. & Doğan, A. (2013). The segment structure of southern branch of the North Anatolian Fault and paleoseismological behaviour of the Gemlik Fault, NW Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 147, 1-17.
<https://izlik.org/JA97CD39KS>
- Özcan, Z., Okay, A., Özcan, E., Hakyemez, A. & Altın, S. (2012). Late Cretaceous-Eocene geological evolution of the Pontides based on new stratigraphic and palaeontologic data between the Black Sea coast and Bursa (NW Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 21(6), 933-960.
<https://doi.org/10.3906/yer-1102-8>
- Perron, J. T. & Royden, L. (2013). An integral approach to bedrock river profile analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(6), 570-576.
<https://doi.org/10.1002/esp.3302>
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Schwanghart, W. & Scherler, D. (2014). TopoToolbox 2—MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. *Earth Surface Dynamics*, 2(1), 1-7.
<https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C. & Bardaji, T. (2003). Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 50(1-3), 203-225.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00215-5)
- Strahler, A. N. (1952). Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63(9), 923-938.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)

- Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of the Geological Society*, 136(3), 269-282. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0269>
- Şengör, A. M. C. & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Tarı, U. & Tüysüz, O. (2016). The effects of the North Anatolian fault on the geomorphology in the Eastern Marmara region, northwestern Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(3), 139-159. <https://doi.org/10.1080/09853111.2015.1065308>
- Topal, S. (2012). *Denizli Havzasındaki fayların tektonik jeomorfolojisi* [Unpublished PhD thesis]. Pamukkale University, Türkiye, 145 pp. (in Turkish with English abstract).
- Topal, S. (2019). Evaluation of relative tectonic activity along the Priene-Sazlı Fault (Söke Basin, southwest Anatolia): Insights from geomorphic indices and drainage analysis. *Journal of Mountain Science*, 16(4), 909-923. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5274-x>
- Topal, S. (2024). Geomorphological responses of rivers to active tectonics along the Karahayıt Fault, Western Türkiye. *Journal of Mountain Science*, 21(5), 1464-1474. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8649-1>
- Topal, S. & İrfan, M. (2025). Normal faulting and its role in the drainage divide migration in the Karıncalıdağ region, Menderes Massif, Western Türkiye. *Journal of Mountain Science*, 22(1), 312-323. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-9132-8>
- Topal, S., Çınar Yıldız, S. & Özden, S. (2025). Orhangazi ve Yalova Fayları arasında kalan horst boyunca su bölüm hattının göçü: Aktif tektonik yönünden çıkarımlar. *Türk Coğrafya Dergisi*, (87), 67-77. <https://doi.org/10.17211/tcd.1638374>
- Willett, S. D., McCoy, S. W., Perron, J. T., Goren, L. & Chen, C. Y. (2014). Dynamic reorganization of river basins. *Science*, 343(6175), Article 1248765. <https://doi.org/10.1126/science.1248765>
- Wobus, C., Whipple, K. X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., Crosby, B. & Sheehan, D. (2006). Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. In S. D. Willett, N. Hovius, M. T. Brandon, D. M. Fisher (Eds.), *Tectonics, Climate, and Landscape Evolution* (pp.: 55-74). [https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))
- Yılmaz, Y., Genç, Ş. C., Yiğitbaş, E., Bozcu, M. & Yılmaz, K. (1995). Geological evolution of the late Mesozoic continental margin of Northwestern Anatolia. *Tectonophysics*, 243(1-2), 155-171. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00196-G](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00196-G)
- Yiğitbaş, E., Elmas, A. & Yılmaz, Y. (1999). Pre-Cenozoic tectono-stratigraphic components of the western pontides and their geological evolution. *Geological Journal*, 34(1-2), 55-74. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1034\(199901/06\)34:1/2%3C55::AID-GJ814%3E3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1034(199901/06)34:1/2%3C55::AID-GJ814%3E3.0.CO;2-0)
- Yiğitbaş, E., Elmas, A., Sefunç, A. & Özer, N. (2004). Major neotectonic features of eastern Marmara region, Turkey: development of the Adapazarı-Karasu corridor and its tectonic significance. *Geological Journal*, 39(2), 179-198. <https://doi.org/10.1002/gj.962>



İzmir-Balıkesir Transfer Zonu İçerisinde Bir Yapı: Gelenbe Fay Zonu'nun Geometrik ve Kinematik Özellikleri

Geometric and Kinematic Characteristics of the Gelenbe Fault Zone within the İzmir-Balıkesir Transfer Zone

**Doğukan Mert Özcan^{1*}, Çağlar Özkaymak^{2,3}, Volkan Karabacak⁴
Ökmen Sümer⁵, Furkan Şahiner¹, Seray Çınar Yıldız⁶**

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi (DUAM), 03200 Afyonkarahisar, Türkiye

⁴ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

⁵ Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

⁶ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye

• Geliş/Received: 20.02.2026

• Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 27.05.2026

• Kabul/Accepted: 05.06.2026

• Çevrimiçi Yayın/Available online: 15.08.2026

• Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Ege genişleme sistemi içerisinde yer alan KKD-GGB uzanımlı Gelenbe Fay Zonu (GFZ), Batı Anadolu'nun neotektonik yapısını oluşturan kritik sismotektonik unsurlardan biridir. Balıkesir'in Bigadiç ilçesi ile Manisa'nın Akhisar ilçesi arasında uzanan bu diri fay sistemi, bölgedeki sismik aktivitenin ve jeodinamik yapının anlaşılmasında anahtar bir rol sahiptir. Bölge, tarihsel ve aletsel dönemlerde sismik açıdan yüksek bir aktiviteye sahip olup, Türkiye'nin deprem tehlikesi açısından öne çıkan alanlarından biridir. Bu çalışma, haritalama ve fay yüzeyi ölçümlerine dayalı olarak gerçekleştirilen jeolojik saha çalışmaları ile GFZ'nin yüzey segment geometrisi ve kinematik karakterine yönelik detaylı veriler sunmaktadır. Saha gözlemleri ve 1/25.000 ölçekli haritalama çalışmaları, bu zonun birbirine yaklaşık paralel uzanan, sırasıyla 35 km ve 36 km uzunluğundaki Doğu ve Batı ana segmentlerinden oluşan yaklaşık 8 km genişliğinde bir zon olduğunu göstermiştir. Doğu segment, K-G, K10-20°D uzanımlı dört fay kolundan; batı segment ise K-G, K35°D uzanımlı beş fay kolundan oluşmaktadır. Fay zonu boyunca 12 farklı lokasyondan ölçülen 132 adet kayma düzlemi verisi üzerinde yapılan kinematik analizler, fay kollarının kıvrımlı yüzey geometrisinin sebep olduğu fay bükümleri ile oluşan yerel gerilme değişimleri ve geniş transfer zonu içerisinde gelişen antitetik ve sentetik ikincil kırıkların varlığına işaret etmektedir. Paleogerilme analiz sonuçları, bölgenin evriminde iki farklı tektonik fazın etkili olduğunu ortaya koymuştur. KD-GB yönlü sıkışma ilişkili KB-GD yönlü genişleme, Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı sıkışmalı rejimi (Faz 1) temsil ederken; Faz 2, Pliyosen'den günümüze dek etkili olan BKB-DGD sıkışma ilişkili KKD-GGB genişleme rejimini yansıtmaktadır. Faz 2 ile uyumlu olan odak mekanizması çözümleri, GFZ'nin doğu segmentinin (DK4) 10.08.2025 Sındırgı depremi (Mw:6,1) sonrasında reaktif olduğunu ve sismik aktivitenin hem ana kırıklar hem de antitetik ikincil kırıklar üzerinde yoğunlaştığını doğrulamıştır. Elde edilen tüm veriler, GFZ'nin Batı Anadolu'daki güncel deformasyon ağında İzmir-Balıkesir Transfer Zonu içerisinde sağ yönlü doğrultu atımlı bir transfer yapısı olarak bölgedeki genişleme rejiminin transferinden sorumlu stratejik bir bariyer görevi gördüğüne işaret etmekte ve bölgedeki sismik risk değerlendirmelerinde birincil derecede dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aktif tektonik, Batı Anadolu, Gelenbe Fay Zonu, İzmir-Balıkesir Transfer Zonu, kinematik analiz, paleogerilme analizi

Abstract: The NNE-SSW trending Gelenbe Fault Zone (GFZ), located within the Aegean extensional system, is one of the critical seismotectonic elements constituting the neotectonic structure of Western Anatolia. Extending between the Bigadiç district in Balıkesir and the Akhisar district in Manisa, this active fault system plays a key role in understanding the seismic activity and geodynamic structure of the region. The region exhibits high seismic activity in both historical and instrumental periods, making it a prominent area in terms of earthquake hazard in Türkiye. Based on geological field studies including mapping and fault surface measurements, this study provides detailed data about the surface segment geometry and kinematic character of the GFZ. Field observations and 1/25,000 scale mapping studies show that the GFZ is an approximately 8-km-wide zone consisting of two nearly parallel main segments, the Eastern and Western segments, with lengths of 35 km and 36 km, respectively. The Eastern segment comprises four fault splays trending N-S and N10-20°E, while the Western segment consists of five fault splays trending N-S to N35°E.

Kinematic analyses conducted on 132 slip-plane data points collected from 12 distinct locations along the fault zone indicate local stress variations induced by fault bends—resulting from sinuous surface geometries—and the presence of antithetic and synthetic secondary fractures developed within the shear zone. Paleostress analysis revealed that two distinct tectonic phases were effective in the evolution of the region. NE-SW compression-related NW-SE extension represents the Miocene-Early Pliocene compressional regime (Phase 1), while Phase 2 reflects the WNW-ESE compression-related NNE-SSW extensional regime effective from the Pliocene to the present. Focal mechanism solutions consistent with Phase 2 confirm that the eastern segment (DK4) of the GFZ was reactivated following the August 10, 2025, Sındırgı earthquake (M_w : 6.1). Furthermore, seismic activity concentrated on both the primary right-lateral faults and the left-lateral antithetic secondary fractures. All obtained data indicate that the GFZ acts as a strategic barrier responsible for the transfer of the extensional regime, acting as a right-lateral strike-slip transfer structure within the İzmir–Balıkesir Transfer Zone in the current deformation network of Western Anatolia and must be considered to have primary importance in regional seismic risk assessments.

Keywords: Active tectonics, Gelenbe Fault Zone, İzmir–Balıkesir Transfer Zone, kinematic analysis, paleostress analysis, Western Anatolia.

GİRİŞ

Batı Anadolu, Neotetis Okyanusu'nun kapanmasına neden olan levha tektoniği olaylarının gerçekleştiği ve etkilerinin günümüzde de devam ettiği aktif bir deformasyon bölgesidir. Bölgenin günümüzdeki tektonik çatısını oluşturan Kuzey-Güney (K-G) yönlü genişleme rejimi; Ege yay ardı genişleme (McKenzie, 1978; Le Pichon ve Angelier, 1979; 1981), Anadolu levhasının batıya kaçışı (Şengör, 1980; Şengör vd., 1985), orojenik çökme (Seyitoğlu ve Scott, 1991; Seyitoğlu vd., 1992) ve iki evreli grabenleşme (Sözbilir ve Emre, 1996; Koçyiğit vd., 1999) gibi farklı modellerle açıklanmaktadır. Bu dinamik yapı içerisinde, Ege genişleme sistemindeki farklı deformasyonları karşılayan, Batı Anadolu'nun saatin tersi yönünde güneybatıya doğru yaptığı dönüş yönüne yaklaşık paralel uzanımlı doğrultu atımlı fayların baskın olduğu kıtasal ölçekli bir

zayıflık zonu tanımlanmaktadır (Kaya, 1979; 1981; Okay ve Siyako, 1993; Ring vd., 1999; Sözbilir vd., 2003). Bu zon ilk defa Sözbilir vd. (2003) tarafından İzmir-Balıkesir Transfer Zonu (İBTZ) olarak adlandırılmıştır. Bölgede daha sonra gerçekleştirilen jeolojik, jeodezik ve sismolojik çalışmalar zonun varlığı, evrimi ve aktivitesi üzerine yeni kanıtlar sunmuştur (Erkül vd., 2005a ve b; Uzel ve Sözbilir, 2008; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Özkaymak vd., 2013; Uzel vd., 2009; 2013; 2015; Sözbilir vd. 2011; Özkaymak, 2012; Tan, 2013; Brun vd., 2016; Şengöçmen Geçkin vd., 2022; Öncü vd., 2024; Solak vd., 2024). Uzel vd. (2015) tarafından yapılan çalışmaya göre İBTZ, Ege Genişleme Sistemi içindeki Kiklad ve Mendere metamorfik çekirdek kompleksleri arasında farklı genişleme deformasyonlarını sınırlar ve her iki kompleksin de yüzeye çıkma tarihlerinde önemli bir rol oynamıştır. Bununla beraber, Neotektonik

dönem boyunca zonun doğusundaki yaklaşık D-B uzanımlı normal faylarla baskın Batı Anadolu grabenleri ile batısındaki normal ve doğrultu atımlı karakterlerdeki fayların yer aldığı Kuzey Ege Bölgesini birbirinden ayırdığı, bu bölgelerdeki yaklaşık K-G yönlü gerilim farklılıklarından ortaya çıkan enerjiyi transfer ettiği bilinmektedir (Uzel ve Sözbilir, 2008; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Özkaymak vd., 2013; Özkaymak, 2012; Sözbilir vd. 2011; Uzel vd., 2009; 2013; 2015; Brun vd., 2016).

Batı Anadolu'daki KD-GB uzanımlı zonun ilk tanımlayanlardan birisi olan Kaya (1979), İzmir ile Balıkesir arasındaki KKD uzanımlı fayları oblik atımlı normal faylar olarak tanımlamıştır. Ring vd. (1999), bu zonun Kiklad Adaları ile Menderes Masifi arasında farklılaşmış kabuk genişlemesini sağlayan sol yönlü bir burkulma koridoru olabileceğini belirtmektedir (Ring vd., 1999). İBTZ boyunca elde edilen saha verileri ise bu yapının Neojen döneminden beri yaklaşık D-B yönlü sıkışma ilişkili yaklaşık K-G genişleme kuvvetleri altında KD-GD yönlü sağ yönlü doğrultu atımlı faylanma özelliği sunduğuna işaret etmektedir (Uzel ve Sözbilir, 2008; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Özkaymak vd., 2013; Uzel vd., 2013; Uzel vd., 2014; 2015; Westerweel vd., 2020).

Önceki çalışmalara göre İBTZ'nin kökeni üzerine farklı görüşler bulunmaktadır. Genel görüşe göre, zonun Geç Kretase'de derin kabuksal transform fayı olarak oluştuğu ve Neojen dönemi boyunca transfer fayı olarak yeniden hareket ettiği kabul edilmektedir (Okay ve Siyako, 1993; Ring vd., 1999; Sözbilir vd., 2007, 2011, 2020). Paleomenyetik (van Hinsbergen vd., 2010; Uzel vd., 2015, 2017; Westerweel vd., 2020) ve jeokronolojik (Uzel vd., 2020) çalışmalar, bu zonun erken Miyosen'den beri kabuk ölçekli süreçlerde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. İBTZ'nin, muhtemelen geç Miyosen'den beri KAFZ'nun bölgeye girişi ile Kuzey Ege'de NAFZ'nin güney koluyla etkileşim halinde olduğu bazı yayınlarda

ifade edilmiştir (Sözbilir vd., 2017; Sümer vd., 2018; Westerweel vd., 2020). Ayrıca, litosfer ölçeğinde genişleme ve Ege Denizi bölgesinin açılması, geç Oligosen ve erken Miyosen'de 23 milyon yıl önce başladığı kabul edilmektedir (Seyitoğlu vd. 1992; Ring vd. 2010). Güncel bir çalışmada, KAFZ üzerindeki fay düzlemlerinde gerçekleştirilen U-Pb ve K-Ar tarihlemeleri KAFZ'nin Batı Anadolu'daki oluşum yaşını erken Miyosen'e (Yaklaşık 20 milyon yıl) çekerek oluşumun Ege genişlemesi ile başladığını ileri sürmektedir (Uysal vd., 2025). Yakın dönemdeki bazı araştırmalarda, İBTZ boyunca tanımlanan sağ yönlü doğrultu atımlı sistemin KAFZ'nin güney koluna ait olduğu ifade edilmektedir (Seyitoğlu vd., 2022; Seyitoğlu ve Esat 2022). Buna karşın, KAFZ'nin Kuzey Ege'ye ulaşmasından yaklaşık 10 milyon yıl önce İBTZ'nin var olduğunu ifade eden Brun vd. (2016) bu zonun Ege denizinde Myrthes'ten İkaria'ya uzanan zonun karadaki devamı olarak yorumlamakta ve 450 km uzunluğunda Mirthes-Balıkesir Fay Zonu olarak tanımlamaktadır. Ayrıca, İBTZ'nin Ege ve Batı Anadolu'nun altına dalan Afrika okyanusal litosferindeki bir yırtılmanın yüzeydeki bir izi olduğu da öne sürülmektedir (Gessner vd., 2013; Jolivet vd., 2013; Uzel vd., 2015). Son yıllarda zon içerisindeki fay segmentlerinde gerçekleştirilen paleosismolojik çalışmalar İBTZ'nin Holosen aktivitesine yönelik yeni veriler sunmaktadır (Şengöçmen Geçkin vd., 2022; Öncü vd., 2024; Özcan vd., 2025).

Bu kompleks sistemin önemli bileşenlerinden biri olan GFZ, Bigadiç (Balıkesir) ile Akhisar (Manisa) arasında yer alan, Kuzey-Kuzeydoğu ile Güney-Güneybatı (KKD-GGB) uzanımlı doğrultu atımlı bir zondur ve İBTZ içerisinde tanımlanmaktadır (Şaroğlu vd., 1987; Emre vd., 2011; 2013; Westerweel vd., 2020; Solak vd., 2024). İlk kez Şaroğlu vd. (1987) tarafından "Soma-Kırkağaç-Gölcük yöresi fayları" adı altında tanımlanan ve 1992 yılında basılan Türkiye Diri Fay Haritası'na (TDFH) "olasılı diri

fay” statüsünde giren bu zon, 2011 yılında diri fay olarak güncellenmiştir (Şaroğlu vd., 1987, 1992; Emre vd., 2011). Güncel verilere göre GFZ, toplam uzunlukları sırasıyla 35 km ve 36 km olan Doğu ve Batı olmak üzere birbirine yaklaşık paralel uzanan iki ana segmentten oluşmaktadır (Emre vd., 2018). Fayın sismojenik derinliği 16-18 km aralığında kabul edilmekte olup, yaklaşık olarak 6,9 Mw büyüklüğüne kadar deprem üretme potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir (Emre vd., 2011; Duman vd., 2018). Seyitoğlu vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise KD-GB uzanımlı Gelenbe Fayı olarak, Saruhanlı (Manisa) ile Nusret (Kepsut, Balıkesir) arasında, Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun güney kolu olarak tanımlanmıştır.

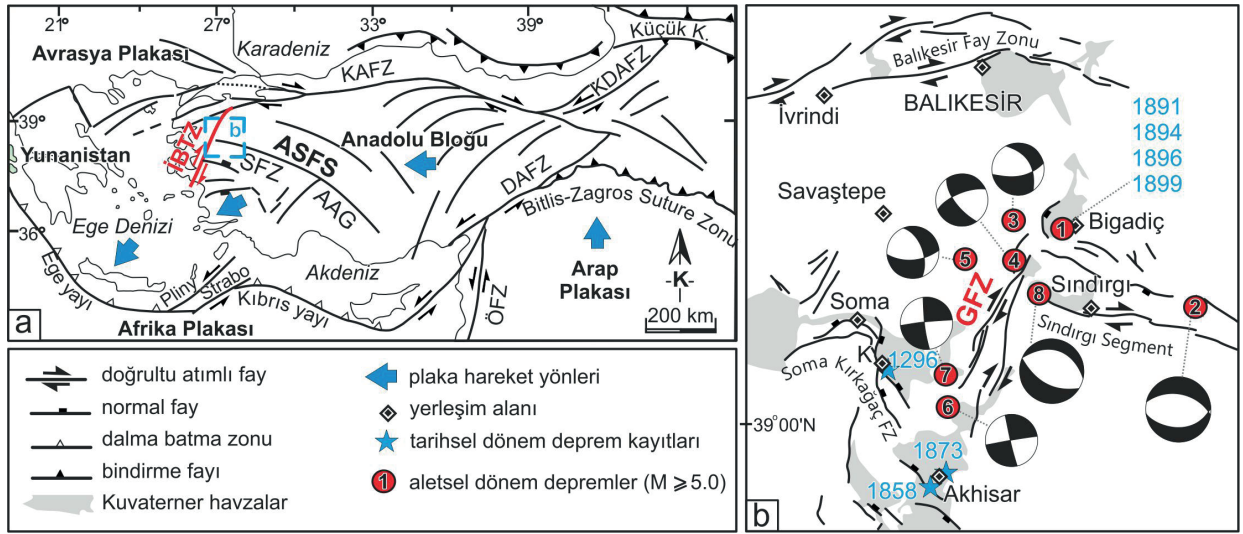
GFZ’ye ait doğu segment üzerinde gerçekleştirilen hendek tabanlı paleosismolojik çalışmaların ön bulguları, zonun Holosen aktivitesini belgelemiştir (Özcan vd., 2025). Tarihsel kayıtlara göre bu zon ve yakın çevresinde 1296-1899 yılları arasında VI-VIII şiddetlerinde değişen 9 yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Aletsel dönemde (1900-2026) yüzey kırığı oluşturan bir deprem gözlemlenmemiştir. Ancak büyüklükleri 0.4 ile 6.1 arasında değişen çok sayıda deprem kaydı bölgenin tektonik olarak aktif olduğunu göstermektedir. Depremlerin odak mekanizma çözümleri, doğrultu atımlı ve normal faylanma bileşenlerinin birlikte bulunduğu transtansiyonel bir gerilme rejimine işaret etmektedir (Şekil 1). Holosen yaşlı fay sarplıkları, tarihsel ve aletsel dönemde kaydedilen depremler, bölgenin güncel tektonik aktivitesi olduğuna işaret eder. Özellikle 2020 yılı ve sonrasında (6,7 numara, Şekil 1) Akhisar ile Kırkağaç arasında ve son olarak da 10.08.2025 Sındırgı Depremi (M_w :6.1) sonrasında gelişen sismik aktiviteler, GFZ’nin aktifliği ve gerilim transferi süreçleri üzerine dikkatleri bu bölgeye çekmiştir (Eyidoğan, 2020; Sözbilir vd., 2020; Seyitoğlu vd., 2022; Tiryakioğlu vd., 2026). Bununla birlikte, KKD-GGB uzanımlı GFZ ile bu zona yaklaşık dik doğrultulu Akşehir-Simav Fay Sistemi’nin bir kolu olan Sındırgı Segmenti

arasındaki kinematik ilişki henüz ayrıntılı olarak çalışılmamıştır. Bununla beraber, GNSS tabanlı modern jeodezik çalışmalarda yayınlanan güncel gerinimlerin GFZ üzerinde KB-GD yönlü sıkışma ve KD-GB yönlü genişleme etkili doğrultu atım mekanizmasına işaret etmektedir (Solak, 2020; Solak vd., 2024). GFZ’nin aktif tektoniğine ve kinematik analizine ilişkin saha verilerine dayalı yayınlanmış çalışmalar bulunmamakla birlikte, 2016-2017 yılları ile 22 Ocak 2020 (Mw 5.5) sonrası sismik etkinliklerin bu fay zone ile ilişkili olabileceği ileri sürülmüştür (Irmak vd., 2020; Eyidoğan, 2020; Sözbilir vd., 2020). Seyitoğlu vd. (2022) çalışmasında ilgili yıllarda meydana gelen depremler KAFZ’nin güney kolu olarak tanımlanan KD-GB uzanımlı sağ yanal zon içerisindeki KB-GD uzanımlı sol yanal makaslama ile ilişkilendirilmiştir. Aletsel dönemde, bu zon boyunca meydana gelen depremlerin odak mekanizma çözümleri baskın olarak doğrultu atımlı faylanma karakterine işaret etmektedir (Şekil 1).

Mevcut literatürde GFZ’nin diri fay statüsü ve sismik aktivitesi belgelenmiş olsa da zonun kinematik özelliklerine ve aktif tektoniğine dair doğrudan saha verisine dayalı jeolojik çalışmalar oldukça sınırlıdır (Seyitoğlu vd., 2022; Özcan vd., 2025; 2026). Bu çalışmanın temel amacı, GFZ’nin detaylı yüzey geometrisini haritalayarak kinematik karakterini ve paleogerilme geçmişini güncel sismolojik/jeodezik veriler ışığında belirlemek; böylece yapının İBTZ içerisindeki “transfer bariyeri” rolünü ve sismik risk potansiyelini somut verilerle ortaya koymaktır.

YÖNTEM

GFZ üzerinde yapılan bu çalışmada bölgede yüzlek veren kaya birimleri jeolojik haritalama yöntemleriyle haritalanmıştır. Saha çalışmaları sırasında fayların segmentasyonu, fayların yüzeydeki izleri ve geometrilerine göre belirlenmiştir.



Şekil 1. a) Doğu Akdeniz'in neotektonik yapıları (Özkaymak, 2015; Özkaymak vd. 2019'dan alınmıştır). Kısaltmalar: ASFS, Akşehir-Simav Fay Sistemi; AAG, Afyon-Akşehir Grabeni; SFZ: Simav Fay Zonu; DAFZ, Doğu Anadolu fay Zonu; KAFZ, Kuzey Anadolu Fay Zonu; NEAFZ, Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu; ÖFZ: Ölüdeniz Fay Zonu. **b)** GFZ ve yakın çevresinin sismotektonik haritası (diri faylar Emre vd., 2011; tarihsel dönem deprem verileri Duman vd., 2018; Ergin vd., 1967; Soysal vd., 1981; Ambraseys, 1988, 2009; Ambraseys ve Jackson, 1998'den alınmıştır). Haritada sunulan büyüklüğü 5 ve üzerindeki aletsel dönem deprem numaraları, deprem verileri ve referansları aşağıda sunulmuştur: 1. 15.11.1942 (Mw:6,0, Kalafat, 1995); 2. 25.03.1969 (Ms:6,1; Kalafat, 1995); 3. 24.07.1999 (Mw:5,0; Duman vd., 2018; KRDAE, 2026); 4. 25.07.1999 (Mw:5,2, Duman vd., 2018; KRDAE, 2026); 5. 22.06.2001 (Mw:5,2; Duman vd., 2018; KRDAE, 2026); 6. 22.01.2020 (Mw:5,5; KRDAE, 2026); 7. 18.02.2020 (Mw:5,1, KRDAE, 2026); 8. 10.08.2025 (Mw:6,1, AFAD, 2026).

Figure 1. a) Neotectonic structures of the Eastern Mediterranean (modified from Özkaymak, 2015; Özkaymak et al., 2019). Abbreviations: ASFS, Akşehir-Simav Fault System; AAG, Afyon-Akşehir Graben; SFZ: Simav Fault Zone; DAFZ, East Anatolian Fault Zone; KAFZ, North Anatolian Fault Zone; KDAFZ, Northeast Anatolian Fault Zone; ÖFZ: Dead Sea Fault Zone. **b)** Seismotectonic map of the GFZ and surroundings (active faults are taken from Emre et al., 2011; historical earthquake data are compiled from Ergin et al., 1967; Soysal et al., 1981; Ambraseys, 1988, 2009; Ambraseys and Jackson, 1998). The instrumental period earthquakes ($M > 5$) presented on the map by numbers and the corresponding earthquake data/references are as follows: 1. 15.11.1942 (Mw:6.0; Kalafat, 1995); 2. 25.03.1969 (Ms:6.1; Kalafat, 1995); 3. 24.07.1999 (Mw:5.0; Duman et al., 2018; KRDAE, 2026); 4. 25.07.1999 (Mw:5.2; Duman et al., 2018; KRDAE, 2026); 5. 22.06.2001 (Mw:5.2; Duman et al., 2018; KRDAE, 2026); 6. 22.01.2020 (Mw:5.5; KRDAE, 2026); 7. 18.02.2020 (Mw:5.1; KRDAE, 2026); 8. 10.08.2025 (Mw:6.1, AFAD, 2026).

Bu çalışmada internet üzerinde ücretsiz erişime sahip uydu görüntüleri (GoogleEarth) ve sayısal yükseklik modelleri (AsterGDEM-v2, SRTM v3) kullanılmıştır. NASA tarafından kullanıcıların erişimine açık olarak verilen SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) verileri kullanılarak bölgenin tektonik yapısı, jeomorfolojisi ve fay geometrisi çalışmalarına altlık oluşturmıştır. Haritalama sırasında saha gözlemleri ile uzaktan algılama çıktıları karşılıklı

kontrol edilerek fay izleri ve segment sınırları nihai hale getirilmiştir. Yine saha çalışmalarında alüvyal yelpazeler, dağ önü çizgisellikleri, fay sarplıkları gibi yapılardan faydalanarak bölgenin jeomorfolojisi yorumlanmış ve fayların özellikleri ortaya konulmuştur. Bölgenin sismotektonik yapısı araştırılırken Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE), AFAD ve Avrupa-Akdeniz Sismoloji Merkezi (EMSC) üzerinden tüm sismik verilere

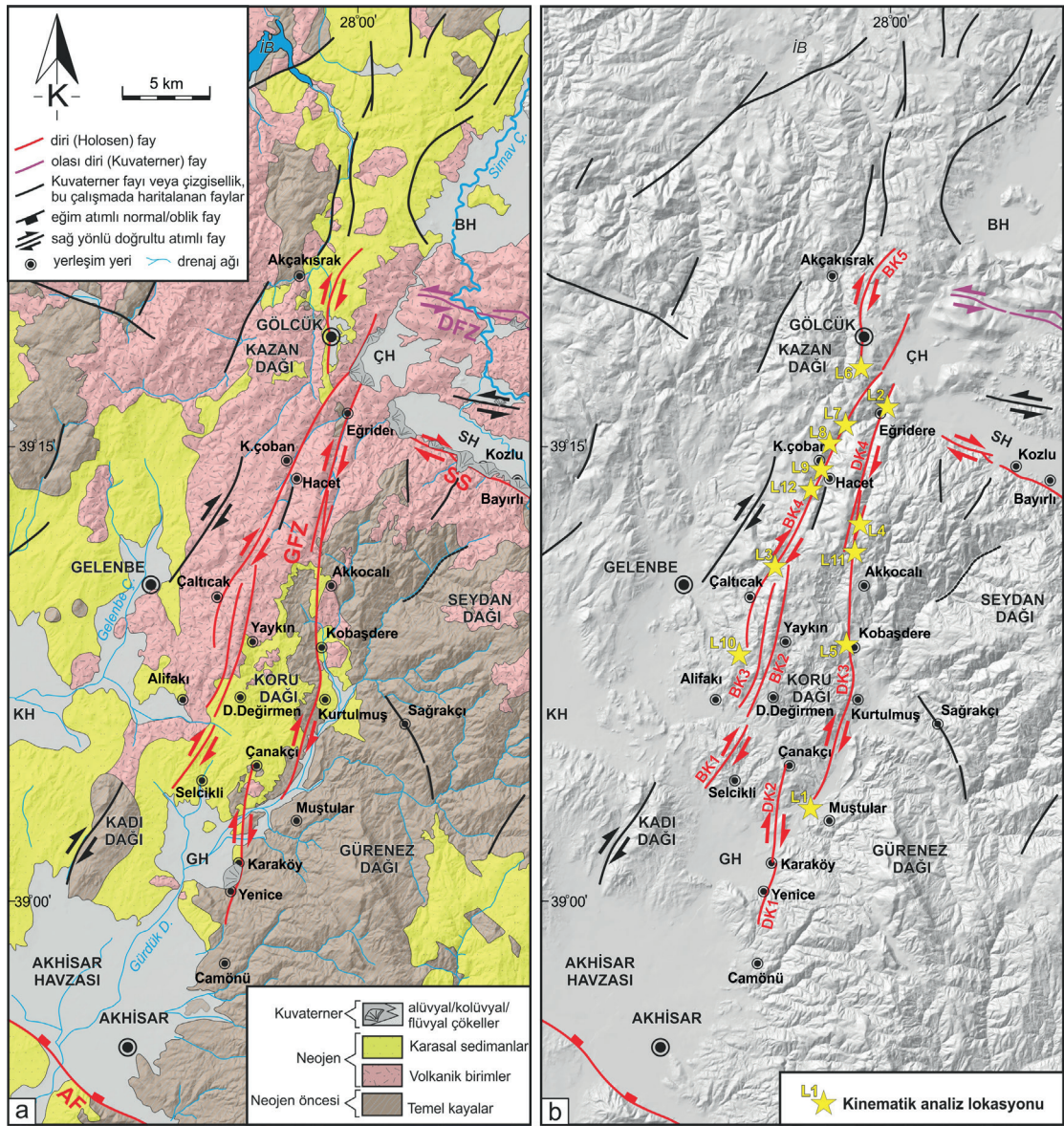
ulaşmıştır. Aletsel katalog değerlendirmesinde, dışmerkez dağılımının yorumunda lokasyon belirsizlikleri ve küçük depremler için büyüklük tamlığı (Mc) gibi parametrelerin sonuçları etkileyebileceği dikkate alınmıştır. Bu nedenle sismisite yoğunlaşmalarının fay izleriyle ilişkisi, sadece noktasal dışmerkez konumlarına göre değil; bölgesel dağılım, odak mekanizma çözümleri ve saha-temelli fay geometrisiyle birlikte değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı içerisinde literatürde haritalanan ve yeni belirlenen çizgisellikler de arazide ayrıntılı olarak geometrileri (doğrultu, eğim, uzanım ve hareket türü) belirlenerek haritaya işlenmiştir. Saha çalışmalarından fay düzlemleri tespit edilerek bu yüzeyler üzerinden fay kinematiğine yönelik ölçümler yapılmıştır. Kinematik analiz çalışmaları, elde edilen bu fay yüzeyi verilerinin Angelier'in gerilme terslenme yöntemi (Hardcastle ve Hills 1991 ve Angelier 1984, 1991, 1994) ile geliştirilen program kullanılarak incelenmiştir. Gerilme terslenme analizleri sonucunda asal gerilme eksenlerinin konumları, gerilme elipsoidinin şekli ve buna bağlı deformasyon rejimi belirlenmiştir. Saha çalışmalarından alınan bu veriler asal gerilme büyüklükleri ve stres elipsoidinin şekline göre o bölgedeki deformasyonu oluşturan faylanmanın tipi, dağılımı ve hareket yönü hakkındaki bilgiler Angelier Programında veriler analiz edilerek elde edilmiştir (Angelier, 1984). Aynı fay düzleminde birden fazla kayma izinin bulunduğu durumlarda, çizik yönlerinin kümelenmesi, kesen-kesilen kronolojik ilişkileri ve yüzey morfolojisi birlikte değerlendirilerek ölçümler farklı deformasyon evrelerine ayrılmıştır. Paleogerilme terslenmelerinde, lokasyon bazında veri sayısı ve çözüm kalitesi (ör. düşük ANG değerlerinin yoğunluğu ve çözümlerin tutarlılığı) kontrol edilerek yorumlar yalnızca güvenilir kümeler üzerinden yapılmıştır. Fay düzlemi çözümleri için Fault Kin Win programı kullanılmıştır. Çalışma alanındaki fay düzlemlerinden elde edilen

verilerin fay düzlemi çözümü yapılması amacıyla FaultKin 8.3.2 yazılımı (Allmendinger vd., 2012) kullanılmıştır.

BULGULAR

Bu çalışma kapsamında bölgede yüzlek veren kaya birimleri 3 guruba ayrılarak haritalanmıştır; Neojen öncesi temel kayalar, Neojen birimler ve Kuvaterner çökeller (Şekil 2). GFZ, Geç Kretase-Paleosen yaşlı, türbiditik matriks içinde, Mesozoyik kireçtaşı, spilitik volkanitler, çört ve serpantinleşmiş peridotit blokları ve mikritik kireçtaşları merceklerinden oluşan Bornova Fliş Zonu (Izdar, 1968; Öngür, 1972; Akyürek ve Soysal, 1978; Erdoğan, 1990; Okay ve Siyako, 1993; Erkül vd. 2005a, b) üzerinde yer alır. Bu temel kayalar üzerinde yer alan Erken Miyosen istifleri gölsel, flüviyal ve evaporitik sedimanter kayalar ile bunları kesen KD-GB doğrultulu volkanik çıkış merkezlerinden üretilen lav ve volkano-klastik kayalar ile temsil edilmektedir. Bölgedeki bu erken Miyosen Volkanizması 17,8-23 Milyon yıl öncesi zamana tarihlendirilmiştir (Erkül vd., 2005a). Miyosen dönemine ait volkanik kayalar (andezit, dasit vb.) ile gölsel-akarsu çökel birimleri (kilaşı, kireçtaşı, marn) geniş yayılım sunar. GFZ boyunca, Neojen öncesi temel kayalar ile Neojen yaşlı volkanikler ve/veya karasal kırıntılıların sıklıkla yan yana geldiği ve fay kontrollü dokanaklı oldukları gözlenmiştir. Stratigrafik olarak en üstte yer alan Kuvaterner birimlerini ise konsolide olmamış alüvyon ve yamaç döküntüleri ile temsil eder. Fay zonu boyunca gelişen havzalarda (Kırkağaç, Bigadiç, Sındırgı vb.) güncel alüvyonlar, yelpaze çökelleri ve yamaç molozları gözlenmektedir. Bigadiç, Sındırgı ve Kırkağaç Havzaları: Fayın sağ yönlü doğrultu atımlı ve transtansiyonel karakteri, bu havzaların açılma mekanizmalarını doğrudan etkiler. Çakıllı (ÇH) ve Gürdükçayı Havzaları (GH), fay segmentleri arasındaki sıçrama ve kavis alanlarında gelişmiş daha küçük ölçekli çöküntü alanlarıdır (Şekil 2).



Şekil 2. a) GFZ ve çevresinin jeoloji haritası (Bu çalışma kapsamında haritalama yapılmıştır, sahada ulaşılamayan yerlerin verisi Emre vd., 2011; Akbaş vd., 2011; Akyürek ve Soysal, 1983; Erkül vd., 2005a ve b; 2010'dan alınmıştır), **b)** GFZ'nin segment yapısı, fay yüzey geometrisi ve kinematik analiz lokasyonlarını gösteren harita. Kısaltmalar; GFZ: Gelenbe Fay Zonu, SS: Simav Fay Zonu, Sındırgı Segmenti, AF: Akhisar Fayı, DFZ: Düvertepe Fay Zonu, DK1-4: Doğu segment kol 1-4; BK1-5: Batı segment kol 1-5; BH: Bigadiç Havzası; SH: Sındırgı Havzası; CH: Çakılı Havzası, KH: Kırkağaç Havzası; GH: Gürdükçayı Havzası AH: Akhisar Havzası.

Figure 2. a) Geological map of the GFZ and its surroundings (mapping was conducted within the scope of this study; data for inaccessible field areas were compiled from Emre et al., 2011; Akbaş et al., 2011; Akyürek and Soysal, 1983; Erkül et al., 2005a & b; 2010), **b)** Map showing segment structure, fault surface geometry, and kinematic analysis locations on the GFZ. Abbreviations: GFZ: Gelenbe Fault Zone, SS: Simav Fault Zone, Sındırgı Segment, AF: Akhisar Fault, DFZ: Düvertepe Fault Zone, DK1-4: East segment strands 1-4; BK1-5: West segment strands 1-5; BH: Bigadiç Basin; SH: Sındırgı Basin; CH: Çakılı Basin; KH: Kırkağaç Basin; GH: Gürdükçayı Basin, AH: Akhisar Basin.

Segment Özellikleri ve Fay Geometrisi

GFZ, genel uzanımı KKD-GGB gidişli birbirine yaklaşık paralel Doğu ve Batı olmak üzere iki ana segmentten meydana gelmektedir. Saha gözlemleri ve 1/25.000 ölçekli haritalama çalışmaları sonucunda, bu segmentlerin geometrik özellikleri ve alt fay kolları detaylandırılmıştır (Şekil 2). Doğu segment yaklaşık 35 km uzunluğunda olup genel uzanımı K-G ile K10-20°D arasında değişen dört ana fay kolundan meydana gelmektedir (DK1-4). En güneyde yer alan ve yaklaşık 4,1 km uzunluğa sahip DK1 kolu, Camönü kuzeyinden başlayarak Yenice ve Karaköy üzerinden kuzeydoğuya doğru uzanmaktadır. Karaköy civarında K-G doğrultusuna kavis yaparak yaklaşık 250 m'lik sol yanıl sıçrama göstermektedir. DK2 kolu Karaköy kuzeyinde belirgin çizgisellik sunmakta ve yaklaşık 4,5 km boyunca K5°D doğrultusunda ilerleyerek Çanakçı güneyine ulaşmaktadır. Bu kesimde yaklaşık 2,2 km'lik sağ yanıl sıçrama ile yaklaşık 20 km uzunluğundaki DK3 koluna geçiş gözlenmektedir. Segmentin en belirgin yapılarından biri olan DK3 kolu güneyde Muştular civarında Gürdük Çayı'na paralel (yaklaşık K20°D) uzanım sunarken kuzeye doğru doğrultu değiştirerek önce K-G, ardından K10°B doğrultusuna doğru yönelmektedir. Kobaşdere-Akkocalı arasında tekrar K-G doğrultusunda izlenen bu kol, kuzeyde çatallanarak DK4 ile bağlantı eğilimi göstermektedir. Yaklaşık 11 km uzunluğundaki DK4 kolu, dağlık alan içerisinde K20°D uzanımlı, derin ve çizgisel vadiler boyunca izlenmekte ve Eğridere kuzeyinde sonlanmaktadır (Şekil 3).

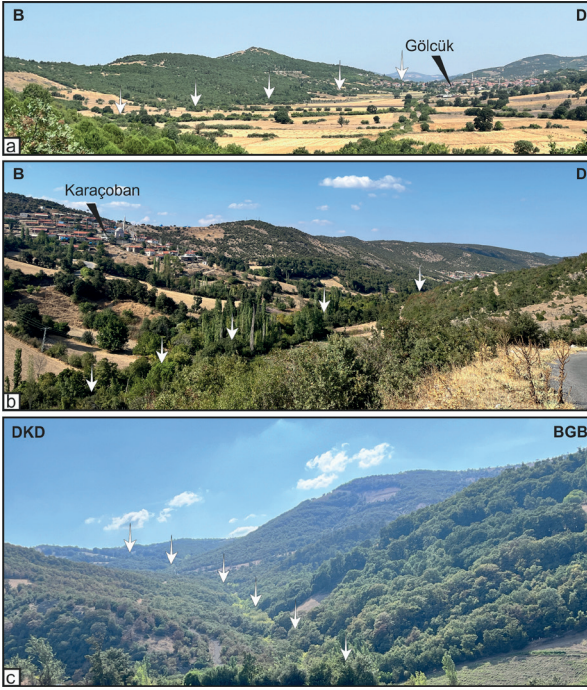
Batı segment, uzanımı K-G ile K35°D arasında değişen 5 fay kolundan (BK1-5) oluşmakta olup, morfolojik olarak belirgin çizgisel gidişli derin vadilerle temsil edilmektedir. En güneydeki BK1 kolu, Kadı Dağı kuzeydoğusundan başlayarak Selçikli-Dolmadeğirmen arasında yaklaşık 5 km boyunca uzanmaktadır. Bunun kuzeyinde yer alan paralel kollardan doğudaki BK2 kolu yaklaşık 10 km uzunluğunda olup K15°D doğrultusunda devam etmektedir.



Şekil 3. GFZ'nin morfolojik izlerini gösteren saha fotoğrafları. **a)** Akkocalı kuzeyinde DK4 fay kolu, **b)** Akkocalı ile Kobaşdere arası DK3 fay kolu, **c)** Eğridere kuzeyinde DK4 fay kolu, **d)** Kurtulmuş güneyi DK3 fay kolu.

Figure 3. Field photographs showing the morphological traces of the GFZ. **a)** DK4 fault strand north of Akkocalı, **b)** DK3 fault strand between Akkocalı and Kobaşdere, **c)** DK4 fault segment north of Eğridere, **d)** DK3 fault strand south of Kurtulmuş.

Batıdaki BK3 kolu ise Alifakı doğusundan başlayarak yaklaşık 8 km boyunca kuzeydoğuya uzanmakta ve Yaykın batısında sol yanıl sıçrama ile BK4 koluna bağlanmaktadır. Batı segmentin en uzun kolu olan BK4 yaklaşık 23 km uzunluğundadır. Güneyde Çaltıcak civarında K-G doğrultusundan K20°D doğrultusuna doğru kavis yapan bu kol, kuzeye doğru Eğridere ve Hacet üzerinden K25°D doğrultusunda çizgisel bir morfoloji sunarak Gölcük doğusunda sonlanmaktadır. En kuzeyde yer alan BK5 kolu ise yaklaşık 8 km uzunluğunda olup Gölcük güneyinden geçmekte, kuzeye doğru yay geometrisi sergileyerek KD doğrultusuna yönelmekte ve Akçakırsak doğusunda sonlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. GFZ'nin morfolojik izlerini gösteren saha fotoğrafları. **a)** Gölçük yerleşim alanı güneyinde BK5 fay kolu, **b)** Karaçoban ile Hacet arasında ve **c)** Hacet ile Armutcuk köyleri arasında morfolojik olarak çizgisel gidişli derin vadiler ile tipik BK4 fay kolu.

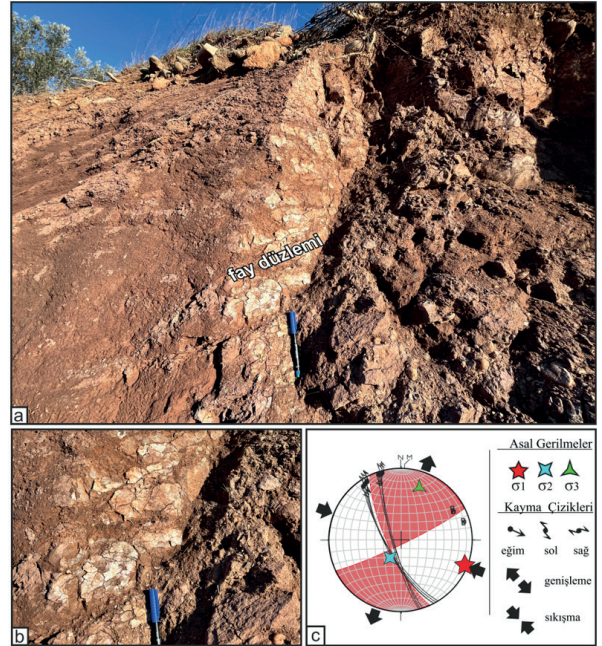
Figure 4. Field photographs showing the morphological traces of the GFZ. **a)** BK5 fault strand south of the Gölçük settlement area, **b)** between Karaçoban and Hacet, and **c)** between Hacet and Armutcuk villages, displaying morphologically linear, deeply incised valleys and the typical BK4 fault strand.

Paleostres Analiz Sonuçları ve Rejim Karakteri

GFZ boyunca Doğu ve Batı segmentleri üzerinde ve yakın civarında toplam 12 lokasyonda iyi korunmuş fay düzlemleri tespit edilmiş ve bu kayma yüzeylerinden 132 adet kinematik ölçüm toplanmıştır (Şekil 2; Çizelge 1).

Çalışma alanı içerisinde yer alan Karaköy yerleşim alanının kuzeydoğusunda Doğu segmentin güney ucuna yakın bir bölgede Lokasyon 1'de (L1) yapılan ölçümler, doğrultuları K15°B ila K32°B, eğim açıları ise 72° ila 82° arasında değişen GB'ya eğimli antitetik özellikli

ikincil kırık düzlemleri üzerinde 3° ila 10° arasında değişen rake/sapma açılarına sahip kayma çizikleri ölçülmüştür (Şekil 5). Kinematik göstergeler faylanma karakterinin sol yönlü doğrultu atımlı olduğuna işaret etmektedir. Bu lokasyonda toplanan 7 adet kinematik ölçümün paleogerilme analizine göre σ_2 (211°/66°)'nin düşeye yakın dalımlı, σ_1 (111°/04°) ve σ_3 (020°/23°)'ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.283 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 'nin düşeyde ve ekstenel oranının 1 ila 0,75 arasında olması, bu fayın BKB-DGD yönlü sıkışma ve KKD-GGB yönlü genişleme ile ilişkili saf doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 5. Lokasyon 1'de (L1) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2'ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 5. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 1 (L1) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Çizelge 1. Çalışma alanı içerisinde kayma yüzeylerinden toplanan kinematik verilerin paleostres analiz sonuçları. Kısaltmalar: L: Lokasyon, D: Doğrultu, SOLY: Sol yönlü doğrultu atımlı, SAĞY: Sağ yönlü doğrultu atımlı, EN: Eğim atımlı normal, ON: Oblik atımlı normal, ANK: Antitetik ikincil kırık, SNK: Sintetik ikincil kırık, AK: Ana fay kırığı.

Table 1. Paleostress analysis results from kinematic data collected from slip surfaces within the study area. Abbreviations: L: Location, D: Strike, SOLY: Left lateral strike-slip, SAĞY: Right lateral strike-slip, EN: Dip-slip normal, ON: Oblique-slip normal, ANK: Antithetic secondary fault, SNK: Synthetic secondary fault, AK: Main/principal fault.

Fay kolu	L	D	Fay türü	Kırık türü	Veri Sayısı	σ_1	σ_2 (Derece)	σ_3	Φ	Max ANG
DK3	L1	KB-GD	SOLY	ANK	7	111/04	211/66	020/23	0,283	8
DK4	L2-R1	KD-GB	ON	AK	8	065/53	272/34	173/13	0,357	11
	L2-R2	KD-GB	EN	AK	8	089/85	228/04	318/03	0,447	2
BK4	L3	KD-GB	SOLY	ANK	9	030/17	211/73	120/00	0,373	2
DK3	L4	KKD-GGB	SAĞY	AK	10	225/74	056/16	326/03	0,896	11
DK3	L5	KD-GB	ON	AK	10	091/59	267/31	358/02	0,397	6
BK5	L6	KD-GB	ON	SNK	14	155/76	247/01	337/14	0,655	20
BK4	L7	KD-GB	SAĞY	AK	12	060/40	265/47	161/13	0,788	22
BK4	L8	KB-GD	SOLY	ANK	13	249/10	126/72	342/14	0,446	20
BK4	L9	KD-GB	SAĞY	SNK	10	289/03	024/62	197/28	0,180	13
BK4	L10	KB-GD	SOLY	ANK	9	085/08	313/78	176/09	0,378	4
DK3	L11	KKB-GGD	SOLY	ANK	6	285/17	112/73	016/02	0,592	5
BK4	L12	KKB-GGD	SOLY	ANK	16	279/13	150/70	013/15	0,389	11

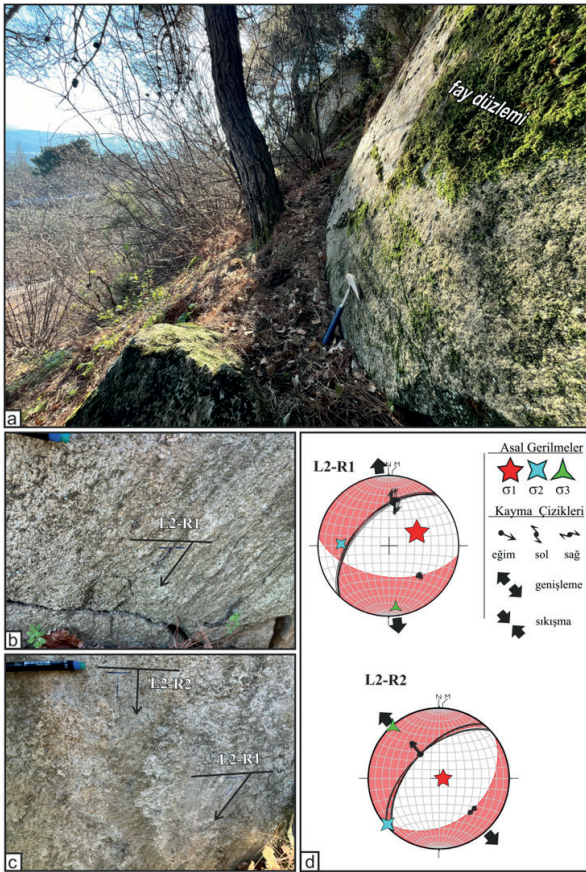
Doğu segmentin en kuzeyinde Eğridere yakınlarında yer alan L2'deki K40°D ile K46°D fay düzlemlerinden alınan ölçümlerde 2 farklı faza işaret eden kayma çizikleri gözlenmektedir (Şekil 6).

Arazi gözlemlerinde, bu fay üzerinde sağ yanal ve normal bileşenli oblik faylanmayı işaret eden kayma çiziklerinin, yüksek rake açılarına sahip normal faylanma tarafından üzerlendikleri görülmektedir. KD-GB doğrultulara sahip faylarda 52° ile 47° arasında değişen kayma çizikleri seti ile (L2-R1) 86°-83° arasında değişen kayma çizikleri seti (L2-R2) ayrı ayrı analiz edilmiştir. L2-R1 lokasyonundan elde edilen kinematik verilere göre σ_1 (065°/53°)'in düşeye yakın dalımlı, σ_2 (272°/34°) ve σ_3 (173°/13°)'ün ise nispeten yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.357 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_1 'in düşeye daha yakın ve eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması bu fayın

yaklaşık K-G yönlü saf genişlemeli tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir. L2-R2 lokasyonunda yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre, σ_1 (089/85)'in düşeye yakın dalımlı, σ_2 (228°/04°) ve σ_3 (318°/03°)'ün ise neredeyse yatayda ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.447 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_1 'in düşeyde ve eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması, üzerinde çalışılan bu fayın yaklaşık KB-GD yönlü saf genişlemeli tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.

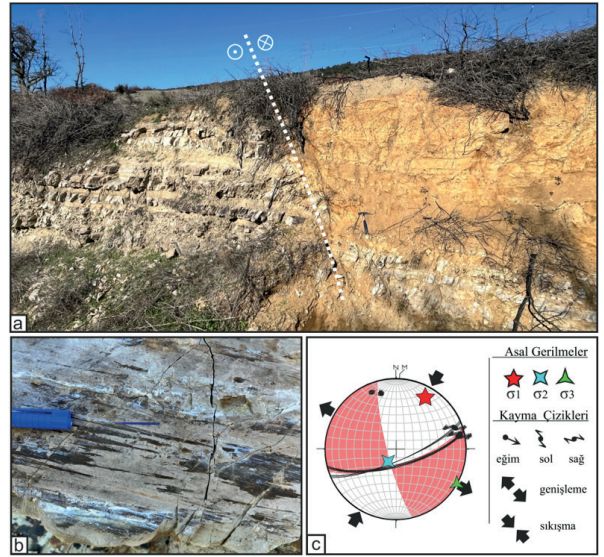
Zonun batı segmenti üzerinde, Çaltıcak kuzeyinde yüzlek veren Miyosen yaşlı volkanoklastik birimler içerisinde yer alan antitetik ikincil kırıkların gözlemlendiği L3'te sol yanal harekete işaret eden kinematik göstergeler gözlenmiştir. K66°D ile K76°D doğrultuya ve 69° ile 76° arasında değişen eğime sahip kayma düzlemleri üzerinde, 8° ile 14° arasında değişen rake açıları ölçülmüştür (Şekil 7) Elde edilen verilere göre, bu lokasyonda toplanan

9 adet fay yüzeyi ölçümünden edilen verilere göre, σ_2 ($211^\circ/73^\circ$)'nin düşeye yakın dalımlı, σ_1 ($030^\circ/17^\circ$)'in yataya yakın ve σ_3 ($120^\circ/00^\circ$)'ün ise yatayda olduğu, gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.373 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre, σ_2 'nin düşeyde ve eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması üzerinde çalışılan bu fayın KD-GB yönlü sıkışma ve KB-GD yönlü genişleme ile ilişkili baskın olarak sol yönlü, minör normal bileşene sahip doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 6. Lokasyon 2’de (L2) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

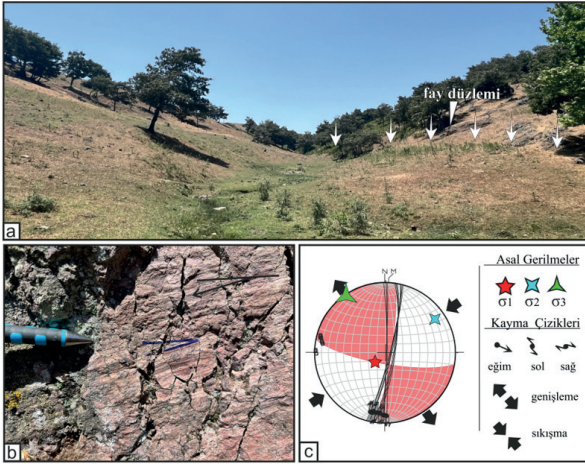
Figure 6. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 2 (L2) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).



Şekil 7. Lokasyon 3’de (L3) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

Figure 7. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 3 (L3) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

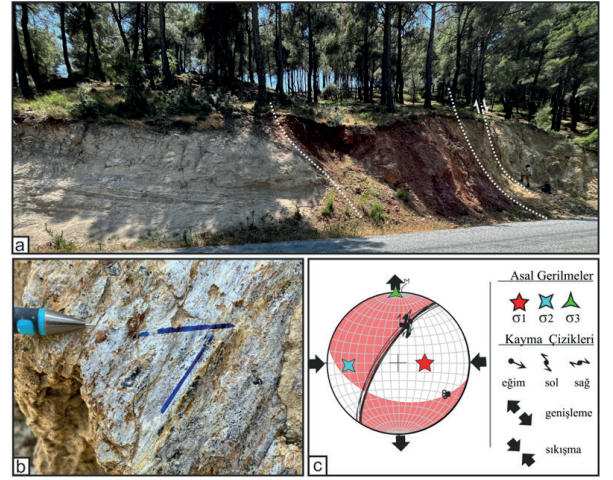
L4 lokasyonunda yapılan saha gözlemlerine göre, K01°D ila K15°D doğrultularında, 78° ila 88° arasında değişen güneydoğuya eğimli iyi korunmuş fay düzlemleri gözlemlenmiştir (Şekil 8). Kayma düzlemleri üzerinde 11° ila 16° arasında kayma çizikleri ölçülmüştür. Fay kertikleri gibi kinematik göstergeler, fayın sağ yanal doğrultu atımlı karakterine işaret etmektedir. Kayma yüzeyinden toplanan 10 adet ölçümün paleostres analizlerine göre, σ_1 ($225^\circ/74^\circ$)'in düşeye yakın dalımlı, σ_2 ($056^\circ/16^\circ$) ve σ_3 ($326^\circ/03^\circ$)'ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.896 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_1 'in düşeyde ve eksenel oranın 0,75 ila 1 arasında olması bu fayın yaklaşık KD-GB yönlü sıkışma ilişkili KB-GD yönlü genişlemeli tektonik rejim etkisinde transtansiyonel ortamda geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 8. Lokasyon 4’de (L4) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

Figure 8. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 4 (L4) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

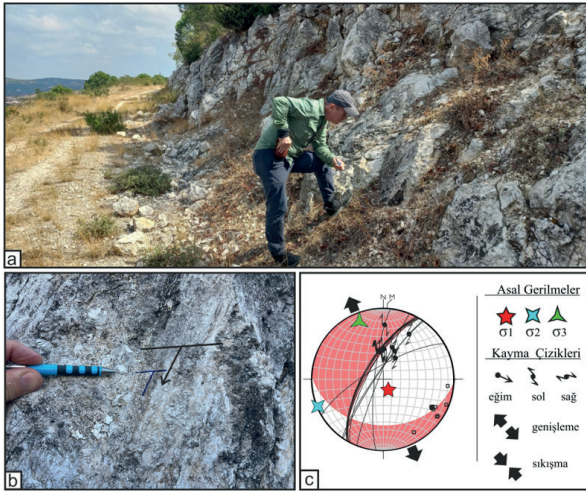
Doğu segment üzerindeki Kocabaşdere güneyinde yer alan, K31°D ila K36°D doğrultularına, 78° ila 88° eğim açılarına ve GD eğim yönüne sahip fay düzlemleri gözlenmiştir (L5, Şekil 9). Fay düzlemlerinde gözlenen ve 42° ila 51° arasında değişen kayma çizikleri ve diğer kinematik göstergeler sağ yanal bileşene sahip oblik atımlı normal faylanmaya işaret etmektedir. Toplanan ölçümlerin paleogerilme analizlerine göre, σ_1 (091°/59°)’in düşeye daha yakın dalımlı, σ_2 (267°/31°) ve σ_3 (358°/02°)’ün ise sırasıyla yataya daha yakın dalımlı ve neredeyse yatayda olduğu hesaplanmıştır. Gerilme elipsoidi (eksenel oran; Φ) 0.397 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_1 ’in düşeye yakın ve eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması bu fayın yaklaşık K-G yönlü saf genişlemeli tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 9. Lokasyon 5’de (L5) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

Figure 9. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 5 (L5) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Batı segment üzerinde yer alan Gölcük güneyindeki derin vadi kenarında K22°D ila K60°D doğrultuya, 67° ila 85° eğim açılarına sahip ve KB’ya eğimli fay düzlemleri gözlenmiştir (L6, Şekil 10). İyi korunmuş düzlemler üzerinde ölçülen fay çizikleri rake açıları 25° ila 66° arasında değişmekte olup, fayın karakteri sağ yanal bileşene sahip oblik atımlı normal fay karakterinde olduğu gözlenmiştir. Kayma çiziklerinden elde edilen paleogerilme analiz sonuçlarına göre σ_1 (155°/76°)’in düşeye yakın dalımlı, σ_2 (247°/01°) ve σ_3 (337°/14°)’ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.655 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_1 ’in düşeyde ve eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması, bu fayın yaklaşık KB-GD yönlü saf genişlemeli tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.

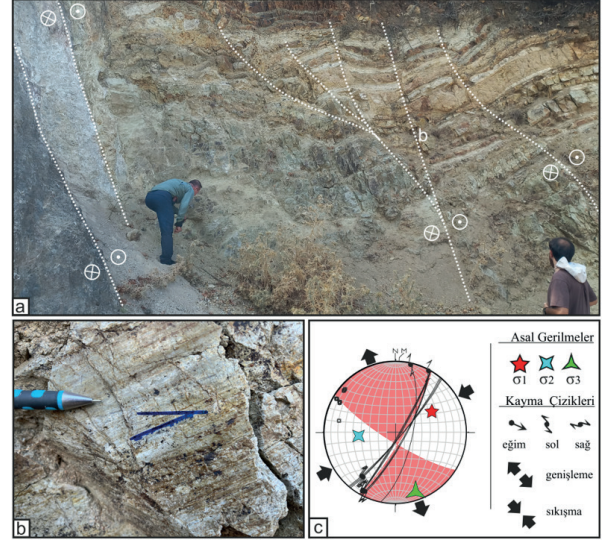


Şekil 10. Lokasyon 6'da (L6) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2'ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 10. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 6 (L6) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Batı segment üzerinde Kocaçoban kuzeyindeki Kocagedik mevkiinde yer alan 7. lokasyonda gözlemlenen sentetik ikincil fay düzlemleri ölçülmüştür (Şekil 11). Elde edilen verilere göre düzlemlerin doğrultuları K12°D ila K41°D arasında, eğim açıları ise 70° ila 85° arasında değişmektedir ve düzlemler GD'ya eğimlidir. İyi korunmuş düzlemler üzerinde 01° ila 24° arasında değişen rake açlarına sahip fay çizikleri faylanma mekanizmasının doğrultu atımlı karakterine işaret etmektedir. Kinematik göstergelere göre fayın karakteri sağ yanaldır. Bu lokasyonda ölçülen 12 kayma yüzeyi verisinin paleogerilme analiz çalışmalarından elde edilen verilere göre, σ_2 (265°/47°)'nin düşeye daha yakın dalımlı, σ_1 (060°/40°) ve σ_3 (161°/13°)'ün ise yataya daha yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.604 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 'nin düşeyde ve eksenel oranının 0,25 ile 0,75 arasında olması, bu fayın KD-GB yönlü sıkışma ve KB-GD yönlü

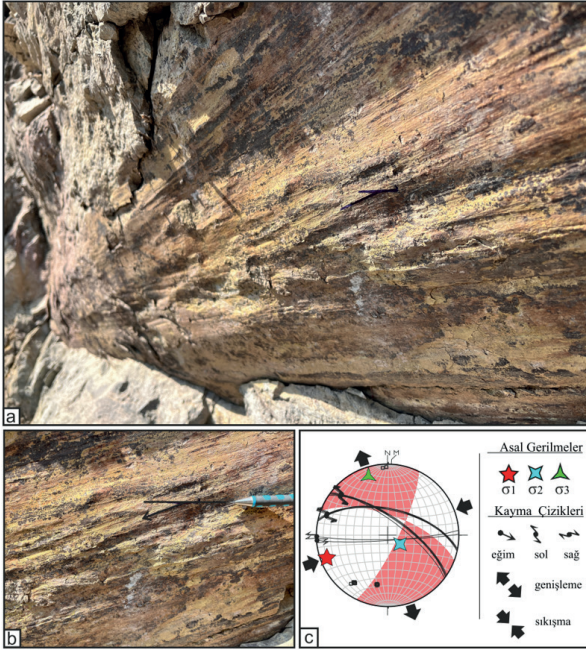
genişleme ile ilişkili saf doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 11. Lokasyon 7'de (L7) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu. A'da sunulan saha fotoğrafı güneye bakılarak çekilmiştir. (Lokasyon için Şekil 2'ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 11. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 7 (L7). Field photograph in A was taken looking south (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Karaçoban yerleşim alanının kuzeyinde yer alan L8 lokasyonunda K53°B ile yaklaşık D-B doğrultuya, 59° ila 85° arasında eğim açısına sahip antitetik ridel özellikli ikincil fay düzlemleri üzerinde 01° ila 16° rake açlarına sahip fay çiziklerinden elde edilen kinematik analizlere göre, σ_2 (126°/72°)'nin düşeye yakın dalımlı, σ_1 (249°/10°) ve σ_3 (342°/14°)'ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.447 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 'nin düşeyde ve eksenel oranının 0,25 ile 0,75 arasında olması, bu fayın KD-GB yönlü sıkışma ve KB-GD yönlü genişleme ile ilişkili saf doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir (Şekil 12).

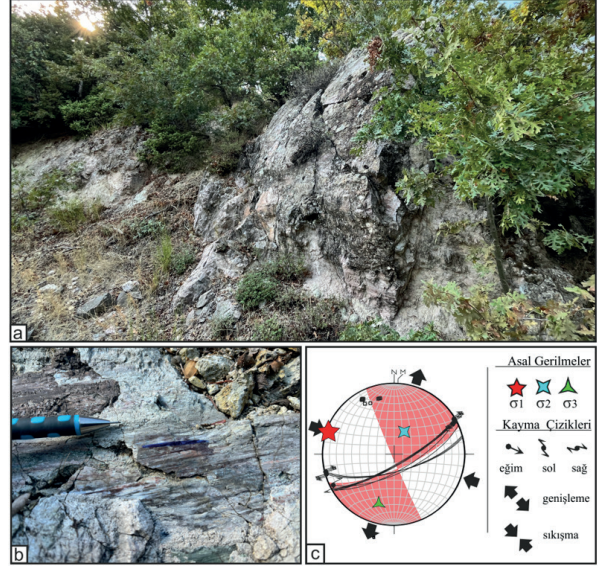


Şekil 12. Lokasyon 8’de (L8) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

Figure 12. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 8 (L8) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Batı segment üzerinde Hacet ile Karaçoban yerleşim alanları arasındaki vadi içerisinde yer alan L9 lokasyonunda yapılan arazi gözlemlerinde ise K59°D ila K75°D doğrultularına sahip sentetik ikincil fay düzlemleri gözlenmiştir (Şekil 13). GD’ya eğimli, 79° ila 68° arasında değişen eğim açılarına sahip kayma düzlemleri üzerinde düşük rake açıları (01° ila 08°) ölçülmüş, hareketin sağ yanal özellikte olduğu gözlemlenmiştir. Bu lokasyonda toplanan 10 adet ölçünün paleogerilme analiz sonuçlarına göre σ_2 (024°/62°)’nin düşeye yakın dalımlı, σ_1 (289°/03°) ve σ_3 (197°/28°)’ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.180 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 ’nin düşeyde ve eksenel oranının 0,25 ile 0 arasında olması, sağ yanal doğrultu atımlı bu fayın KB-GD yönlü

sıkışma ve KD-GB yönlü genişleme ile ilişkili transpresyonel tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.

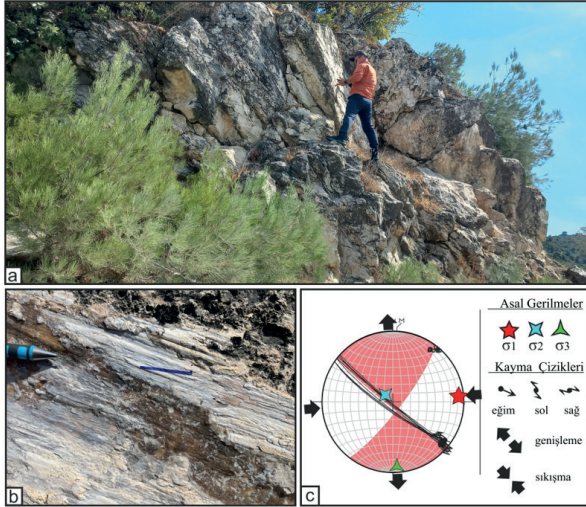


Şekil 13. Lokasyon 9’da (L9) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

Figure 13. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 9 (L9) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Batı segmentin güney bölümündeki Alifakı yerleşim alanı kuzeyinde gözlenen iyi korunmuş antitetik ikincil kırık düzlemlerinde sol yanal doğrultu atımlı faylanmaya işaret eden ölçümler yapılmıştır (Şekil 14). Yapılan ölçümlere göre, K48°B ila K55°B doğrultularına sahip GB’ya eğimli fay düzlemlerinin eğim açıları 79° ila 88° arasındadır. Kayma düzlemleri üzerinde ölçülen rake açıları 07° ila 13° arasında değişmektedir. Elde edilen verilere göre, σ_2 (313°/78°)’nin düşeye yakın dalımlı, σ_1 (085°/08°) ve σ_3 (176°/09°)’ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.378 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 ’nin düşeyde ve eksenel oranının 0,25 ile 0,75 arasında olması, bu fayın

yaklaşık K-G genişleme ve yaklaşık D-B yönlü sıkışma ile ilişkili saf doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.

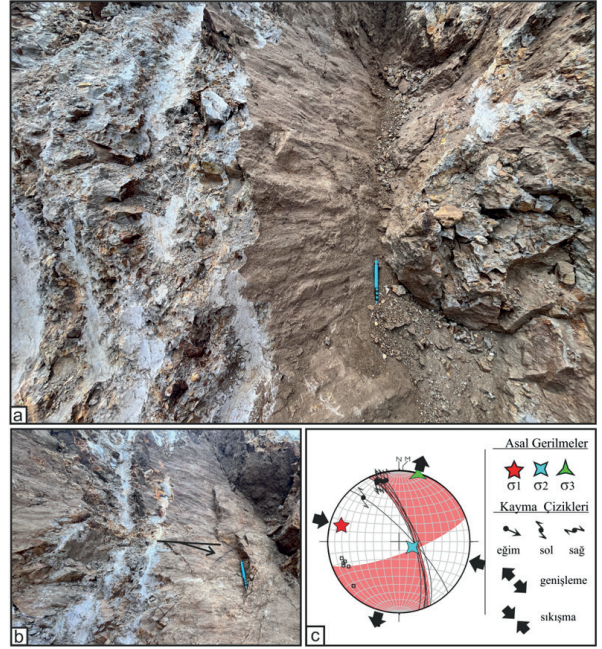


Şekil 14. Lokasyon 10'da (L10) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2'ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 14. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 10 (L10) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Doğu segmente ait 3 numaralı fay kolu üzerinde paleosismolojik amaçlı açılan bir hendek içerisinde yer alan lokasyon 11'e ait verilere göre, antitetik özellikli ikincil fay düzlemlerinin doğrultuları K21°B ila K44°B arasında ve KD'ya doğru eğimlidir. Eğim açıları 68° ila 78° arasında ölçülmüştür. Fay düzlemi üzerindeki fay çiziklerinin yatay düzlem ile arasındaki açılar ise 10° ila 22° arasında değişmektedir. Bu lokasyondan toplanan kinematik verilerin paleogerilme analiz sonuçlarına göre σ_2 (112°/73°)'nin düşeye yakın dalımlı, σ_1 (285°/17°) ve σ_3 (016°/02°)'ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.592 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 'nin düşeyde ve

eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması, sol yanal doğrultu atımlı bu fayın BKB-DGD yönlü sıkışma ve KKD-GGB yönlü genişleme ile ilişkili saf doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir (Şekil 15).

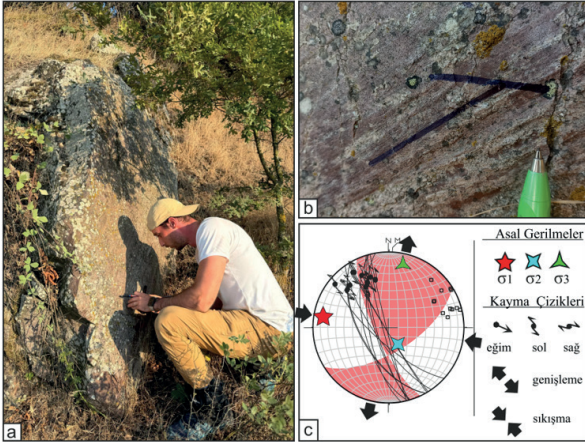


Şekil 15. Lokasyon 11'de (L11) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2'ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1'e bakınız).

Figure 15. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 11 (L11) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

Batı segment üzerinde yer alan fay düzleminde, K10°B ila K48°B doğrultu, 59° ila 88° arasında eğim ve 10° ila 40° arasında kayma çizikleri ölçülmüştür (Lokasyon 12, Şekil 16). Bu gözlemler makaslama zonu içerisindeki antitetik özellikteki ikincil kırıkların sol yanal baskın hareketini işaret etmektedir. Bu lokasyonda yapılan kinematik analiz ölçümlerinden elde edilen verilere göre, σ_2 (150°/70°)'nin düşeye

yakın dalımlı, σ_3 ($013^\circ/15^\circ$) ve σ_1 ($279^\circ/13^\circ$)'ün ise yataya yakın dalımlı ve gerilme elipsoidinin (eksenel oran; Φ) 0.389 olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan verilere göre σ_2 'nin düşeyde ve eksenel oranın 0,25 ile 0,75 arasında olması, bu fayın yaklaşık D-B yönlü sıkışma ve yaklaşık K-G yönlü genişleme ile ilişkili saf doğrultu atımlı tektonik rejim etkisinde geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 16. Lokasyon 12’de (L12) gözlenen fay düzlemleri, fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analizi sonucu (Lokasyon için Şekil 2’ye, ölçüm ve analiz parametreleri için Çizelge 1’e bakınız).

Figure 16. Observed fault planes, fault-plane solutions, and paleostress analysis results at Location 12 (L12) (see Figure 2 for the location; see Table 1 for measurement and analysis parameters).

TARTIŞMA ve SONUÇLAR

GFZ, Batı Anadolu’da, Balıkesir iline bağlı Bigadiç ile Manisa İline bağlı Akhisar arasında yer alan ve morfolojik olarak KKD-GGB uzanımlı derin vadileri belirgin şekilde denetleyen diri bir yapıdır. Genel uzanımı KKD-GGB gidişli birbirine yaklaşık paralel/yarı paralel Doğu ve Batı olmak üzere iki ana segmentten meydana gelmektedir. Bu çalışmada ise 2011 yılında güncellenen ve 1/250.000 ölçeğinde sunulan TDFH’de (Emre vd., 2011; 2018; Duman vd., 2018) tanımlanan

faylar arazide gözlenmiş ve ilk defa 1/25.000 ölçeğinde haritalanmıştır. Doğu segment yaklaşık 35 km uzunluğunda olup, genel uzanımı K-G ile K10-20°D arasında değişen dört ana fay kolundan meydana gelmektedir. Batı segment ise, uzanımı K-G ile K35°D arasında değişen 5 fay kolundan oluşmakta olup morfolojik olarak belirgin çizgisel gidişli derin vadilerle temsil edilmektedir. Bu çalışmada doğu ve batı segment içerisinde tanımlanan tüm fay kolları, Emre vd. (2011) tarafından tanımlanan TDFH ile birebir uyumludur, BK5, BK4, DK4 ve DK3 numaralı fay kolları ise Seyitoğlu vd. (2022) tarafından haritalanan faylar ile genel olarak örtüşmektedir. Bu çalışmada elde edilen saha gözlemleri, zonun çok kollu bir mimariye sahip olduğunu ve segmentler arasında basamaklı sıçramalar (step-over), çatallanmalar ve bükülmenmeler gibi yüzey geometrisinde süreksizlikler ve değişimler barındırdığını göstermektedir. GFZ’nin genel geometrisi incelendiğinde, segmentlerin sıçrama ve kavis yaptığı alanlarda gelişen mikro-topografik yapılar, zonun sağ yönlü doğrultu atımlı karakterini yansıtan önemli morfolojik veriler sunmaktadır. Sağ yönlü makaslama zonu içerisinde çok sayıda sentetik ve antitetik özellikli KB-GD ve KD-GB uzanımlı ikincil kırıklar gözlenmiştir. Fayın geometrik süreksizlikleri ve çok kollu yapısı, olası kırılma senaryoları ve maksimum deprem büyüklüğü değerlendirmeleri için kritik kısıtlar sunmaktadır. Emre vd. (2018) ve Duman vd. (2018) tarafından sunulan segment uzunluklarına dayalı ampirik hesaplamalar, her iki segmentin de Mw 6,9 büyüklüğüne kadar deprem üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

12 lokasyondan alınan 132 adet kinematik ölçüm, fay kollarının kıvrımlı yüzey geometrisinin sebep olduğu fay bükümleri ile oluşan yerel gerilme değişimleri ve geniş makaslama zonu içerisinde gelişen antitetik ve sentetik ikincil kırıkların varlığına işaret etmektedir. 1, 5, 9, 10, 11, 12 numaralı lokasyonların paleogerilme analiz sonuçları, bu fayların yaklaşık D-B ile

BKB-DGD yönlü sıkışma ve K-G ile KKD-GGB yönlü genişleme etkisi altında şekillendiğine işaret etmektedir. Bu lokasyonlarda hesaplanan paleogerilme analizleri İBTZ boyunca saha çalışmalarından elde edilen ve Pliyosen sonrası döneme (faz 2) atfedilen önceki çalışmalar ile uyum göstermektedir (örn. Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Uzel ve Sözbilir, 2008; Sözbilir vd., 2011; Uzel vd., 2013; 2015; Özkaymak vd., 2013). Lokasyon 3, 4, 7 ve 8'de ölçülen değerlerin paleogerilme analizleri ise yaklaşık KD-GB yönlü sıkışma ilişkili KB-GD yönlü genişlemeli bir tektonik rejime işaret etmektedir. Benzer hesaplamalar İBTZ boyunca Manisa bölgesinde de gözlenmiş olup (Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Sözbilir vd., 2011), ilgili çalışmalarda batı Anadolu'da tanımlanan (Dumont vd., 1979; Angelier vd., 1981; Koçyiğit vd. 1999, Kaya vd., 2004; 2007; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Uzel ve Sözbilir, 2008) Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı sıkışmalı evre (faz 1) ile ilişkilendirilmiştir. Bununla beraber, Lokasyon 2 ve 6'daki KD-GB uzanımlı fay düzlemleri üzerindeki analizler GFZ'nin kuzey kolları üzerinde KB-GD yönlü genişlemeye işaret etmektedir. Bu genişleme olasılıkla, Batı Anadolu'daki Miyosen-Erken Pliyosen yaşlı sıkışmalı evrenin günümüzde etkili olan yaklaşık K-G yönlü genişleme ilişkili evreye geçişi ile ilişkili olabilir. İBTZ içerisinde Soma bölgesi ve çevresinde gerçekleştirilen Paleomanyetizma çalışmaları (Westerweel vd., 2020), Çandarlı Körfezi ile Sındırgı arasında kalan bölgenin Geç Miyosen'den günümüze kadar olan zamanda, yaklaşık -21° saat yönünün tersine bir rotasyona uğradığından bahsedilmektedir. Araştırmaya göre, bu dönemde KD-GB gidişli sağ yönlü doğrultu atımlı faylanmanın dağılımı daralmış ve D-B gidişli normal fayların oluşumundan ayrılmıştır. Pliyosen'den günümüze değin İBTZ içerisinde etkili olan saat yönünün tersine -23° rotasyon Uzel vd. (2015) tarafından Kuşadası Körfezi ile Soma arasında kalan alanda yapılan paleomanyetizma çalışmasında da belgelenmiştir. Bu durum, bu

çalışmada ölçülen düzlemlerin, özellikle faz 1'e ait olanların yaklaşık 21 ila 23° değerlere kadar saatin tersi yönünde rotasyona uğramış olabileceğine işaret etmektedir.

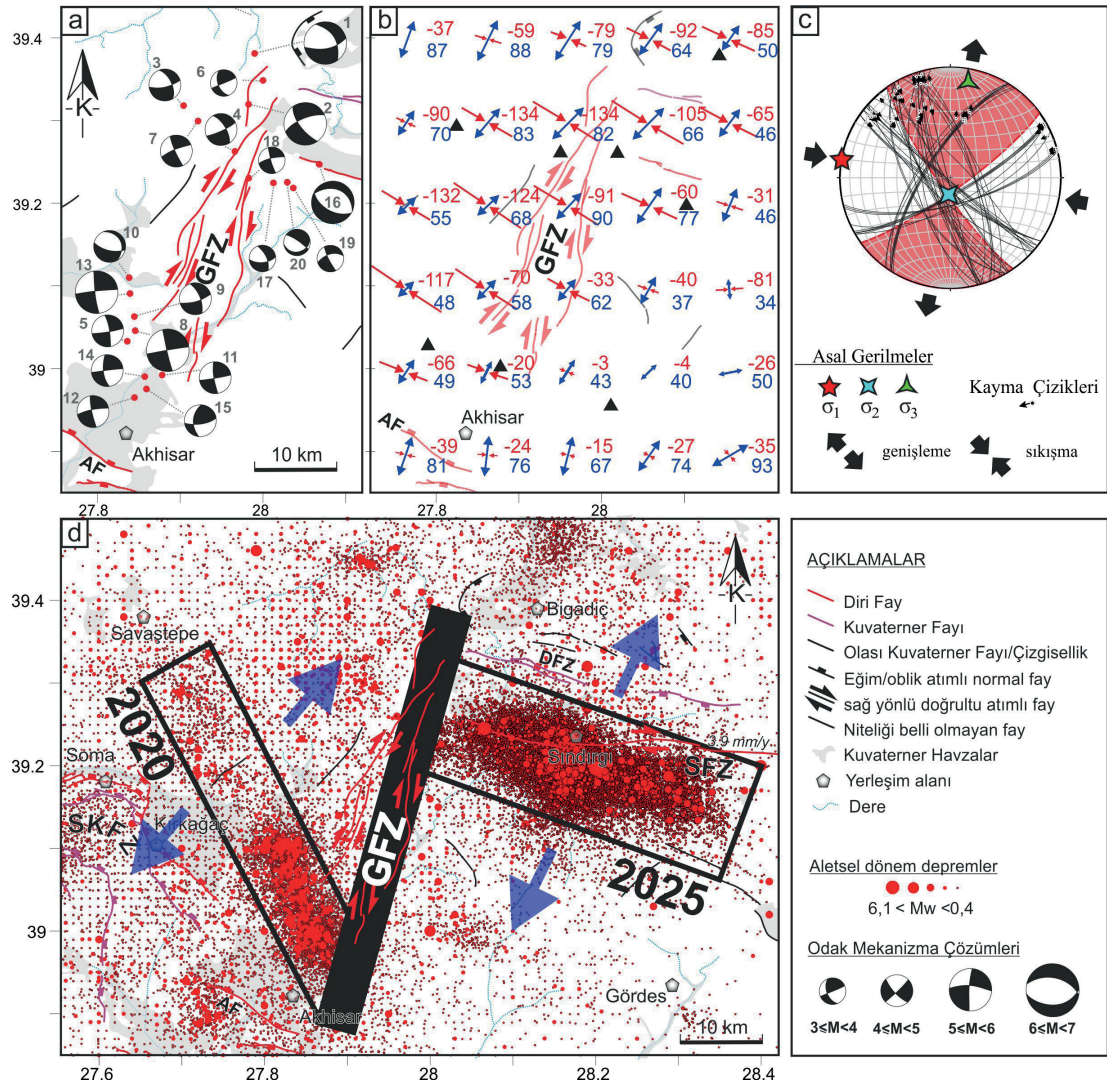
Çalışılan alan içerisinde, moment büyüklükleri (M_w) 3,8 ila 6,1; derinlikleri ise 4 ila 21,2 km arasında değişen (en sık tekrar eden ortalama derinlik, mod, 10-13 km) 20 adet depreme ait odak mekanizma çözümü yapılmıştır (Şekil 17a ve Çizelge 2). Bu depremlerden 5 adedi (16 ila 20 numaralı depremler arası) 10.08.2025 tarihinde GFZ'nin doğusunda meydana gelen Sındırgı ($M_w:6,1$) ana şok ve daha sonra bu zon ve yakın çevresinde meydana gelen depremlere aittir. 10.08.2025 yılına ait ana şokun odak mekanizması çözümü (16, Şekil 17a), depremi üreten kaynak fayın BKB-DKD uzanımlı olduğuna ve bölgedeki KKD-GGB yönlü genişlemeye işaret etmektedir. 18 numaralı odak mekanizma çözümüne ait depremin dışmerkezi, GFZ'nin Hacet Köyü yakınlarında haritalanan DK4 kolu üzerindedir. Bu durum, 10.08.2025 Sındırgı Depremi ($M_w:6,1$) sonrasında, GFZ üzerinde etkili olan gerilimin, zonun doğu segmenti (DK4) üzerinde $M_w:4,0$ büyüklüğündeki bir depreme neden olduğuna işaret etmektedir. Bununla beraber aletsel dönem boyunca GFZ ve yakın civarında meydana gelen depremler baskın olarak doğrultu atımlı mekanizma sunmaktadır. Bu odak mekanizmaları ve mikrosismik aktivite kümelenmelerinin analizleri, zon içerisindeki bazı depremlerin KD-GB uzanımlı ana kırık üzerinde, bazılarının ise KB-GD uzanımlı sol yönlü doğrultu atımlı antitetik ikincil kırıklar üzerinde meydana geldiğine işaret etmektedir. Bazı araştırmacılar, 22 Ocak 2020 ($M_w 5,5$) sonrası sismik etkinliklerin GFZ ile ilişkilendirirken Seyitoğlu vd. (2022) bu depremleri makaslama zonu içerisinde KB-GD uzanımlı kırıkların aktivitesi olarak yorumlamışlardır. Solak (2020) tarafından, İBTZ ve çevresindeki güncel deformasyonların GNSS yöntemi ile incelenmesi sonucu elde edilen yıllık güncel gerinimler, GFZ boyunca KB-GD yönlü sıkışma

ilişkili KD-GB yönlü genişlemeli bir ortamın zon boyunca etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle zonun kuzey bölümüne doğru artan sıkışma değerleri (-91 ila -134 nanostrain/yıl) dikkat çekmektedir (Şekil 17b). Bu çalışmada, faz 2 olarak tanımlanan lokasyonlarda (1, 5, 9, 10, 11, 12 numaralı lokasyonlar) toplanan tüm verilerin bir arada yorumlanması ile elde edilen stereografik izdüşüm diyagramı, Pliyosen sonrası dönem ile ilişkilendirilen BKB-DGD yönlü sıkışma ilişkili KKD-GGB yönlü genişlemeli paleogerilme analizi sunmaktadır. Elde edilen veriler, İBTZ içerisinde daha önce tespit edilen paleogerilme analizleri (örn. Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Uzel ve Sözbilir, 2008; Sözbilir vd., 2011; Özkaymak vd., 2013; Uzel vd., 2013; 2015) ile birebir uyumlu iken güncel gerinim analizleri (Solak, 2020; Solak vd., 2024) ile benzerlik sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen faz 2'ye ait tüm ölçümlerin fay düzlemi çözümü, doğrultu atımlı bir mekanizmaya işaret etmektedir (Şekil 17c). Fay yüzeyi ölçümlerinden hesaplanan çözüm, KB-GD uzanımlı sol yönlü ve KD-GB uzanımlı sağ yönlü doğrultu atımlı iki düzlemi hesaplamıştır ve bölgede meydana gelen depremlerin büyük bir kısmının odak mekanizma çözümleri ile benzerlik göstermektedir (Şekil 17c).

Bununla beraber, GFZ boyunca hesaplanan ortalama güncel gerinimler (jeodezik ölçümler) ile paleogerilme (jeolojik ölçümler) analizlerinin sıkışma yönleri arasında 10 ila 20° arasında değişen açı farkları gözlenmektedir. Bu fark iki şekilde açıklanabilir, 1) Pliyosen'den günümüze değin İBTZ içerisinde etkili olan -21° ila -23° arası saat yönünün tersine rotasyon (Uzel vd., 2015; Westerweel vd., 2020) GFZ üzerinde de etkili olmuştur/olmaya devam etmektedir; 2) İBTZ boyunca etkili olan σ_3 Holosen içerisinde saat yönünde rotasyona uğramıştır/uğramaktadır. Paleomanyetik analizler ile elde edilen rotasyon miktarları ile paleogerilme analizlerinin güncel gerilmeler ile korelasyonundan hesaplanan

yaklaşık farklar, ilk seçeneğin etkisine işaret etmektedir. Ancak, GFZ üzerinde paleosismolojik amaçlı açılan hendek içerisinde ölçülen bazı düzlemlerin (L11), denetlemiş olduğu kolüvyal çökellerden toplanan radyokarbon tarihlendirme örneklerinin analizi ile, Holosen aktivitesinin kanıtlanmış olması (Özcan vd., 2025 ve 2026) ikinci seçeneğin de dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, GFZ'nin yaklaşık 35 km uzunluklarda iki ana segmentten oluşan ve 8 km'ye varan genişliğe uzanan sağ yönlü doğrultu atımlı bir makaslama zonu olduğuna dair fay geometrisi ve kinematikğine yönelik saha kanıtları sunmaktadır. Bu makaslama zonu içerisinde 5'i batı segmentte 4'ü doğu segmentte ait toplamda 9 fay kolu haritalanmıştır. Elde edilen paleogerilme analizleri GFZ'nin Pliyosen sonrası dönemde BKB-DGD yönlü sıkışma ilişkili KKD-GGB yönlü genişlemeli bir tektonik ortamda şekillendiğini göstermektedir. GFZ ve yakın çevresinde son yıllarda meydana gelen mikrosismik aktivitelerin dışmerkez dağılımları ve deprem kümelenmeleri, yaklaşık KKD-GGB uzanımlı GFZ'nin bu depremler için bir bariyer oluşturduğuna işaret etmektedir. Zonun batısındaki 2016 yılında başlayarak 22 Ocak 2020 (Mw 5,5) depremi ile yoğunlaşan sismik aktivitelerin doğudan; zonun batısındaki 10 Ağustos 2025 Sındırgı depremi (Mw:6,1) ve sonrasındaki sismik aktivitelerin ise batıdan GFZ tarafından sınırlandığı görülmekte ve zonun doğu ve batısındaki σ_3 'ün etkin olduğu açılma alanlarındaki genişleme rejiminin transferinden sorumlu olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışmada elde edilen tüm veriler, GFZ'nin Batı Anadolu'nun en önemli sismik kaynaklarından birisi olan İBTZ içerisinde sağ yönlü doğrultu atımlı bir transfer yapısı olarak bölgedeki genişleme rejiminin transferinden sorumlu stratejik bir bariyer görevi gördüğüne işaret etmektedir.



Şekil 17. a) GFZ ve yakın civarında meydana gelen bazı depremlerin dışmerkezlerini ve odak mekanizma çözümlerini gösteren diri fay haritası (Diri faylar Emre vd., 2011'den alınmıştır. Çözümlerin açıklamaları ve referanslar için Çizelge 2'ye bakınız), **b)** Bölgede Jeodezik çalışmalarda elde edilen güncel gerinimler (kırmızı oklar: sıkışma, mavi oklar: açılma, siyah üçgenler: GNSS noktaları, değerlerin birimi nanostrain/yıl, Solak, 2020), **c)** 1, 5, 9, 10, 11, 12 numaralı lokasyonların bütüncül fay düzlemi çözümleri ve paleogerilme analiz sonuçları, **d)** GFZ ve yakın civarında meydana gelen aletsel dönem depremler (01.01.1900-31.03.2026 tarihleri arasında, KRDAE, 2026) Faylar ve Kuvaterner Havzalar Duman vd. (2018) ve Emre vd. (2018)'den alınmıştır. Kısaltmalar: AF: Akhisar Fayı, DFZ: Düvertepe Fay Zonu, GFZ: Gelenbe Fay Zonu, SFZ: Simav Fay Zonu, SKFZ: Soma-Kırkağaç Fay Zonu.

Figure 17. a) Active fault map showing the epicenters and focal mechanism solutions of some earthquakes occurring in and around the GFZ (faults are taken from Emre et al., 2011. Refer to Table 2 for solution descriptions and references), **b)** Current strain rates obtained from geodetic studies in the region (red arrows: compression, blue arrows: extension, black triangles: GNSS points, Units: nanostrain/yr; Solak, 2020), **c)** Fault-plane solutions and paleostress analysis results for locations 1, 5, 9, 10, 11, and 12, **d)** Instrumental earthquakes in and around the GFZ (between 01.01.1900 and 31.03.2026, KRDAE, 2026). Faults and Quaternary basins are adopted from Duman et al. (2018) and Emre et al. (2018). Abbreviations: AF: Akhisar Fault, DFZ: Düvertepe Fault Zone, GFZ: Gelenbe Fault Zone, SFZ: Simav Fault Zone, SKFZ: Soma-Kırkağaç Fault Zone.

Çizelge 2. GFZ ve yakın civarında meydana gelen bazı depremlerin parametreleri. Kaynak: 1. ISC, 2026; 2. Duman vd., 2018; 3. KRDAE, 2026; 4. AFAD, 2026; 5. EMSC, 2026; 6. OCA/Geoazur, 2026. Kısaltmalar, D: Derinlik, M_w : Büyüklük, K: Kaynak.

Table 2. Seismological parameters of earthquakes recorded along the GFZ and in its immediate vicinity. Sources: 1. ISC, 2026; 2. Duman et al., 2018; 3. KRDAE, 2026; 4. AFAD, 2026; 5. EMSC, 2026; 6. OCA/Geoazur, 2026. Abbreviations: D: Depth, M_w : Moment magnitude, K: Reference.

No	Tarih	Saat (UTC)	Boylam	Enlem	D (km)	M_w	Doğrultu		Eğim		Rake		K
							1	2	1	2	1	2	
1	24.07.1999	16:05:51	39,38	27,99	10	5,0	334	082	50	70	-027	-136	1,2
2	25.07.1999	06:56:56	39,32	27,9	21,2	5,2	250	151	67	70	-158	-024	1,2
3	24.05.2001	03:18:09	39,32	27,90	7,0	4,4	078	338	76	54	-143	-017	1,2
4	02.12.2004	15:51:48	39,26	27,96	11	4,5	069	334	80	67	-156	-011	1,2
5	15.03.2008	11:52:14	39,04	27,83	14	4,0	174	274	88	84	-002	-156	1,4
6	04.01.2018	04:53:55	39,35	27,99	7	3,8	158	067	53	88	002	143	4,5
7	12.05.2019	22:24:09	39,31	27,93	6	4,4	248	158	80	85	-175	-010	3,5
8	22.01.2020	19:22:16	39,06	27,84	8	5,5	081	350	84	82	-171	-006	3,5
9	22.01.2020	20:17:38	39,07	27,84	9	4,2	074	338	75	67	-156	-016	3,5
10	28.01.2020	11:26:13	39,10	27,84	10	4,9	334	103	29	71	-43	-112	3,5
11	02.02.2020	00:23:47	39,00	27,85	13	4,5	354	263	75	85	005	165	3,5
12	04.02.2020	17:55:23	38,97	27,84	12	4,9	259	168	81	84	-174	-009	3,5
13	18.02.2020	16:09:23	39,09	27,84	13	5,1	264	174	86	83	-173	-004	3,5
14	23.02.2020	12:40:18	39,00	27,87	10	4,5	174	084	70	90	001	160	3,5
15	24.02.2020	02:43:33	38,98	27,86	11	4,9	182	081	56	75	018	145	3,5
16	10.08.2025	16:53:47	39,24	28,07	11	6,1	120	290	57	34	-085	-098	4,5
17	11.08.2025	16:37:01	39,23	27,98	12	4,1	082	338	63	65	-151	-030	4,5
18	11.08.2025	18:32:37	39,24	27,95	13	4,0	256	166	80	85	-175	-010	4,5
19	06.09.2025	18:14:46	39,21	28,03	4	3,9	155	250	80	64	-027	-169	6,5
20	09.11.2025	08:58:51	39,22	28,01	7	4,5	304	072	76	22	-073	-139	4,5

Elde edilen bulgular, bölgedeki yerleşim alanları için sismik tehlike analizlerinde GFZ'nin dikkate alınması gereken önemli bir sismik kaynak olduğuna, fayın deprem tehlike hesaplamalarına yönelik paleosismolojik parametrelerinin (kayma hızı, tekrarlanma periyodu, son yıkıcı depremden sonra geçen zaman gibi) mutlaka hesaplanması ve dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

EXTENDED ABSTRACT

Western Anatolia is one of the most actively deforming regions in the eastern Mediterranean, where the present-day tectonic framework is mainly controlled by the Aegean extensional system, the

westward escape of Anatolia, and the interaction between normal and strike-slip fault systems. Within this complex geodynamic setting, the İzmir-Balıkesir Transfer Zone (IBTZ) represents a crustal-scale structural zone that accommodates differential deformation between the major E-W-trending graben systems of Western Anatolia and the strike-slip to oblique-slip fault systems of the northern Aegean region. The NNE-SSW-trending Gelenbe Fault Zone (GFZ), located between Bigadiç (Balıkesir) and Akhisar (Manisa), forms one of the important active fault systems within the IBTZ. Although the GFZ is shown on active fault maps and its regional seismotectonic importance was emphasized in previous studies, direct field-

based data about detailed surface geometry, internal segmentation, kinematic character, and paleostress evolution remain limited. Therefore, this study aims to define the geometric and kinematic characteristics of the GFZ based on geological mapping, fault-slip measurements, paleostress analysis, and the evaluation of recent seismological and geodetic data.

The study is based on an integrated methodology combining field observations, 1/25,000-scale geological mapping, morphotectonic interpretation, remote sensing data, and structural measurements collected from fault planes. The surface traces of the fault zone were mapped by comparing field observations with satellite images, digital elevation models, and previously published geological and active fault maps. Morphological indicators such as linear valleys, fault scarps, mountain-front lineaments, displaced or structurally controlled drainage systems, alluvial fan boundaries, and fault-controlled lithological contacts were used to constrain the fault geometry and segment boundaries. In addition, the regional seismotectonic framework was evaluated using earthquake catalogues and focal mechanism solutions compiled from national and international seismological data sources. In order to determine the kinematic character of the GFZ, 132 fault-slip data were collected from 12 different locations along the eastern and western segments of the fault zone. These data include fault-plane orientations, slip-lineation orientations, rake values, and field-based kinematic indicators. Paleostress analyses were carried out using fault-slip inversion methods, and the calculated principal stress axes were assessed together with field relationships, fault geometry, and focal mechanism solutions (Figure 2; Table 1).

Field mapping shows that the GFZ forms an approximately 8-km-wide, multi-stranded right-lateral strike-slip shear zone composed of two nearly parallel main segments. The eastern

segment is approximately 35 km long and consists of four fault strands (DK1-DK4) trending mainly N-S to N10-20°E. The western segment is approximately 36 km long and consists of five fault strands (BK1-BK5) trending mainly N-S to N35°E. These strands are visible as linear valleys, fault-controlled contacts, sharp geomorphic lineaments, and local pull-apart or transtensional depressions developed along bends and step-over zones. The mapped fault strands are generally compatible with the active fault traces previously presented by Emre et al. (2011, 2018) and Duman et al. (2018), while several strands, especially BK5, BK4, DK4, and DK3, also overlap with structures mapped by Seyitoğlu et al. (2022). However, the present study provides a more detailed field-based segmentation of the GFZ at 1/25,000 scale. The surface geometry of the fault zone reveals a complex internal architecture characterized by fault bends, step-overs, splays, and secondary fractures. This geometry is important because it controls local stress variations, the distribution of deformation within the shear zone, and possible rupture propagation scenarios.

The kinematic data obtained from the fault planes indicate that the GFZ is dominated by right-lateral strike-slip deformation, accompanied locally by normal and oblique-normal components. Within the main right-lateral shear zone, both synthetic and antithetic secondary fractures are widely developed. The antithetic structures are generally represented by NW-SE-trending left-lateral faults, whereas the synthetic structures are mostly expressed by NE-SW- to NNE-SSW-trending right-lateral or oblique-slip faults. The presence of these secondary fractures, together with the sinuous surface geometry of the main fault strands, indicates that deformation is not restricted to a single fault trace but is distributed across a broad shear zone. This distributed deformation pattern should be considered when evaluating the seismic source characteristics and earthquake hazard potential of the GFZ.

The paleostress results indicate that two main tectonic phases affected the evolution of the GFZ. The first phase is represented by NE-SW compression-related NW-SE extension and is interpreted as corresponding to the Miocene-Early Pliocene compressional to transpressional regime previously documented in Western Anatolia and along the IBTZ. This phase is mainly recorded in paleostress solutions from locations 3, 4, 7, and 8. The second phase is characterized by approximately E-W to WNW-ESE compression and N-S to NNE-SSW extension, and is interpreted as the post-Pliocene to present-day tectonic regime. This younger phase is recorded particularly in the results from locations 1, 5, 9, 10, 11, and 12, and is consistent with previous field-based studies on the IBTZ. The analyses from locations 2 and 6 also indicate local NW-SE extension on NE-SW-trending fault planes, which may reflect the transitional relationship between the older compressional phase and the present extensional regime. The comparison between geological paleostress indicators and modern geodetic strain data suggests a small angular difference, approximately 10-20°, between the calculated stress orientations and present-day strain axes. This difference may be related to counterclockwise rotations documented by paleomagnetic studies in the region, or to local stress-axis rotations during the Holocene.

The seismological data support the field-based kinematic interpretation of the GFZ. Historical earthquake records, instrumental seismicity, and focal mechanism solutions indicate that the region is tectonically active and characterized by a transtensional deformation regime involving both strike-slip and normal faulting components (Figure 1). In this study, focal mechanism solutions of 20 earthquakes with moment magnitudes ranging from Mw 3.8 to 6.1 and focal depths between 4 and 21.2 km were evaluated from around the GFZ (Figure 17; Table 2). These solutions are dominated by strike-slip mechanisms

and indicate that seismicity is concentrated both on the main right-lateral fault strands and on NW-SE-trending left-lateral antithetic secondary fractures. Five of these events are related to the August 10, 2025 Sındırgı earthquake sequence. The focal mechanism of the August 10, 2025 Mw 6.1 mainshock indicates a WNW-ESE-trending source fault and NNE-SSW extension in the region. In addition, the epicenter of the Mw 4.0 event that occurred after the mainshock is located on or near the DK4 strand of the eastern segment of the GFZ. This observation suggests that stress transferred after the Sındırgı earthquake reactivated part of the eastern segment of the GFZ.

The spatial distribution of microseismic activity also suggests that the GFZ behaves as a structural barrier and transfer structure within the active deformation network of Western Anatolia. The seismic activity that intensified around the Soma-Kırkağaç-Akhisar region after 2016 and especially after the January 22, 2020 Mw 5.5 earthquake appears to be bounded from the east by the GFZ. Similarly, the August 10, 2025 Sındırgı earthquake sequence and subsequent activity appear to be bounded from the west by the GFZ. This pattern indicates that the GFZ may limit rupture propagation and transfer deformation between adjacent extensional domains. Therefore, the GFZ should not be evaluated as a single linear fault but as a broad, segmented, and internally complex right-lateral shear zone that plays an active role in the transfer of the regional extensional regime.

In conclusion, the GFZ is a multi-stranded, approximately 8-km-wide, right-lateral strike-slip transfer structure composed of two main segments and nine mapped fault strands. The eastern and western segments, with lengths of approximately 35 km and 36 km, respectively, have the potential to produce large earthquakes according to segment-length-based empirical assessments. The field-based kinematic data, paleostress results, focal mechanism solutions, and geodetic strain patterns

collectively show that the GFZ was shaped by long-duration tectonic evolution involving an older Miocene-Early Pliocene compressional phase and a younger post-Pliocene to present transtensional regime. The available data also show that the GFZ was active in the Holocene and constitutes an important seismic source within the IBTZ. Consequently, the GFZ should be considered a key structural element in regional seismic hazard assessments, and future studies should focus on determining its paleoseismological parameters, including slip rate, recurrence interval, elapsed time since the last surface-rupturing earthquake, and segment-based rupture potential.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yürüttüğü Doktora tezi kapsamında oluşturulmuştur. Yapılan bu proje aynı zamanda “Türkiye Diri Faylarının Paleosismolojik Özelliklerinin Belirlenmesi Projesi (P/SİSMO-TÜRK)” kapsamında, 123G020 numaralı TÜBİTAK-KAMAG projesi tarafından desteklenmiştir.

ORCID

Doğukan Mert Özcan  <https://orcid.org/0000-0002-2693-0789>
Çağlar Özkaymak  <https://orcid.org/0000-0002-0377-1324>
Volkan Karabacak  <https://orcid.org/0000-0003-2581-7984>
Ökmen Sümer  <https://orcid.org/0000-0003-3168-8728>
Furkan Şahiner  <https://orcid.org/0000-0002-1679-2204>
Seray Çınar Yıldız  <https://orcid.org/0009-0005-7048-8456>

KAYNAKLAR / REFERENCES

AFAD, (2026, 10 Mayıs). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı. *Deprem Kataloğu*.
<https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>

Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ. E., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T.,

Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ. H., Hakyemez, H. Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N., Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M. F., Yurtsever, A. vd. (2011). *1:1.250.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

Akyürek, B. ve Soysal, Y. (1978). *Kırkağaç-Soma (Manisa), Savaştepe-Korucu-Ayvalık (Balıkesir)-Bergama (İzmir) civarının jeolojisi* (Rapor no: 6432). Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış).

Akyürek, B. ve Soysal, Y. (1983). Biga yarımadası güneyinin (Savaştepe-Kırkağaç-Bergama-Ayvalık) temel jeoloji özellikleri. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 95/96, 1–12.

Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C. & Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*. Cambridge University Press.

Ambraseys, N. N. (1988). Engineering seismology. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 17(1), 1–105.

Ambraseys, N. N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900*. Cambridge University Press.

Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133, 390–406.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00508.x>

Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7), 5835–5848.
<https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835>

Angelier, J. (1991). Inversion of field data in fault tectonics to obtain regional stress III: A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, 103(2), 363–376.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb01777.x>

Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In P. L. Hancock (Ed.), *Continental Deformation*, (pp. 53–100). Pergamon Press.

Angelier, J., Dumont, J. F., Karamandereci, H., Poisson, A., Şimşek, Ş. & Uysal, Ş. (1981). Analyses of

- fault mechanisms and expansion of southwestern Anatolia since the late Miocene. *Tectonophysics*, 75(3–4), T1–T9.
https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90271-7
- Brun, J. P., Faccenna, C., Gueydan, F., Sokoutis, D., Philippon, M., Kydonakis, K. & Gorini, C. (2016). The two-stage Aegean extension, from localized to distributed, a result of slab rollback acceleration. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11), 1142–1157.
https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0203
- Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadırioğlu, F. T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., Arslan, S., Özalp, S., Kartal, R. F., Kalafat, D., Karakaya, F., Eroğlu Azak, T., Özel, N. M., Ergintav, S. A., Akkar, S., Altınok, Y., Tekin, S., Cingöz, A. & Kurt, A. İ. (2018). Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3277–3316. https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9
- Dumont, J. F., Uysal, Ş., Şimşek, Ş., Karamandersi, İ. H. ve Letouzey, J. (1979). Güneybatı Anadolu'daki grabenlerin oluşumu. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 92, 7–18.
- Emre, Ö., Doğan, A. ve Özalp, S. (2011). *1:250.000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Balıkesir (NJ 35-3) Paftası, Seri No: 4*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. & Şaroğlu, F. (2013). *Active Fault Map of Turkey with an Explanatory Text, 1:1,250,000 Scale*. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Special Publication Series-30, Ankara, Turkey.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F. & Olgun, Ş. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229–3275. https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2
- EMSC, (2026, 10 Mayıs). *European-Mediterranean Seismological Centre. Earthquake Data / Latest Earthquakes*. https://www.emsc-csem.org/
- Erdoğan, B. (1990). İzmir-Ankara zonunun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 2, 1–20.
- Ergin, K., Güçlü, U. & Uz, Z. (1967). *A Catalog of Earthquakes for Turkey and Surrounding Area (11 A.D. to 1964 A.D.)* (Teknik Rapor no: 24). İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Fizik Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erkül, F., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2005a). Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadiç borate basin and tectonic implications for western Turkey. *Geological Journal*, 40(5), 545–570. https://doi.org/10.1002/gj.1026
- Erkül, F., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2005b). Stratigraphy and geochronology of the Early Miocene volcanics in the Bigadiç borate basin, western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 14(3), 227–253.
- Erkül, F. (2010). Tectonic significance of synextensional ductile shear zones within the Early Miocene Alaçamdağ granites, northwestern Turkey. *Geological Magazine*, 147(4), 611–637. https://doi.org/10.1017/S0016756809990719
- Eyidoğan, H. (2020). Investigation of the temporal and spatial properties of earthquake activity and Gutenberg-Richter parameters in the vicinity of Manisa Akhisar. *Turkish Journal of Earthquake Research*, 2(2), 138–159. https://doi.org/10.46464/tdad.776186
- Gessner, K., Gallardo, L. A., Markwitz, V., Ring, U. & Thomson, S. N. (2013). What caused the denudation of the Menderes Massif: Review of crustal evolution, lithosphere structure, and dynamic topography in southwest Turkey. *Gondwana Research*, 24(1), 243–274. https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.01.005
- Hardcastle, K. C. & Hills, L. S. (1991). BRUTE3 and SELECT: Quick Basic 4 programmes for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous populations of fault slip data. *Computers & Geosciences*, 17(1), 23–43. https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90078-R
- Irmak, T. S., Doğan, B., Yavuz, E., Livaoğlu, H. & Sertçelik, F. (2020). Focal mechanisms of the January 22, 2020 Akhisar-Manisa earthquake (Mw 5.5) and its aftershocks: Seismotectonic implications. *Turkish Journal of Earthquake Research*, 2(1), 27–46. https://doi.org/10.46464/tdad.730335
- ISC, (2026, 10 Mayıs). *International Seismological Centre. On-line Bulletin*. https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/

- İzdar, E. (1968). Kozak intruzif masifi petrolojisi ve Paleozoyik çevre kayaçları ile jeolojik bağlantıları. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 11(1-2), 140-179. <https://izlik.org/JA99AN73YB>
- Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., Lacombe, O., Lecomte, E., Burov, E., Denèle, Y., Brun, J. P., Philippon, M., Paul, A., Salaün, G., Karabulut, H., Piromallo, C., Monié, P., Gueydan, F., Okay, A. İ., Oberhänsli, R., Pourteau, A., Augier, R., Gadenne, L. & Driussi, O. (2013). Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat. *Tectonophysics*, 597-598, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.011>
- Kalafat, D. (1995). *Anadolu'nun tektonik yapılarının deprem mekanizmaları açısından irdelenmesi* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. İstanbul Üniversitesi Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü.
- Kaya, O. (1979). Ortadoğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 22, 35-58. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/96a754649af389e_ek.pdf
- Kaya, O. (1981). Miocene reference section for the coastal parts of West Anatolia. *Newsletters on Stratigraphy*, 10(3), 164-191. <https://doi.org/10.1127/nos/10/1981/164>
- Kaya, O., Ünay, E., Saraç, G., Eichhorn, S., Hassenrück, S., Knappe, A., Pekdeğer, A. & Mayda, S. (2004). Halitpaşa Transpressive Zone: Implications for an Early Pliocene compressional phase in central western Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13(1), 1-13.
- Kaya, O., Ünay, E., Göktaş, F. & Saraç, G. (2007). Early Miocene stratigraphy of Central West Anatolia, Turkey: Implications for the tectonic evolution of the Eastern Aegean area. *Geological Journal*, 42(1), 85-109. <https://doi.org/10.1002/gj.1071>
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. & Bozkurt, E. (1999). Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society of London*, 156(3), 605-616. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.3.0605>
- KRDAE, (2026, 10 Mayıs). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. *Deprem Kataloğu*. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- Le Pichon, X. & Angelier, J. (1979). The Hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean area. *Tectonophysics*, 60(1-2), 1-42. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90131-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90131-8)
- Le Pichon, X. & Angelier, J. (1981). The Aegean Sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 300(1454), 357-372.
- McKenzie, D. P. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: The Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 55, 217-254. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb04759.x>
- OCA/Geoazur, (2026, 10 Mayıs). Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur Laboratory. *SismoAzur seismicity data*. <https://sismoazur.oca.eu/>
- Okay, A. ve Siyako, M. (1993). İzmir-Balıkesir arasında İzmir-Ankara Neo-Tetis kenedinin yeni konumu. S. Turgut (Ed.), *Türkiye ve Çevresinin Tektoniği-Petrol Potansiyeli, Ozan Sungurlu Sempozyumu Bildirileri Kitabı*, (s. 333-355). Ankara.
- Öncü, U., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Softa, M., Sümer, Ö., Eski, S., Spencer, J. Q. G., Şahiner, E., Yüksel, M., Meriç, N. & Topaksu, M. (2024). Palaeoseismological assessment for a seismic gap located very close to the epicentre of the 30 October 2020 Samos Earthquake (M6.9), western Anatolia, Turkey. *Natural Hazards*, 120, 4699-4727. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06290-6>
- Öngür, T. (1972). *Dikili-Bergama jeotermal araştırma sahasına ilişkin jeoloji raporu* (Rapor no: 5444). Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış).
- Özcan, D. M., Özkaymak, Ç., Karabacak, V., Sümer, Ö., Şahiner, F. ve Çınar Yıldız, S. (2025). Gelenbe Fay Zonu'nun Holosen aktivitesine ait ilk paleosismolojik bulgular, Batı Anadolu (First palaeoseismological findings of Holocene activity of Gelenbe Fault Zone, Western Anatolia). *Uluslararası Katılımlı 77. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, 14-18 Nisan 2025, MTA Genel Müdürlüğü Kültür Sitesi, Ankara, Türkiye.
- Özcan, D. M., Özkaymak, Ç., Karabacak, V., Şahiner, F., Yaşar, Ş. Ş., Solak, H. İ., Tiryakioğlu, İ.,

- Sümer, Ö. ve Çınar Yıldız, S. (2026). Gelenbe Fay Zonu'nun (Batı Anadolu) paleosismolojik, kinematik ve sismolojik değerlendirmesi: 2025 Sındırgı deprem etkinliği üzerindeki yapısal bariyer etkisi (Palaeoseismological, kinematic and seismological evaluation of the Gelenbe Fault Zone (Western Anatolia): Structural barrier effect on the 2025 Sındırgı earthquake activity). *Uluslararası Katılımlı 78. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı* (s.: 488), 13–17 Nisan 2026, MTA Genel Müdürlüğü Kültür Sitesi, Ankara, Türkiye.
- Özkaymak, Ç. (2012). *Manisa Havzası'nın aktif tektoniği ve depremselliği, Batı Anadolu, Türkiye* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özkaymak, Ç. (2015). Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications. *Geodinamica Acta*, 27(2–3), 110–129. <https://doi.org/10.1080/09853111.2014.957504>
- Özkaymak, Ç. & Sözbilir, H. (2008). Stratigraphic and structural evidence for fault reactivation: The active Manisa Fault Zone, western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 615–635.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H. & Uzel, B. (2013). Neogene–Quaternary evolution of the Manisa Basin: Evidence for variation in the stress pattern of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone, western Anatolia. *Journal of Geodynamics*, 65, 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.004>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Geçievi, M. O. & Tiryakioğlu, İ. (2019). Late Holocene coseismic rupture and aseismic creep on the Bolvadin Fault, Afyon Akşehir Graben, Western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28, 787–804. <https://doi.org/10.3906/yer-1906-13>
- Ring, U., Laws, S. & Berner, M. (1999). Structural analysis of a complex nappe sequence and late Cenozoic exhumation of the Menderes Massif, western Turkey. *Journal of Structural Geology*, 21(11), 1559–1577. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00108-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00108-X)
- Ring, U., Glodny, J., Will, T. & Thomson, S. (2010). The Hellenic subduction system: High-pressure metamorphism, exhumation, normal faulting, and large-scale extension. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38(1), 45–76. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.050708.170910>
- Seyitoğlu, G. & Esat, K. (2022). The active fault pattern based on morphotectonic and structural data in the south of Ulubat Lake and the Susurluk valley along the southern branch of North Anatolian Fault Zone: A criticism of the bend model in northwest Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(2), 137–152. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1759>
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128(2), 155–166. <https://doi.org/10.1017/S0016756800018343>
- Seyitoğlu, G., Scott, B. C. & Rundle, C. C. (1992). Timing of Cenozoic extensional tectonics in west Turkey. *Journal of the Geological Society*, 149(4), 533–538. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.4.0533>
- Seyitoğlu, G., Esat, K., Kaypak, B. & Çıvgın, B. (2022). Seismotectonics of the southern branch of North Anatolian Fault Zone along Bolu, Bursa, and İzmir cities and Değirmenlik (Milos) island in the Aegean Sea. *Yerbilimleri*, 43(2), 138–159. <https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.948130>
- Solak, H. İ. (2020). *İzmir Balıkesir Transfer Zonu ve çevresindeki güncel deformasyonların GNSS yöntemi ile incelenmesi* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Solak, H. İ., Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Aktuğ, B., Yavaşoğlu, H. H. & Özkan, A. (2024). Recent tectonic features of Western Anatolia based on half-space modeling of GNSS data. *Tectonophysics*, 872, Article 230194. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230194>
- Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D. ve Altınok, Y. (1981). *Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu (M.Ö. 2100-M.S. 1900)* (TÜBİTAK Proje no: TBAG-341). İstanbul.
- Sözbilir, H. ve Emre, T. (1996). Menderes masifinin neotektonik evriminde oluşan supradetachment havzalar ve rift havzaları. 49. *Türkiye Jeoloji Kurultayı 1996 Bildiri Özleri Kitabı* (s.: 30–31).

- Sözbilir, H., İnci, U., Erkül, F. & Sümer, Ö. (2003). An intermittently active transform zone accommodating N-S extension in Western Anatolia and its relation to the North Anatolian Fault System. *International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault Systems*, Ankara, Türkiye.
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Özkaymak, Ç., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U. ve Helvacı, C. (2007). Batı Anadolu'da İzmir-Balıkesir Transfer Zonu içinde kalan aktif doğrultu atımlı faylarla sınırlı havzaların jeolojik özellikleri. *11. Aktif Tektonik Araştırma Grubu Çalıştayı Bildiri Özleri Kitabı*, (s. 42).
- Sözbilir, H., Sarı, B., Uzel, B., Sümer, Ö. & Akkiraz, S. (2011). Tectonic implications of transtensional supradetachment basin development in an extension-parallel transfer zone: The Kocaçay Basin, western Anatolia, Turkey. *Basin Research*, 23(4), 423–448.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00496.x>
- Sözbilir, H., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Softa, M., Tepe, Ç. ve Baba, A. (2017). Çanakkale-Ayvacık deprem fırtınasının (14 Ocak–20 Mart 2017) sismik kaynakları. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 6, 1–17. <https://izlik.org/JA96RZ35FX>
- Sözbilir, H., Çakır, R., Eski, S., Duran, İ., Utku, M. ve Akgün, M. (2020). 22 Ocak 2020 Akhisar depremleri ve bölgenin sismotektoniği ön raporu (Versiyon 1.0). Dokuz Eylül Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, İzmir.
- Sümer, Ö., Uzel, B., Özkaymak, Ç. & Sözbilir, H. (2018). Kinematics of the Havran-Balıkesir Fault Zone and its implication on geodynamic evolution of the Southern Marmara Region, NW Anatolia. *Geodinamica Acta*, 30(1), 306–323.
<https://doi.org/10.1080/09853111.2018.1540145>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Herece, E. (1987). *Türkiye diri fayları ve depremsellikleri* (Rapor no: 8174). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara (yayımlanmamış).
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1992). *1:1.000.000 ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Şengöçmen Geçkin, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Softa, M., Spencer, J. Q. G., Şahiner, E., Meriç, N. & Deliormanlı, A. H. (2022). Evidence of surface rupture associated with historical earthquakes on the Gülbahçe Fault Zone (İzmir, Türkiye) and its application for determination of the surface fault-rupture hazard zone. *Natural Hazards*, 114(2), 2189–2218.
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05467-9>
- Şengör, A. M. C. (1980). *Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları*. Türkiye Jeoloji Kurumu Konferans Serisi 2, 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 K. Biddle & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*, (pp. 227–264). *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 37*.
- Tan, O. (2013). The dense micro-earthquake activity at the boundary between the Anatolian and South Aegean microplates. *Journal of Geodynamics*, 65, 199–217.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.05.005>
- Tiryakioğlu, İ., Gezgın, C., Aktuğ, B., Solak, H. İ., Özkaymak, Ç., Yaşar, Ş. Ş. ... & Akgül, F. M. (2026). Revealing the source mechanism of the August 10, 2025 Sındırgı Earthquake (Mw 6.3) with geological and geodetic evidence. *Advances in Space Research*, 78(2), 580–598.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.04.047>
- Uysal, I. T., Karabacak, V., Aykut, T., Ring, U., Liu, E., Sancar, T., Leonard, N., Tong, K., Todd, A. J. & Temel, A. (2025). Was the formation of the North Anatolian Fault influenced by the Aegean extension?. *Terra Nova*, 37(5), 342–352.
<https://doi.org/10.1111/ter.12782>
- Uzel, B. & Sözbilir, H. (2008). A first record of a strike-slip basin in western Anatolia and its tectonic implication: The Cumaovası Basin. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(3), 559–591.
- Uzel, B., Sözbilir, H., Sümer, Ö., İnci, U. & Özkaymak, Ç. (2009). Field evidence for an active transtensional basin in western Anatolia: The Inner Bay of İzmir. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 13408.
- Uzel, B., Sözbilir, H. & Özkaymak, Ç. (2013). Structural evidence for strike-slip deformation in the İzmir-

- Balıkesir Transfer Zone and consequences for late Cenozoic evolution of western Anatolia (Turkey). *Journal of Geodynamics*, 65, 94–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.009>
- Uzel, B., Langereis, C. G., Kaymakçı, N., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. & Özkaptan, M. (2014). Kinematics of İzmir-Balıkesir Transfer Zone and the West Anatolian rotational history during the exhumation of the Menderes metamorphic core complex. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 10982.
- Uzel, B., Langereis, C. G., Kaymakçı, N., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. & Özkaptan, M. (2015). Paleomagnetic evidence for an inverse rotation history of Western Anatolia during the exhumation of Menderes core complex. *Earth and Planetary Science Letters*, 414, 108–125.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.008>
- Uzel, B., Sümer, Ö., Özkaptan, M., Özkaymak, Ç., Kuiper, K., Sözbilir, H. & Langereis, C. G. (2017). Palaeomagnetic and geochronological evidence for a major middle Miocene unconformity in Söke Basin (western Anatolia) and its tectonic implications for the Aegean region. *Journal of the Geological Society*, 174(4), 721–740.
<https://doi.org/10.1144/jgs2016-006>
- Uzel, B., Kuiper, K., Sözbilir, H., Kaymakçı, N., Langereis, C. G. & Boehm, K. (2020). Miocene geochronology and stratigraphy of western Anatolia: Insights from new Ar/Ar dataset. *Lithos*, 352, Article 105305.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105305>
- van Hinsbergen, D. J. J., Dekkers, M. J., Bozkurt, E. & Koopman, M. (2010). Exhumation with a twist: Paleomagnetic constraints on the evolution of the Menderes metamorphic core complex, western Turkey. *Tectonics*, 29(3), Article TC3009.
<https://doi.org/10.1029/2009TC002596>
- Westerweel, J., Uzel, B., Langereis, C. G., Kaymakçı, N. & Sözbilir, H. (2020). Paleomagnetism of the Miocene Soma Basin and its structural implications on the central sector of a crustal-scale transfer zone in western Anatolia (Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 193, Article 104305.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104305>



Çan İlçesinin (Çanakkale, KB Türkiye) Jeotermal Kaynakları ve Madencilik Potansiyelinin Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi Perspektifinden Değerlendirilmesi
Geothermal Resources and Mining Potential of the Çan District (Çanakkale, NW Türkiye): A Sustainable Resource Management Perspective

Deniz Şanlıyüksel Yücel*

*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Terzioğlu Kampüsü, Mühendislik Fakültesi,
Maden Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye*

• Geliş/Received: 12.04.2026 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 17.08.2026 • Kabul/Accepted: 18.08.2026
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 29.08.2026 • Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Bu çalışma, Biga Yarımadası'nın jeoekonomik odak noktasında yer alan Çan (Çanakkale) ilçesinin jeotermal kaynak, metalik maden, endüstriyel hammadde ve linyit potansiyelini su-enerji-maden bütünlüğüne dayalı sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifiyle değerlendirmektedir. Değerlendirme; saha çalışmaları, fizikokimyasal ölçümler, hidrojeokimyasal analizler ve kurumsal verilere dayanmaktadır. Düşük-orta entalpili jeotermal alanlardan Bardakçılar, Karılca ve Çan-Merkez termal ve sağlık turizminde kullanılırken, Alibeyçiftliği'nde tesis bulunmamakta, kaynak yerel halk tarafından kullanılmaktadır. En yüksek kuyu içi sıcaklıklar Bardakçılar'da (750 m, 67 °C) ve Karılca'da (450 m, 61,9 °C) ölçülmüştür. Jeotermometre hesaplamaları, rezervuar sıcaklıklarının ölçülen kuyu içi sıcaklıklarından daha yüksek olabileceğini göstermekte ve kademeli kullanım olanaklarına işaret etmektedir. Bölgenin metalik maden zenginliği; Halilağa (Cu-Au) porfiri sistemi, Ağı Dağı (Au-Ag), Kocayayla (Pb-Zn ± Cu) ve Kumarlar (Pb-Zn-Cu ± Au) epitermal sistemleri ve antik metalürjiyle ilişkili Yuvalar (Fe-Cu) skarn yatağı ile temsil edilmektedir. Cevherleşme sistemlerinin polimetallik doğası Ge, Mo ve Sb gibi elementlerin yan ürün olarak geri kazanımı açısından potansiyel sunmakta olup ayrıntılı araştırmayı gerektirmektedir. Endüstriyel hammadde kaynakları ise seramik sanayisinin temel girdilerini oluşturan kaolin, sileks, kuvars ve feldispat rezervlerinin yanı sıra çimento ve inşaat sektöründe kullanılan kalker ile dekoratif malzeme olarak değerlendirilen Çan taşından oluşmaktadır. Yaklaşık 92,5 milyon ton linyit rezervine sahip havzada, toplam 650 MW kurulu güce sahip iki termik santral bulunmaktadır. Madencilik sektörü, yaklaşık 7.000 kişilik doğrudan istihdam ile yerel ekonominin temel bileşenlerinden olup, sektörel bağımlılık ve düşük kadın istihdam oranı sosyo-ekonomik sürdürülebilirlik riski yaratmaktadır. Asit kaya/maden drenajı ekosistem üzerinde çevresel riskler oluşturmaktadır. Bu doğrultuda, termik santrallerden açığa çıkan uçucu küllerin asidik drenaj nötralizasyonunda ve pasaların oksidasyonunun sınırlandırılmasında değerlendirilmesi döngüsel ekonomi önerileri arasındadır. Rehabilitasyon edilen linyit sahasında kurulan güneş enerjisi santrali, madencilik sonrası arazi kullanımına somut örnek oluşturmakta; benzer uygulamaların yaygınlaştırılması gerekmektedir. Yapılacak detaylı jeofizik araştırmalar ve derin sondajlarla jeotermal enerji kullanım alanlarının artırılması bölge için önem taşımaktadır. Bulgular, ekonomik büyümeyi sosyal kapsayıcılık ve ekolojik korumayla dengeleyen bütüncül adımların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biga Yarımadası, Çan, döngüsel ekonomi, jeotermal sistemler, madencilik potansiyeli, su-enerji-maden etkileşimi, sürdürülebilir kaynak yönetimi.

Abstract: This study evaluates the geothermal resource, metallic ore, industrial raw material, and lignite potential of the Çan district (Çanakkale), located at the geo-economic focal point of the Biga Peninsula, from the perspective

of sustainable resource management based on water-energy-mining nexus. The evaluation is based on field studies, physicochemical measurements, hydrogeochemical analyses, and institutional data. Among the low- to medium-enthalpy geothermal fields, Bardakçılar, Karailıca, and Çan-Merkez are utilized for thermal and health tourism, whereas Alibeyçiftliği lacks facilities, with the resource being used directly by local residents. The highest downhole temperatures were measured at Bardakçılar (750 m, 67 °C) and Karailıca (450 m, 61.9 °C). Geothermometer calculations indicate that reservoir temperatures may exceed the measured downhole temperatures, pointing to the possibility of cascade utilization. The metallic ore endowment of the region is represented by the Halılağa (Cu-Au) porphyry system; the Ağı Dağı (Au-Ag), Kocayayla (Pb-Zn ± Cu), and Kumarlar (Pb-Zn-Cu ± Au) epithermal systems; and the Yuvalar (Fe-Cu) skarn deposit, associated with ancient metallurgy. The polymetallic nature of these mineralization systems offers potential for the by-product recovery of elements such as Ge, Mo, and Sb, warranting further detailed investigation. The industrial raw material resources, in turn, comprise kaolin, siliceous, quartz, and feldspar reserves — the primary inputs of the ceramics industry — together with limestone used in the cement and construction sectors, and Çan stone, valued as a decorative material. The basin, which holds approximately 92.5 million tons of lignite reserves, hosts two thermal power plants with a combined installed capacity of 650 MW. The mining sector, providing direct employment for approximately 7,000 people, constitutes one of the main components of the local economy; however, sectoral dependency and the low female employment rate pose a risk to socio-economic sustainability. Acid rock/mine drainage poses environmental risks to the ecosystem. In this regard, the utilization of fly ash generated by thermal power plants in the neutralization of acidic drainage and in limiting the oxidation of waste rock is among the proposed circular economy measures. The solar power plant established on the rehabilitated lignite site constitutes a concrete example of post-mining land use, and the wider adoption of similar applications is warranted. Expanding the range of geothermal energy use in the region through detailed geophysical surveys and deep drilling is of particular importance. The findings underscore the necessity of holistic measures that balance economic growth with social inclusivity and ecological conservation.

Keywords: Biga Peninsula, circular economy, Çan, geothermal systems, mining potential, sustainable resource management, water-energy-mining nexus.

GİRİŞ

Türkiye, dünyanın sismik açıdan en aktif kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya dağ kuşağı üzerinde, Afrika, Arap ve Avrasya levhaları arasındaki karmaşık bir tektonik rejim içerisinde yer almaktadır (McKenzie, 1972; Taymaz vd., 1991; Bozkurt, 2001; Gürer vd., 2021). Bu tektonik konum, ülke genelinde yoğun ve sürekli bir sismik aktivitenin gelişmesine neden olmaktadır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayımlanan güncel deprem katalogları, 2025 yılı boyunca Türkiye genelinde yüksek düzeyli sismik aktivitenin sürdüğünü göstermektedir. AFAD verilerine göre, 2025 yılında Türkiye genelinde toplam 50.589 deprem meydana gelmiş ve bu depremlerden 12'sinin moment büyüklüğü $M_w \geq 5$ olarak kaydedilmiştir. Sismik aktivitenin özellikle Marmara Denizi ile Balıkesir (Sındırgı) çevresinde yoğunlaştığı ve bu alanların bölgesel ölçekte belirgin bir sismotektonik hareketlilik sergilediği görülmektedir (AFAD, 2026).

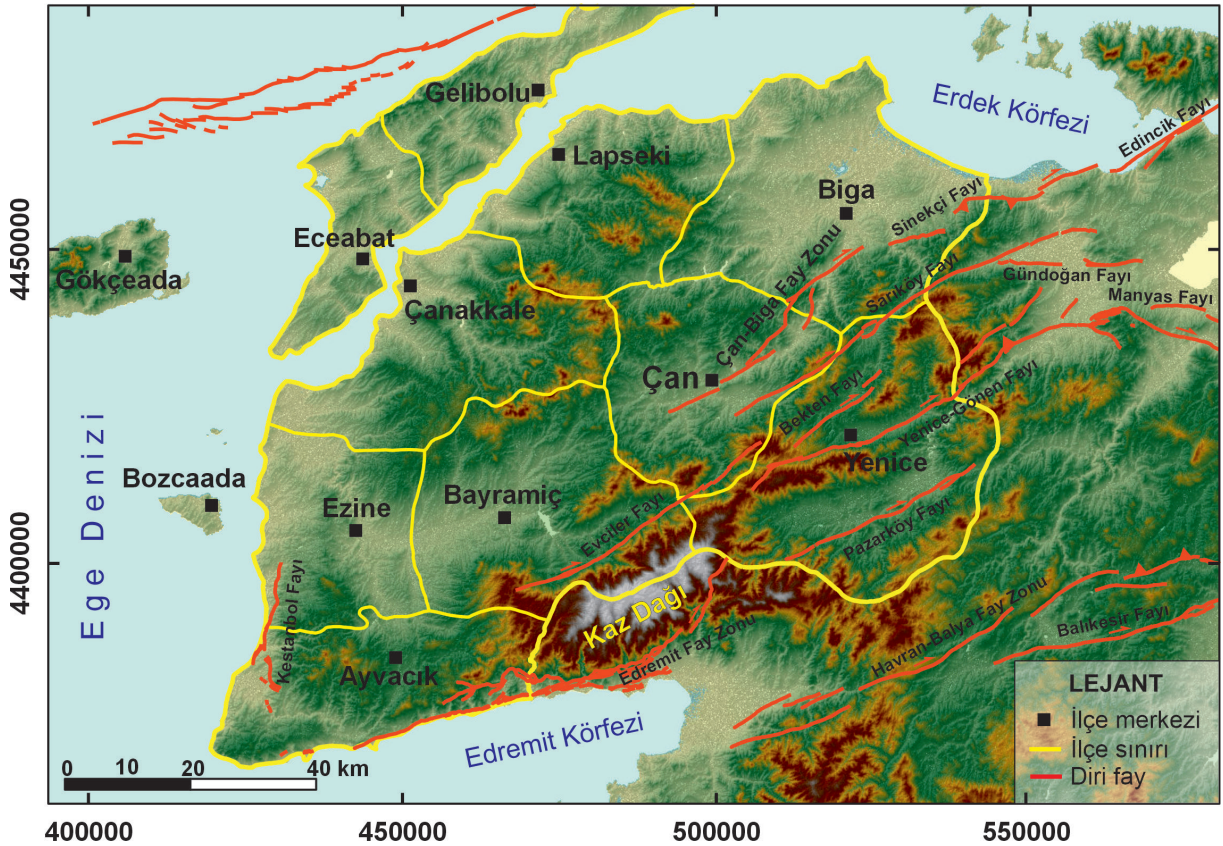
Türkiye'nin güncel tektonik yapısını belirleyen Neotektonik rejim, Orta-Geç Miyosen döneminde Arap, Afrika ve Avrasya levhaları arasında gerçekleşen kıta-kıta çarpışması ile başlamıştır. Bu çarpışma süreci, Türkiye'nin en önemli tektonik unsurları olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Doğu Anadolu Fay Zonu'nun (DAFZ) gelişimine zemin hazırlamıştır. Günümüzde bu iki ana fay zonu arasında yer alan Anadolu levhası batıya doğru bir kaçış tektoniği sergilerken, fayların doğusunda kalan Doğu Anadolu Bölgesi ise sıkışma rejimi altında yükselmektedir (Şengör vd., 2008; Özalp vd., 2016).

KAFZ, doğuda Karlıova'dan başlayarak batıda Saros Körfezi'ne kadar uzanan, yaklaşık 1.500 km uzunluğunda, sağ yanal doğrultu atımlı ve yüksek sismik aktiviteye sahip bir fay sistemidir (Barka ve Gülen, 1988). Batı Anadolu'nun şekillenmesinde ise Ege Graben Sistemi (EGS) belirleyici rol oynamaktadır. Bu sistem, Anadolu

levhasının batıya doğru kaçışı ile Helen dalmabatma zonunun geri çekilmesi etkisinin birleşimi sonucunda, bölgenin güneybatıya doğru genişlemesiyle oluşmuştur (McKenzie, 1978; Dewey ve Şengör, 1979). Bu karmaşık tektonik etkileşim sonucunda kabuk incelmış; horst ve graben yapıları ile Batı Anadolu günümüzdeki karakteristik morfolojisini kazanmıştır (Taymaz vd., 1991; Özkaymak ve Sözbilir, 2012).

Biga Yarımadası, batıda Kuzey Ege Denizi, kuzeyde Marmara Denizi, güneybatıda Edremit Körfezi ve doğuda Havran-Manyas hattı ile sınırlanmıştır, sismik açıdan aktif bir deformasyon alanıdır (Koçyiğit, 2009). Bölge, hem KAFZ'nin güney kolunun batıya doğru hareketinin hem de Batı Anadolu'da hâkim olan

kuzey-güney yönlü genişleme rejiminin ortak etkisi altındadır (Westaway, 1994; Barka ve Reilinger, 1997). Emre vd. (2012, 2013) tarafından Edincik, Sinekçi, Manyas, Yenice-Gönen, Sarıköy, Bekten, Evciler, Gündoğan, Kestanbol, Pazarköy, Edremit, Çan-Biga ve Balıkesir faylarının Holosen dönemde aktif (diri fay) özellik taşıdığı ortaya konmuştur. Çanakkale ili, bu karmaşık tektonik sistemin merkezinde, Biga Yarımadası'nın büyük bir bölümünü kaplamaktadır (Şekil 1). Bölgedeki deformasyon rejimi ağırlıklı olarak KD-GB, KKB-GGD ve D-B doğrultulu fay sistemleri tarafından kontrol edilmektedir (Sözbilir vd., 2018). Çanakkale, tarihsel ve aletsel dönemde can ve mal kayıplarına yol açan çok sayıda orta ve büyük ölçekli depreme maruz kalmıştır (Emre vd., 2012).



Şekil 1. Çanakkale ili ve yakın çevresinde bulunan diri fayların dağılımı (Emre vd., 2013).

Figure 1. Distribution of active faults in Çanakkale Province and its vicinity (Emre et al., 2013).

Türkiye’deki jeotermal alanların dağılımı; aktif fay sistemleri, genç volkanizma ve yaygın hidrotermal alterasyon zonlarının mekânsal dizilimi ile paralellik göstermektedir (Şimşek, 2002). Ülke genelinde 30 °C üzerinde sıcaklığa sahip 2.000’den fazla jeotermal kaynak ve kuyu tespit edilmiştir. Bunlar arasında İç Anadolu’da açılan bir kuyuda 3.845 m derinlikte ölçülen 341 °C’lik kuyu dibi sıcaklığı, Türkiye’nin sahip olduğu yüksek jeotermal enerji potansiyelini ortaya koymaktadır (Şener vd., 2023). Jeotermal alanların yaklaşık %78’inin Ege Bölgesi’nde yoğunlaştığı, geri kalan potansiyelin ise İç Anadolu (%9), Marmara (%7) ve Doğu Anadolu (%5) bölgelerine dağıldığı tespit edilmiştir (ETKB, 2024).

Jeotermal kaynaklar, sıcaklık, basınç ve kimyasal bileşimlerine bağlı olarak farklı kullanım alanlarına sahiptir. Türkiye’deki sahaların yaklaşık %84’ü düşük ve orta entalpili jeotermal sistemlerden oluşmakta olup, bu kaynaklar konut ve sera ısıtması, termal turizm ve endüstriyel prosesler gibi doğrudan kullanım uygulamalarında değerlendirilmektedir. Geri kalan %16’lık kısmı ise elektrik enerjisi üretimine elverişli yüksek entalpili jeotermal sistemler kapsamında yer almaktadır (Şener vd., 2023).

Türkiye’nin jeotermal enerjiye dayalı kurulu gücü Mayıs 2026 itibarıyla 1.798 MW seviyesine ulaşmış ve 125.481 MW olan toplam elektrik kurulu gücü içerisinde yaklaşık %1,43’lük bir paya sahip olmuştur (EPIAŞ, 2026). İlgili ayda gerçekleştirilen 905.173 MWh jeotermal elektrik üretimi ise ülkenin toplam elektrik üretiminin %3,37’sini oluşturmaktadır. Bu gelişim süreci tarihsel perspektiften incelendiğinde, 2005 yılında yalnızca 20 MW olan söz konusu kapasitenin günümüze kadar yaklaşık 90 kat artış gösterdiği saptanmaktadır. Yüzey sıcaklığı ≥ 30 °C olan 460 jeotermal alandan 27’si elektrik üretimine yönelik olarak işletilmektedir (Mertoğlu vd., 2021; Gutiérrez-Negrín, 2024). Bu kapasitesiyle Türkiye, dolaylı kullanımda küresel ölçekte

dördüncü, Avrupa’da ise birinci sırada, doğrudan kullanım alanında ise dünyada beşinci, Avrupa’da üçüncü konumdadır. 2024 yılı itibarıyla 13 ilde 25 jeotermal alandan 170.481 konut eşdeğeri alan merkezi ısıtma ile karşılanmakta, 27 ilde 62 sahada toplam 6.970.158 m² sera alanı jeotermal enerjiyle ısıtılmaktadır (Çelmen vd., 2025).

Biga Yarımadası’nın en önemli morfolojik yükseltisi olan Kaz Dağı (Karataş Tepesi, 1.774 m), yıllık ortalama 1.000 mm’yi aşan yağış miktarı ile yer altı suyu rezervlerinin beslenmesinde rol oynamaktadır. Bu hidrolojik beslenim, suların derin dolaşımını destekleyerek jeotermal akışkanların oluşumu ve yüzeye taşınmasını kolaylaştırmaktadır (Yalçın, 2007). Bölgedeki başlıca tektonik hatlar ve jeotermal çıkışlar genel olarak KD-GB doğrultuludur. Çanakkale il sınırları içerisinde, yüzey sıcaklıkları 23-96,2 °C arasında değişen 14 jeotermal alan tanımlanmıştır (Şanlıyüksel Yücel vd., 2013). İldeki en yüksek sıcaklık, Tuzla jeotermal alanında 814 m derinlikteki kuyuda 174 °C olarak ölçülmüştür (Akkuş vd., 2005). Bu sahada, toplam kurulu gücü 30,45 MW olan dört adet jeotermal enerji santrali aktif olarak işletilmektedir (EPDK, 2026).

Söz konusu 14 alandan dördünün yer aldığı Çan ilçesi, jeotermal kaynakları, linyit rezervleri, endüstriyel hammadde yatakları ve yüksek metalik cevherleşme potansiyeliyle Biga Yarımadası’nın jeolojik mirasını yansıtmaktadır. Bu özellikler nedeniyle bölge, Türkiye’nin jeoekonomik açıdan önem taşıyan alanlar arasında yer almaktadır. Bu çalışma; saha gözlemleri, hidrojeokimyasal analizler, güncel kurumsal veriler ve literatür bulguları ışığında Çan ve yakın çevresinin jeotermal enerji ile madencilik potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

Çalışmanın temel amacı, jeolojik unsurlar ile enerji, endüstriyel hammadde ve metalik maden potansiyeli arasındaki çok yönlü ilişkileri; çevresel risk yönetimi, döngüsel ekonomi, kaynak verimliliği, teknolojik

entegrasyon ve bölgesel kalkınma boyutlarıyla sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifinden ele almaktır. Ayrıca çalışma, ilçenin doğal kaynak potansiyelini su-enerji-maden bütünlüğü ekseninde değerlendirerek, çevresel iyileştirmeyi önceliklendiren ve ekonomik çıktılarla desteklenen uygulanabilir öneriler sunmaktadır.

Çan ve Çevresinin Coğrafi Özellikleri

Çan ilçesi, Çanakkale il merkezinin yaklaşık 70 km güneydoğusunda, Biga Yarımadası'nın coğrafi merkezinde yer almaktadır. Antik dönemde Granikos olarak adlandırılan Kocabaş Çayı'nın hidrolojik havzası içerisinde bulunan ilçe hem bir geçiş koridoru olması hem de zengin doğal kaynakları nedeniyle köklü bir yerleşim tarihine sahiptir. Bölgedeki arkeolojik bulgular, Orta Paleolitik döneme tarihlendirilen yontma taş aletlerle belgelenmiş olup Çan'ın, Biga Yarımadası'nda ilk insan izlerinin en yoğun saptandığı alanlardan biri olduğunu ortaya koymaktadır (Özer vd., 2018; Atabay ve Körpe, 2019).

Yaklaşık 88.700 hektarlık yüzölçümüne sahip olan ve idari olarak bir belde ile 65 köyü barındıran ilçe, morfolojik açıdan çevresi dağlık kütlelerle kuşatılmış tipik bir havza (çanak) yapısı sergilemektedir. İlçenin en belirgin topoğrafik yükseltisi güneybatıda yer alan Ağı Dağı'dır (983 m). Tarımsal faaliyetlerin yoğunlaştığı Karakoca, Bahadırılı ve Helvacı ovaları ise bölgenin başlıca düzlük alanlarını oluşturmaktadır. Kocabaş Çayı, 84 km uzunluğu ile Çanakkale ilinin en uzun ikinci akarsuyudur ve maksimum taşkın debisi 1.345 m³/sn olarak kaydedilmiştir (ÇÇŞİDİM, 2025). Kaynağını Ağı Dağı'nın yükseklerinden (Kaynarca) alan bu akarsu, Çan ve Biga ilçelerinin verimli tarım alanlarını kat ederek Karabiga üzerinden Marmara Denizi'ne dökülmektedir. Akarsu ağının aşındırma faaliyetleri, bölgenin heterojen jeolojik yapısıyla birlikte karakteristik vadi morfolojilerinin gelişiminde belirleyici rol oynamıştır.

Çan ve çevresinde, Akdeniz ve Karadeniz iklimleri arasında geçiş özelliği gösteren bir iklim tipi hâkimdir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1929-2025 arasındaki verilerine göre bölgede yıllık ortalama sıcaklık 15,2 °C, yıllık toplam yağış miktarı ise yaklaşık 620,7 mm'dir (MGM, 2026). Akarsular, mevsimsel yağışlar ve kar erimelerine bağlı olarak düzensiz bir rejim göstermektedir. Bu düzensizliği yönetmek, taşkın riskini azaltmak ve su temini sağlamak amacıyla bölgede Karakoca, Altıkulaç ve Karlı barajları ile Küçük ve Koyunyeri başta olmak üzere çok sayıda gölet inşa edilmiştir (DSİ, 2026).

Bu fiziki ve iklimsel çerçeve içinde gelişen ilçenin sosyo-ekonomik yapısı; linyit, metalik maden ve endüstriyel hammadde rezervleri, gelişmiş seramik endüstrisi, enerji üretim faaliyetleri ve yoğun tarımsal üretimin karşılıklı etkileşimiyle şekillenmiştir. Bu çok bileşenli üretim modelinin sürdürülebilirliği ise özellikle yüzeysel su kaynaklarının yetersiz kaldığı dönemlerde kritik önem taşıyan yer altı suyu rezervlerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu bağlamda, bölgedeki endüstriyel ve madencilik faaliyetleri ile yerel yerleşimler için önemli bir kaynak olan Kocabaş Çayı havzasındaki alüvyon akifer üzerindeki antropojenik kullanım baskısı, yer altı suyu seviyesi ve kalitesi ile söz konusu faaliyetler arasındaki hidrojeokimyasal etkileşimin ayrıntılı biçimde analiz edilmesini gerekli kılmaktadır.

ÇAN ve ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Stratigrafi ve Litolojik Birimler

Biga Yarımadası'ndaki Tersiyer öncesi temel kayalar, farklı stratigrafik istifler sunan ve birbirleriyle tektonik ilişkili KD-GB uzanımlı zonlar boyunca yüzlek vermektedir. Bu zonlar doğudan batıya doğru sırasıyla İzmir-Ankara zonu, Sakarya zonu, Çetmi melanji ve Ezine zonu olarak adlandırılmıştır (Duru vd., 2012). Biga Yarımadası'ndan Doğu Pontidler'e kadar

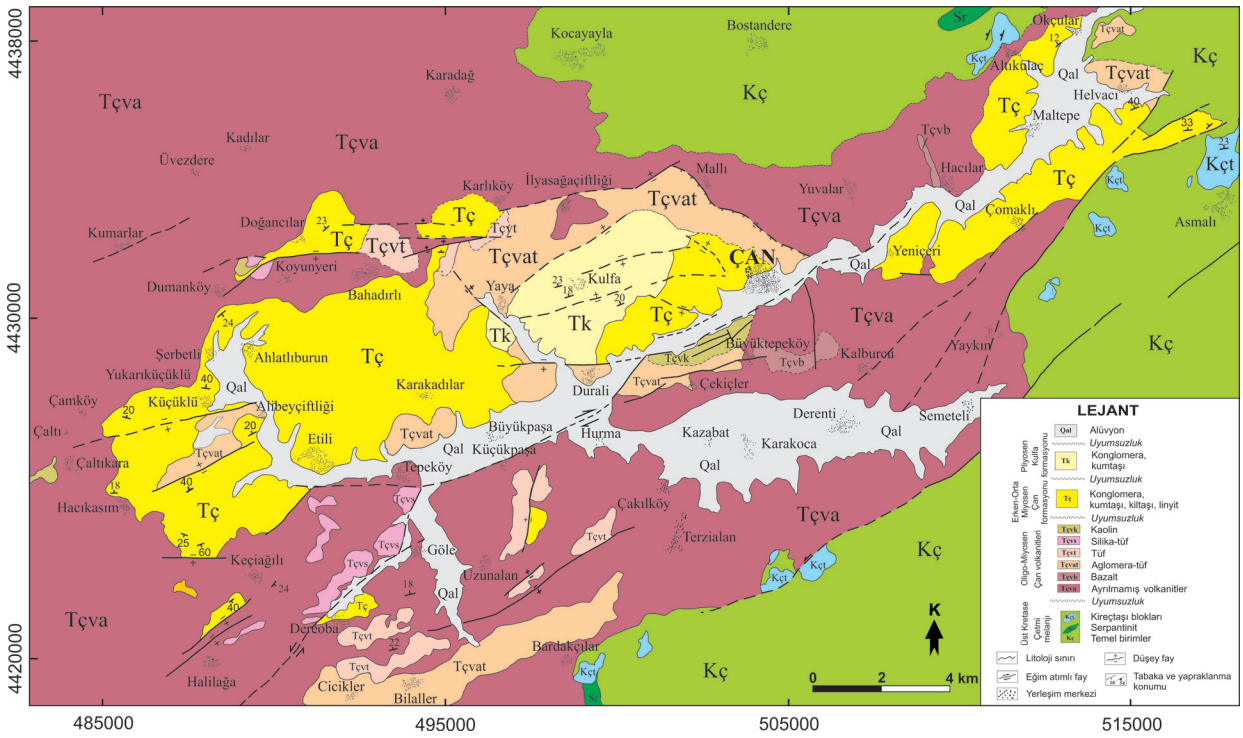
uzanan Sakarya zonu Şengör ve Yılmaz (1981) tarafından tanımlanmıştır. Bu zonda, temelde Paleozoyik yaşlı Kazdağ metamorfikleri (Bingöl, 1969), bunlarla tektonik dokanaklı, muhtemel yaşı Triyas öncesi olan düşük dereceli metamorfizma geçirmiş metasedimanter kayaçlardan oluşan Kalabak formasyonu (Krushensky vd., 1980) ve en üstte, alttaki birimlerle çoğunlukla tektonik dokanaklı, yer yer uyumsuz konumlu Permilen-Orta Triyas yaşlı Karakaya kompleksi (Bingöl vd., 1973; Şengör vd., 1985) bulunmaktadır. Tüm bu birimler Geç Triyas-Erken Kretase yaşlı birimler tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Duru vd., 2012).

Sakarya zonunun temelinde yer alan bu birimlerden en altta bulunan Kazdağ metamorfikleri, çekirdeğinde meta-ultramafik kayaçlar ile metagabroların yer aldığı, bunu çevreleyen mermer ağırlıklı bir seri ve en üstte mermer ile amfibolit arakatlı felsik gneyslara geçiş gösteren birimlerden oluşmaktadır; bu kütle, Kazdağ masifinin yapısal kubbesini temsil etmektedir (Okay ve Satır, 2000). Kazdağ metamorfiklerinin yapısal kalınlığı 10 km'nin üzerindedir (Okay vd., 1990). Kazdağ metamorfizmasının yaşı literatürde tartışmalıdır; jeokronolojik çalışmalar Orta Karbonifer'den (308 ± 16 My; Okay vd., 1996) en Geç Oligosen'e (~ 24 My; Okay ve Satır, 2000) kadar geniş bir aralıkta değişmektedir. Duru vd. (2012), Kazdağ metamorfiklerinin Orta Karbonifer ($317,6 \pm 2,9$ My) ve Erken Triyas'ta ($246,9 \pm 4,7$ My) olmak üzere iki farklı yüksek dereceli metamorfizma evresi geçirdiğini ve bu metamorfik birimlerin bugünkü konumlarına tektonik olarak yerleşmesinin (istiflenmesinin) Erken Triyas'ta veya daha sonra gerçekleştiğini ifade etmiştir.

Kazdağ metamorfikleri üzerinde tektonik dokanakla yer alan birim; Karbonifer-Permilen yaşlı ekzotik kireçtaşı blokları içeren, hafif metamorfizma geçirmiş Triyas yaşlı feldispatlı kumtaşı, metakumtaşı, şeyl, kuvarsit, radyolarit, çamurtaşı, konglomera ve bazik volkanitlerden oluşmaktadır. Bingöl vd. (1973) tarafından

Karakaya formasyonu olarak tanımlanan birim, Şengör vd. (1985) tarafından, içerisindeki farklı alt birimlerin birbirinden farklı havza ve/veya ortam özellikleri göstermesi nedeniyle Karakaya kompleksi olarak adlandırılmıştır. Düzenli bir istif göstermeyen birim içerisindeki litolojiler, birbirleriyle düşey ve yanal yönde geçişli veya blok konumunda yer almaktadır (Duru vd., 2012). Karmaşık ve yoğun tektonik deformasyon geçirmesi nedeniyle yer yer melanj yapıları oluşan Karakaya kompleksi, benzer yaşta fakat değişik havza koşulları ve tektonik ortamları yansıtan farklı tektonostratigrafik birimlerden meydana gelmektedir (Okay vd., 1990). Bölgesel ölçekte ise Karakaya kompleksiyle eşdeğer nitelikte Orta-Geç Triyas yaşlı bir dalma-batma-eklenme kompleksinin, Kuzey Anadolu'da Ege Denizi'nden İran'a kadar batı-doğu yönünde yaklaşık 1.100 km boyunca yüzeyletiği belirtilmektedir (Pickett ve Robertson, 2004).

Kazdağ metamorfikleri ve Karakaya kompleksini tektonik olarak örten, Üst Kretase yaşlı karmaşık birim, ilk kez Okay vd. (1990) tarafından Çetmi ofiyolitli melanji olarak adlandırılmış, sonraki çalışmalarda ise Çetmi melanji olarak kullanılmıştır (Duru vd., 2012; Şekil 2). Çetmi melanji, farklı kökendeki kayaçların tektonik dilimler veya olistolitler şeklinde bir arada bulunduğu karmaşık bir topluluktur. Birim başlıca grovak, fillat, mikaşist, eklojit, serpantin, spilitik bazalt, radyolarit ve kireçtaşı-mermerden oluşmaktadır (Duru vd., 2012). Bu bileşenler içinde spilitik mafik volkanik kayaçlar, kireçtaşı ve grovak-şeyl hacimsel olarak baskındır; eklojit ve eklojitik mikaşist büyük tektonik dilimler halinde, radyolaryalı çört ve serpantin ise az miktarda yer almaktadır (Okay ve Satır, 2000). Melanj, doğu sınırında Sakarya zonu kayaçlarıyla eğim atımlı normal faylı bir dokanak oluşturmaktadır (Duru vd., 2012). Kaz Dağı'nda Çetmi melanjinin düşey kalınlığının 1.500 m'yi aşmadığı saptanmıştır (Okay ve Satır, 2000).



Şekil 2. Çan ve çevresinin jeoloji haritası (Bozcu vd., 2008; Gürdal, 2011).

Figure 2. Geological map of Çan and its surroundings (Bozcu et al., 2008; Gürdal, 2011).

Çan'ın güneybatısında, Bardakçılar jeotermal alanı çevresinde yüzlek veren ve Çetmi melanjını keserek yerleşen plütonik kayalar, Evciler plütünü olarak tanımlanmıştır (Öngen, 1978; Birkle ve Satır, 1995). BGB-DKD uzanımlı plüton, yaklaşık 180 km²'lik bir alanı kapsayan eliptik bir geometri sergilemektedir (Genç, 1998). I-tipi, metalümin ve yüksek potasyumlu kalk-alkali karakterli olan bu kütle, geç Oligosen döneminde kabuğun sığ derinliklerine yerleşmiştir (Özdamar vd., 2021). Litosferik manto kökenli magmalardan türeyen plüton, çevresindeki metamorfik ve volkanik yan kayalar içerisine sokulmuştur (Özdamar, 2018). Bünyesinde çok sayıda aplitik dayk ve damarların yanı sıra, uzamış veya küresel şekilli mafik mikrogranüler enklavlar yaygın olarak gözlenmektedir (Genç, 1998; Özdamar vd., 2021). Mineralojik ve jeokimyasal özelliklerine göre plüton üç ana fasiyese ayrılmaktadır: Çavuşlu

monzodiyoriti, Karaköy granodiyoriti ve Evciler kuvars diyorit-granodiyoriti (Öngen, 1992; Yücel Öztürk vd., 2005). Evciler plütununun yaşı, konvansiyonel K-Ar yöntemiyle $26,4 \pm 0,6$ - $31,1 \pm 1,4$ My (biotit) ve $36,0 \pm 1,4$ My (klorit) (Delaloye ve Bingöl, 2000), biyotit üzerinde yapılan $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analiziyle $24,8 \pm 0,1$ My (Altunkaynak vd., 2012) ve hornblend üzerinde gerçekleştirilen $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analizleriyle $25,45$ - $28,32$ My (Özdamar vd., 2021) olarak belirlenmiştir.

Bölgede geniş alanlarda ve Karalıca jeotermal alanı çevresinde yüzlek veren andezit, dasit, riyodasit bileşimli lav, tuf ve aglomeralardan oluşan Çan volkanitleri (Ercan vd., 1995) kendisinden yaşlı birimleri uyumsuzlukla üzerlemektedir. Gökçeada'daki yüzleklerinden elde edilen andezitik lavlarda K/Ar analizleriyle saptanan $30,4 \pm 0,7$ ve $34,3 \pm 1,2$ My yaşları, volkanizmanın erken evrelerini temsil etmektedir

(Ercan vd., 1995). Genç vd. (2012) ise aynı birime ait andezit örneklerinden $26,5 \pm 1,1$ My K/Ar yaşı elde ederek, volkanizmanın etkinliğinin Geç Oligosen'den Erken Miyosen'e kadar devam ettiğini belirtmiştir.

Çan volkanitleri, dokanak ilişkileri ve litolojik özellikleri dikkate alınarak beş litostratigrafik birime ayrılmıştır. Bu birimler andezit lavlar, andezitik tüfler, trakiandezitik ve dasitik bileşimli lavlar, andezitik-dasitik bileşimli aglomeralar ve bunların alterasyon ürünlerinden oluşmaktadır. Bu volkanitler yaygın olarak hidrotermal alterasyona uğramış olup, kloritleşme, killeşme ve silisleşme şeklinde gelişen bu süreç bölge açısından ekonomik önem de taşımaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Ercan vd. (1995), bölgedeki metalik maden yataklarının büyük ölçüde bu volkanizma ile ilişkili olduğunu, ayrıca tüflerdeki alterasyonun ekonomik kaolin yataklarının gelişimine yol açtığını belirtmiştir.

Oligosen boyunca bölgede etkin olan karasal volkanizmanın zayıflamasıyla birlikte çöküntü alanlarında gölsel ortamlar gelişmiş ve Çan formasyonu bu volkanik kayalar uyumsuz olarak üzerlemiştir (Gürdal, 2011). İlk kez Hezarfen (1976) tarafından tanımlanan birim, konglomera, kumtaşı, kilaşı, linyit ve volkanoklastiklerden oluşan heterojen bir istif sunmaktadır. Ediger (1988), Çan formasyonu linyitleri üzerinde gerçekleştirdiği palinolojik incelemeler sonucunda bu birimin Erken-Orta Miyosen yaşlı olduğunu ortaya koymuştur. Fay denetimli, birbirinden bağımsız ve izole gölsel havzalarda gelişim gösteren birim (Siyako vd., 1989), 60-270 m arasında değişen bir kalınlık sunmakta olup, yanal ve düşey yönde ani kalınlık değişimleri sergilemektedir (Bozcu vd., 2008). Bu durum, havzanın aktif bir tektonik rejim altında geliştiğini ve sedimantasyonun genellikle KD-GB doğrultulu fay sistemleri tarafından kontrol edildiğini göstermektedir (Siyako vd., 1989; Bozcu vd., 2008). Arazi çalışmaları sırasında, Etili'nin güneybatısında yer alan açık kömür ocaklarında

yüzlek veren kilaşları ve tüftler içerisinde yaprak fosillerine rastlanmıştır. Bölgesel ölçekte ekonomik açıdan önem taşıyan bu formasyonun tip kesit yeri, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ) Çan Linyitleri İşletmesi (ÇLİ) sahasında yer almaktadır.

Pliyosen yaşlı Kulfa formasyonu, flüvyal yelpaze çökelleri niteliğinde olup gri ve bej renkli, kötü boyulanmalı konglomera ve kumtaşı araldanmasından oluşmaktadır (Balkış ve Yazıcı, 1996). Bu birim, Çan formasyonunu uyumsuz olarak örtmektedir. Konglomeralar, çoğunlukla bazalt, andezit, dasit ve sileks bileşimli volkanik kayalardan türemiş çakıllar içermektedir.

Kocabaş Çayı ve kolları çevresinde yaygın olarak gözlenen Kuvaterner yaşlı alüvyon tutturulmamış çakıl, kum, kil ve silt boyutundaki malzemelerden oluşmakta ve tüm birimleri uyumsuzlukla örtmektedir.

Tektonik Yapı ve Fay Sistemleri

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kolu, Çanakkale il sınırları içerisinde KD'dan GB'ya doğru sırasıyla Sinekçi, Çan-Biga, Sarıköy, Bekten, Yenice-Gönen, Evciler ve Edremit fayları ile temsil edilmektedir (Kürçer vd., 2019). Bölgedeki ana fay segmentleri genel olarak KD-GB doğrultulu bir uzanım sergilemektedir. Güney Marmara Bölgesi'ndeki en aktif sismotektonik yapılardan biri, sağ yanal doğrultu atımlı Yenice-Gönen fayıdır (Ketin ve Roesli, 1953). Bu fay, 18 Mart 1953 tarihinde $M_s = 7,2$ büyüklüğünde yıkıcı bir deprem üretmiş, 263 kişinin yaşamını yitirmesine neden olmuş ve bu sarsıntıya bağlı olarak yaklaşık 70 km uzunluğunda bir yüzey kırığı gelişmiştir (Ketin ve Roesli, 1953; Kürçer vd., 2019).

Şaroğlu vd. (1987) tarafından tanımlanan Çan-Biga Fay Zonu (ÇBFZ), Çan ve Biga ilçe merkezleri arasında uzanmaktadır (Şekil 1). Sağ yanal doğrultu atımlı bu zon, Kocabaş Çayı

vadisini izlemekte olup, çayın yatak morfolojisi büyük ölçüde bu tektonik yapı tarafından kontrol edilmektedir. Ayrıca bu vadi boyunca fay zonu üzerinde jeotermal kaynakların geliştiği bilinmekte olup, Çan jeotermal alanı da bu tektonik hat üzerinde yer almaktadır (Emre vd., 2012). Emre vd. (2012) tarafından, uzunluğu 40 km'yi aşan doğrultu atımlı faylar büyüklüğü $M \geq 7$ deprem üretme potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Yaklaşık 41 km uzunluğundaki ÇBFZ, bu kriter doğrultusunda yüzey yırtılmasına neden olabilecek yıkıcı büyüklükte deprem üretebilen yapılar arasında yer almaktadır.

Bölgenin tarihsel sismisitesi incelendiğinde, 6 Mart 1737 tarihinde Biga'da $M_s = 7$ büyüklüğünde bir deprem meydana geldiği bilinmektedir (Ambraseys ve Jackson, 2000). Aletsel dönemde ise 5 Temmuz 1983 tarihinde Biga ilçesinde gerçekleşen $M_s = 6,1$ büyüklüğündeki depremde 3 kişi yaşamını yitirmiş ve 85 binada hasar meydana gelmiştir (KRDAE, 2026a). Yakın geçmişte, 3 Mayıs 2018 tarihinde Tepeköy-Çan merkezli $M_w = 4,2$ büyüklüğünde ve yaklaşık 7 km odak derinliğine sahip bir deprem kaydedilmiştir (KRDAE, 2026b).

Arazi çalışmaları sırasında, Çan ve çevresindeki tektonik aktiviteye bağlı olarak kayalar da çok sayıda çatlak ve süreksizlik düzlemi saptanmıştır. Bölgedeki yoğun bitki örtüsü ve yaygın alterasyon zonları, fay sürekliliklerinin arazide doğrudan izlenmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, erozyona karşı dirençli sileks tepeleri ile jeotermal çıkışlar, fay doğrultularının belirlenmesinde başlıca hidrojeolojik ve morfolojik gösterge niteliği taşımaktadır. Çan ve çevresindeki fay zonları, hâkim sağ yanal doğrultu atımlı karaktere ek olarak, uzunlukları 10 km'yi aşmayan normal bileşenli fay parçaları da içermektedir (Emre vd., 2012). Bu yapısal çeşitliliğin, bölgedeki jeotermal sistemlerin dolaşım yollarını ve hidrotermal alterasyon zonlarının dağılımını denetleyen bir unsur olduğu değerlendirilmektedir.

MATERYAL ve METOT

Çan ve yakın çevresinde 2005 yılından bu yana düzenli olarak sürdürülen saha çalışmaları, 2024 yılı Mart ayında jeotermal kaynaklarda ve 2025 yılı Şubat-Haziran ayları arasında maden ocakları ve işletmelerinde gerçekleştirilen teknik incelemelerle güncellenmiş ve kapsamı genişletilmiştir. Ayrıca, araştırma kapsamında 2025 yılı Şubat ayında Çanakkale İl Özel İdaresi ile Çanakkale Sosyal Güvenlik İl Müdürlüğüne resmi yazı ile başvuruda bulunulmuş ve kurum yetkilileriyle görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, Çan ilçesindeki jeotermal ve maden sahalarına ilişkin güncel teknik veriler ile madencilik sektöründe istihdam edilen personele ait güncel veriler temin edilmiş ve çalışmada kullanılmıştır.

Hidrojeokimyasal saha çalışmaları sırasında, Çan ilçesindeki tüm jeotermal kaynakların fizikokimyasal parametreleri (sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik ve tuzluluk) yerinde WTW Multi 340i cihazı ile eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Problemlerin günlük kalibrasyonları, pH için tampon çözeltiler, elektriksel iletkenlik için ise standart iletkenlik çözeltileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jeotermal kaynakların ve maden yataklarının konum ve yükseklik bilgileri ise Garmin GPSMAP 62s el tipi GPS yardımıyla saptanmıştır. Koordinatlar, World Geodetic System 1984 (WGS84) datumunda, Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 35N diliminde verilmiştir.

Hidrojeokimyasal analizler için numune alımı yalnızca Karailıca jeotermal kaynağından yapılmış, diğer sahalara ait veriler literatürden derlenmiştir. Numune almadan önce polietilen kaplar, kaynaktan alınan suyla üç kez çalkalanmış; numuneler ise içlerinde hava payı kalmayacak şekilde 0,45 µm gözenek çaplı membran filtrelerden geçirilerek doldurulmuştur. Majör katyon, minör ve iz element analizleri için 500 ml'lik kaplara alınan numuneler, katyonların

ve iz elementlerin çökmesini ve kap çeperine adsorpsiyonunu önlemek amacıyla nitrik asit (HNO_3) ile $\text{pH} < 2$ olacak şekilde asitlendirilmiştir. Anyon analizleri için 500 ml'lik, Si tayini için ise 50 ml'lik ayrı kaplara asit ilavesi yapılmadan numune alınmıştır. Hazırlanan numuneler etiketlenerek laboratuvar analizleri tamamlanana kadar $+4\text{ }^\circ\text{C}$ 'de saklanmıştır.

Hidrojeokimyasal analizler, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Si ve B konsantrasyonları, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF) kapsamındaki SM 3120 B yöntemi kullanılarak indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) cihazıyla analiz edilmiştir. Bu aşamada katyon ve B analizleri asitlendirilmiş numunelerden, Si tayini ise asitsiz numunelerden yapılmıştır.

As, Fe, Mn ve Li konsantrasyonları, asitlendirilmiş numuneler kullanılarak derişim miktarına bağlı olarak iki farklı yöntemle belirlenmiştir: 0,1 ppm'in altındaki değerler SM 3125 B yöntemiyle indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) cihazında, 0,1 ppm'in üzerindeki değerler ise SM 3120 B yöntemiyle ICP-OES cihazında ölçülmüştür.

Anyon tayinlerinde ise asitsiz numuneler kullanılmıştır. HCO_3^- konsantrasyonu volumetrik analiz yöntemiyle belirlenirken, Cl^- ve SO_4^{2-} konsantrasyonları aynı standart kapsamındaki SM 4110 B yöntemi kullanılarak iyon kromatografisi (IC) cihazıyla analiz edilmiştir.

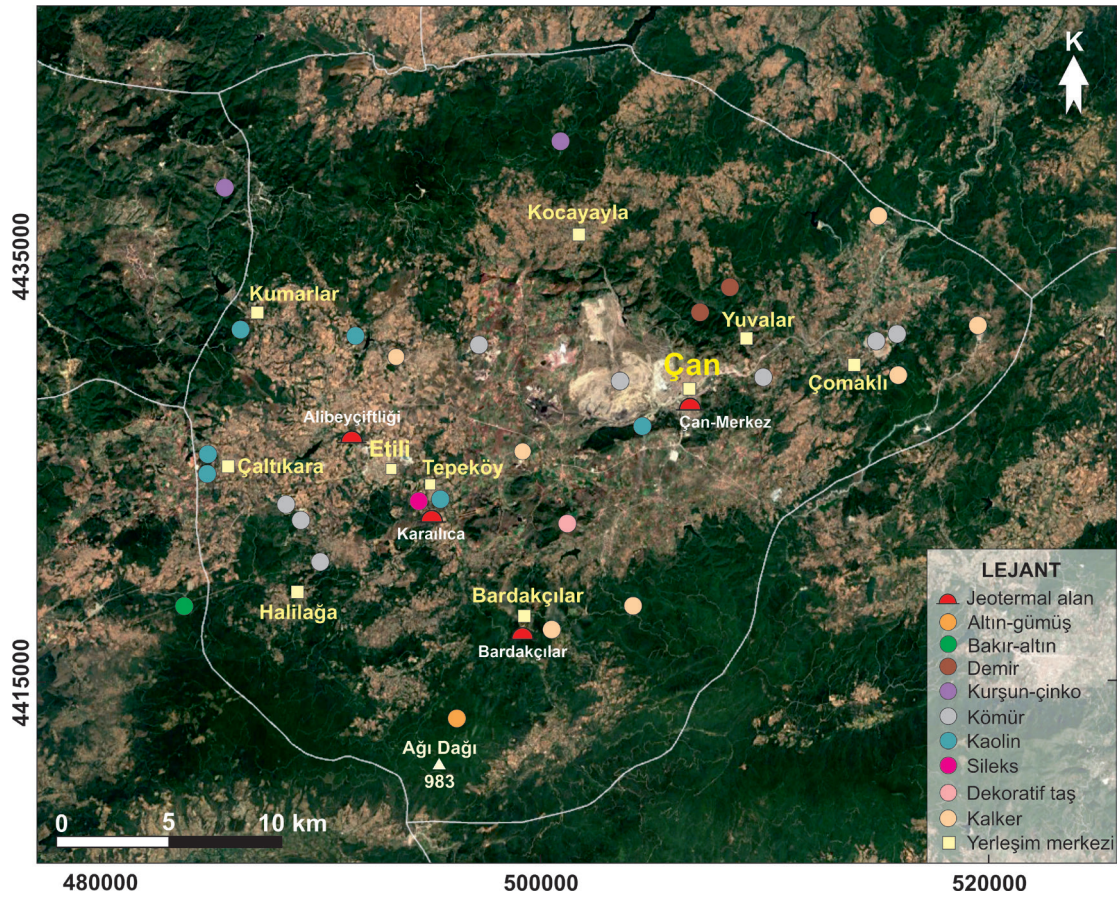
Elde edilen hidrojeokimyasal veriler, literatür verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Jeotermal kaynakların fasiyeslerinin belirlenmesinde ve hidrojeokimyasal süreçlerin yorumlanmasında Piper (1944) ve Schoeller (1962) diyagramlarından yararlanılmıştır.

Jeotermometre hesaplamalarının güvenilirliğini test etmek amacıyla ise Giggenbach (1988) Na-K-Mg üçgen diyagramından yararlanılmıştır. Tüm bu diyagramlar AquaChem yazılımı ile oluşturulmuştur. Farklı kaynaklardan derlenen verilerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla her veri seti için iyonik denge hatası ($\text{CBE} = 100 \times (\Sigma\text{Katyon} - \Sigma\text{Anyon})/(\Sigma\text{Katyon} + \Sigma\text{Anyon})$, meq/l) hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında üretilen haritalar ise ArcGIS yazılımı ile hazırlanmıştır. Şekil 1'de dijital yükseklik modelinden türetilen gölgelendirilmiş rölyef altlığı kullanılmış, bu altlık üzerine MTA diri fay veri tabanından elde edilen fay hatları çizgisel katman olarak işlenmiş, ilçe sınırları ve merkezleri ayrı katmanlar halinde haritaya eklenmiştir. Şekil 3'te ise altlık olarak Google Earth uydu görüntüsünden yararlanılmıştır. Tüm haritalarda koordinat referans sistemi olarak UTM Zone 35N (WGS84) datumu kullanılmış, haritalar kuzey oku, ölçek çubuğu, koordinat karelağı ve lejant eklenerek kartografik standartlara uygun hâle getirilmiştir.

ÇAN ve ÇEVRESİNDEKİ JEOTERMAL KAYNAKLAR

Çan ilçesinde bulunan jeotermal alanlar; Alibeyçiftliği, Bardakçılar, Çan-Merkez ve Karalıda saharıdır (Şekil 3). Atabay ve Körpe (2019), Paleolitik Çağ'da buzullaşma koşullarının hâkim olduğu soğuk iklim evrelerinde, jeotermal kaynakların sağladığı birkaç derecelik sıcaklık farkının yarattığı mikroklimatik etkinin Çan ve çevresini erken insan toplulukları için potansiyel bir sığınak alanı hâline getirmiş olabileceğini ileri sürmüştür. Bu jeotermal mirasın günümüzdeki yansıması, Çan-Merkez, Bardakçılar ve Karalıda jeotermal alanlarında yıl boyu hizmet veren termal tesisler aracılığıyla sürdürülen termal ve sağlık turizmidir.



Şekil 3. Çan ve çevresindeki jeotermal alanların ve maden yataklarının konumu.

Figure 3. Spatial distribution of geothermal fields and mineral deposits in the Çan district and its vicinity.

Jeotermal Kaynakların Fizikokimyasal ve Hidrojeolojik Özellikleri

Çan ilçesindeki jeotermal kaynaklara ait önceki çalışmalardan derlenen veriler, bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerle birlikte değerlendirilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, suların farklı yıllara ait fizikokimyasal karakterizasyonu Çizelge 1’de sunulmuştur.

Alibeyçiftliği jeotermal alanı, deniz seviyesinden 130 m yükseklikte ve Çan ilçe merkezine 14 km uzaklıkta yer almaktadır. Bölgedeki diğer kaynaklara kıyasla sınırlı debiye (0,5-1 l/sn) sahip olan jeotermal akışkan, geleneksel yöntemlerle inşa edilmiş basit havuzlarda toplanmakta, genellikle çevre

köylerdeki yerel halk tarafından kullanılmaktadır. Alanda açılmış herhangi bir sıcak su sondajı ya da tesis bulunmamaktadır. Kaynağın yüzey sıcaklığı 16,3-32 °C aralığında değişmektedir; pH değeri 7,14-7,5, EC değeri 1900-2510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ve tuzluluğu ‰1,2 olarak ölçülmüştür (Çizelge 1). Jeotermal sistemde örtü kaya işlevini sedimanter kayaçlar üstlenirken, hazne kaya volkanik birimlerden oluşmaktadır. Beslenme mekanizması, yüzey sularının kayaç gözenekleri ve süreksizlik düzlemleri boyunca derine süzülmesi, jeotermal gradyanın etkisiyle ısınması ve ardından tektonik aktivitenin oluşturduğu kırık ve çatlak sistemleri boyunca yükselerek yüzeye ulaşmasına dayanmaktadır.

Çizelge 1. Çan ilçesindeki jeotermal kaynakların farklı yıllara ait fizikokimyasal karakterizasyonu.

Table 1. Physicochemical characterization of geothermal resources in the Çan district at different sampling periods.

Jeotermal kaynak	Referans	Koordinat (m)	Yükseklik (m)	Yüzey sıcaklığı (°C)	pH	EC (µS/cm)	Tuzluluk (‰)
Alibeyçiftliği	Sarp vd. (1998)	490326 / 4427035	130	32	7,4	1900	n.a.
	Yalçın (2007)			31,5	7,3	2130	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			16,3	7,5	2460	n.a.
	Karaca vd. (2013)			29,7	7,14	2510	1,2
	Bu çalışma (2024)			31	7,2	2500	1,2
Çan-Merkez	Çağlar (1948)	504410 / 4430391	80	46,5	6,8	n.a.	n.a.
	Kartal (1974)			40	7,7	2900	n.a.
	Sarp vd. (1998)			47	8,1	3300	n.a.
	Yalçın (2007)			48,5	6,9	1577	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			46,1	6,7	3002	n.a.
	Karaca vd. (2013)			43	7,89	2870	1,4
	Bu çalışma (2024)			38,1	6,92	3140	1,4
Karailıca	Çağlar (1948)	493897 / 4424572	120	48,7	6,5	n.a.	n.a.
	Sarp vd. (1998)			50	7,5	2500	n.a.
	Kahraman vd. (2005)			48,4	7	2230	n.a.
	Yalçın (2007)			50,2	6,8	1349	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			49	6,7	2470	n.a.
	Karaca vd. (2013)			47,9	6,84	2500	1,2
	Bu çalışma (2024)			48,4	6,56	2530	1,2
Bardakçılar	Çağlar (1948)	497877 / 4418474	180	65	n.a.	n.a.	n.a.
	Sarp vd. (1998)			59	7,9	1600	n.a.
	Yalçın (2007)			58,9	7,1	951	n.a.
	Baba ve Deniz (2008)			52,9	8,1	1593	n.a.
	Karaca vd. (2013)			58,5	8,08	1708	0,7
	Bülbül vd. (2022)			59	8	1605	n.a.
	Bu çalışma (2024)			58,4	7,85	1630	0,7

n.a.: veri mevcut değil / not available

Kaynak çevresindeki olası fayların yanal sürekliliği sınırlıdır; alana en yakın önemli yapısal unsur, yaklaşık 2 km güneyde yer alan ÇBFZ'dir (Deniz, 2010).

Çan-Merkez jeotermal alanı, deniz seviyesinden 80 m yükseklikte yer almaktadır. Çağlar (1948) tarafından yapılan ölçümlerde Çan-Merkez jeotermal kaynağının sıcaklığı 46,5 °C, debisi ise 1,7 l/sn olarak kaydedilmiştir. 1953 Yenice-Gönen depremi sonrasında kaynağın debisi

tamamen kesilmiş, bir süre sonra yeniden akmaya başlasa da debisinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir (Müller, 1955). Bu durum, büyük depremlerin fay zonları boyunca gelişmiş akışkan dolaşım yollarını yeniden düzenleyerek jeotermal sistemlerin hidrodinamik özelliklerinde, özellikle debide kalıcı değişimlere yol açabileceğine işaret etmektedir. Nitekim 1990 yılında yapılan ölçümlerde kaynağın sıcaklığı 47 °C ile neredeyse sabit kalırken, debisi 0,3 l/sn'ye düşmüş ve 1948

değerine kıyasla yaklaşık 5,7 kat azalmıştır (Öktü vd., 1991).

1991 yılında, kaynağın debisini artırmak amacıyla 300 m (Çan-1) ve 100 m (Çan-2) derinlikli iki sıcak su sondajı açılmıştır (Öktü vd., 1991). Çan-1 sondajında kesilen litolojik birimler sırasıyla; 0-22 m aralığında çakıl-kum-kil ardalı alüvyon, 22-35 m aralığında Neojen yaşlı sedimanter kayaçlar, 35-88 m aralığında volkanik kayaçlar ve 88-300 m aralığında ise epimetamorfik kayaçlardır. Çan-2 sondajında ise benzer bir litolojik sıralama izlenmiş olup, sırasıyla 0-25 m alüvyon, 25-30 m Neojen yaşlı çökeller, 30-73 m volkanitler ve 73-100 m epimetamorfik kayaçlar kesilmiştir. Çan-1 kuyusunda yapılan kompresör testinde akışkan sıcaklığı 43 °C, debisi ise 0,6 l/sn olarak ölçülmüş, doğal kaynağa kıyasla debide iki kat artış sağlanırken sıcaklıkta düşüş gözlenmiştir. Kuyuda pompa kullanılıp kompresör seviyesi daha derine indirildiğinde debinin 1 l/sn'ye yükselebileceği öngörülmüştür. Çan-2 sondajında ise 28-36 °C aralığında değişen sıcaklıkta, ortalama 0,2 l/sn'ye kadar düşen düşük ve süreksiz bir verim elde edilmiştir (Öktü vd., 1991). İki kuyunun benzer litolojik istife sahip olmasına karşın belirgin farklı verim göstermesi, sahadaki volkanik birim içerisindeki ikincil geçirimsizlik ve alterasyon derecesinin kısa mesafelerde dahi değişkenlik gösterebileceğine işaret etmektedir. 2002 yılında açılan 144 m derinlikli ÇB-1 sondajı benzer bir litolojik istif kesmiş ve 48 °C sıcaklığında akışkan üretimine olanak sağlamıştır (Önder, 2002; Deniz, 2010).

Bu sondaj verileri ışığında, Çan ve çevresine düşen meteorik sular ile Kocabaş Çayı'na ait yüzey suları, bölgedeki yüksek birincil geçirimsizliğe sahip alüvyon akiferi beslemekte ve tektonik faaliyetler sonucu ikincil gözeneklilik ve geçirimsizlik kazanmış çatlaklı andezit, riyoit ve aglomera ile metamorfik kayaçlar boyunca derinlere süzülmemektedir. Kuyu loglarında da izlendiği gibi, bu rezervuar kayaçları üzerinde örtü kaya işlevi gören birim Neojen yaşlı, kömür

parçacıklı çakıltı ağırlıklı, az tutturulmuş sedimanter kayaçlardan oluşmaktadır (Öktü vd., 1991; Sarp vd., 1998). Derin dolaşım sürecinde bölgesel jeotermal gradyan etkisiyle ısınan bu akışkan, Kocabaş Çayı yatağını sınırlayan ve yapısal kontrolü sağlayan ÇBFZ boyunca yükselmekte, yukarıda litolojileri verilen ve 100-300 m derinlik aralığında açılmış sondajlarla kesilerek Çan ilçe merkezindeki jeotermal kaynakları oluşturmaktadır (Deniz, 2010).

Bu sistemden beslenen Çan-Merkez jeotermal kaynağında ölçülen sıcaklık değerleri 38,1-48,5 °C arasında değişmekte olup, akışkan 6,7-8,1 pH aralığı ile nötr-hafif alkali karakterdedir. İlçe merkezinde termal otel ve spa merkezi bulunmaktadır. Bu çalışmada ölçülen en düşük sıcaklık değerinin doğrudan termal otel içinden alınmış olması, sondajdan çekilen jeotermal akışkanın iletim hatları boyunca yüzeye taşınırken kısmi bir ısı kaybına uğradığını düşündürmektedir. Elektriksel iletkenlik değerleri 1577-3300 µS/cm ve tuzluluk ise %1,4 olarak ölçülmüştür.

Deniz (2010) tarafından jeotermal alanda incelenen 5 farklı sondajın loglarında, alüvyon kalınlığının 18-44 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Otel içi ölçümden kaynaklanan ısı kaybına ek olarak, bu durum özellikle alüvyonun daha kalın olduğu kesimlerde jeotermal akışkanın sıkı soğuk yer altı sularıyla karışma riskini artırarak ölçülen yüzey sıcaklıklarının düşük kalmasına katkıda bulunabilmektedir. Sahadaki bu hidrojeolojik kısıtlar, kaynağın kullanım alanlarını da sınırlamaktadır; nitekim bölgede planlanan Termal Konutlar projesinde jeotermal enerjiyle ısıtma hedeflenmiş, ancak yetersiz rezervuar sıcaklığı ve debinin sürekliliğine ilişkin belirsizlikler nedeniyle proje uygulama aşamasına geçirilememiştir.

Karailca jeotermal alanı, deniz seviyesinden 120 m yükseklikte, Çan ilçe merkezine yaklaşık 10 km uzaklıkta ve Tepeköy'ün 1 km güneyinde yer almaktadır. Çağlar (1948), Karailca jeotermal

alanında üç kaynak bulunduğunu ve bu kaynakların sıcaklık değerlerinin 39-48,7 °C arasında, toplam debisinin ise 8-10 l/sn olduğunu belirtmiştir. Müller (1955), 1953 Yenice-Gönen depremi sonrasında bu kaynakların debisinin yaklaşık %50 oranında azaldığını ifade etmiştir. Bu durum, Çan-Merkez'de gözlenen debi düşüşüyle birlikte, 1953 depreminin bölgedeki birden fazla jeotermal sistemi eş zamanlı etkilediğine işaret etmektedir.

Günümüzde Tepeköy Muhtarlığı tarafından işletilen termal tesis bünyesindeki üç jeotermal kaynak, sağlık turizmi ve tesisin ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır. Kaynakların kaptajının yapılmış olması nedeniyle net bir debi ölçümü yapılamamakla birlikte, bu değer 1-2 l/sn arasında olduğu tahmin edilmektedir. En yüksek sıcaklıklı kaynak, termal tesis içindeki kadınlar hamamındadır. Kaynağın yüzey sıcaklığı 47,9-50,2 °C, pH değeri 6,5-7,5, EC değeri 1349-2530 µS/cm ve tuzluluk oranı ise %1,2 olarak ölçülmüştür.

Sahanın en önemli rezervuar verisi, 2003 yılında termal tesisin yaklaşık 80 m güneybatısında 450 m derinlikte açılan Eti-1 kuyusundan gelmektedir. Kuyu kendiliğinden akış koşullarında 2,1 l/sn debide 59,2 °C, pompa testinde ise ortalama 8 l/sn debide 61,9 °C sıcaklıkta akışkan üretimi sağlamıştır (Kahraman vd., 2005). Kuyu litolojisi, yüzeyden itibaren sırasıyla 10 m'ye kadar toprak örtü, ardından 100 m'ye kadar altere andezitlerden oluşmaktadır. Bu birimi, 100-110 m derinlikte çatlaklı-kırıklı-altere karakterli bir sileks seviyesi izlemekte, 110 m'den itibaren kuyunun büyük kısmını oluşturan andezit-ignimbirit ardalanması başlamaktadır. Bu istif içinde, 385-410 m derinlik aralığında benzer karakterde ikinci bir sileks seviyesi tekrarlanmakta ve kuyu en altta ignimbiritik birimde (410-450 m) sonlanmaktadır. Theis yöntemiyle belirlenen hidrolik parametreler; transmisivite $3,87 \times 10^{-4}$ m²/sn, hidrolik iletkenlik $1,1 \times 10^{-6}$ m/sn ve depolama katsayısı $2,75 \times 10^{-5}$ olup düşük iletkenlik ve düşük depolama kapasitesiyle karakterize, basınçlı/

örtülü bir rezervuar davranışına işaret etmektedir. Kahraman vd. (2005), düşük hidrolik iletkenliği hem akışkanın geldiği seviyelerdeki ince taneli/killi ara katkılarla hem de bölgesel tektonizmanın ürünü olan ikincil kırık-çatlak geçirgenliğiyle ilişkilendirmiştir. Bu veriler, rezervuar davranışının litolojik ve yapısal etkenlerin birlikte etkisinden kaynaklandığını düşündürmektedir.

Çanakkale İl Özel İdaresi verilerine göre, Eti-1 kuyusunun güneybatısında 350 m derinlikte açılan Eti-2 kuyusunda akışkan sıcaklığı 46 °C ve debisi 0,6 l/sn olarak ölçülmüş, bu değerler Eti-1'e göre belirgin ölçüde düşüktür. Sahadaki bu yanal heterojenlik, Çan-Merkez'deki kuyularda gözlenen örüntüyle paralellik taşıyarak Çan ilçesi genelinde rezervuar verimliliğinin büyük ölçüde lokal yapısal/litolojik kontrole bağlı olduğunu düşündürmektedir. Bu yorumun doğrulanabilmesi için sahada ek jeofizik ve hidrojeolojik çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir.

Karalıda jeotermal sistemindeki ısı kaynağını, Oligosen'den Pliyosen'e kadar duraklamalı biçimde süregelen volkanik etkinlik ile bölgedeki genç plütonik sokulumlar oluşturmaktadır. Rezervuar kayacı oluşturan volkanik kayalar kısmen birincil gözenekliliğe sahip olmakla birlikte, asıl geçirimsizlik kazanımı bölgesel tektonizmanın ürünü olan ikincil çatlak sistemleri aracılığıyla gerçekleşmiştir. Örtü kaya işlevini üstlenen tüf ve lav seviyeleri sınırlı kalınlıkta olsa da jeotermal akışkanın kırık ve çatlaklarda mineral çökeltmesi, sistemin kendi örtüsünü kendiliğinden oluşturmaya yol açmıştır (Kahraman vd., 2005). Sahanın yapısal kontrolü incelendiğinde, Tepeköy güneyinde yaklaşık K45°D doğrultulu, 1 km atımlı, sağ yanal oblik bir fay bulunmaktadır. Karalıda jeotermal kaynakları ise bu ana faya dar açıyla yaklaşan, benzer nitelikte ancak nispeten daha genç ikincil bir fayın kontrolünde yüzeye ulaşmaktadır (Sarp vd., 1998).

Bardakçılar jeotermal alanı, deniz seviyesinden 180 m yükseklikte ve Bardakçılar köyünün 2 km güneybatısında konumlanmaktadır.

Jeotermal alanda toplam debisi 2-4 l/sn arasında üç kaynak bulunmaktadır. En yüksek sıcaklık değeri Çağlar (1948) tarafından 65 °C olarak ölçülmüştür. Jeotermal alandaki en yüksek sıcaklıklı kaynağın 1998 ile 2024 yılları arasındaki yüzey sıcaklığı 52,9-59 °C, pH değeri 7,1-8,1, EC değeri 951-1708 µS/cm ve tuzluluğu ‰0,7' dir.

2010 yılında Bardakçılar'daki termal tesisin güneyinde 750 m derinlikte açılan sondajda 67 °C sıcaklık ve 95 l/sn kompresör debisine sahip jeotermal akışkan elde edilmiştir (Bülbül vd., 2022). Bülbül vd. (2022), işletmeye geçilmeden önce kuyunun uzun süreli üretimde tutularak kuyu testlerinin tamamlanmasını önermekte olup, bu durum 95 l/sn'lik kompresör debisinin sürdürülebilir üretim kapasitesini değil, kuyu geliştirme aşamasındaki bir ön test sonucunu yansıttığını göstermektedir. Söz konusu kuyunun litolojisinde 0-5 m alüvyon, 5-62 m andezit, aglomera ve tüften oluşan volkanosedimanter birimler (dissemine kristalize pirit, kısmen kloritleşmiş biyotit, FeO boyamaları), 62-100 m gri-bej renkli, silisifiye, bol pirit saçınımlı rekristalize kireçtaşları, 100-750 m ise grimsi, siyah ve yeşil renkli, kuvars, feldispat ve dissemine pirit içeren, piroksen ve biyotitleri kısmen kloritleşmiş, ayrıca FeO etkisi, killeşme, kaolinleşme ve limonitleşme gösteren granodiyoritler izlenmektedir. Bu kuyu, Çan'daki jeotermal sahalar arasında en derin sondaj olup taşıdığı litolojik istif bölgenin düşey jeolojik yapısı açısından önemli veriler sunmaktadır.

Bülbül vd. (2022) bölgedeki en önemli aktif yapısal unsurlardan birinin Yenice-Gönen fayı ile ÇBFZ arasında KD-GB gidişli olarak uzanan, toplam 66 km uzunluğunda, yaklaşık K60°D doğrultulu, sağ yanal doğrultu atımlı Sarıköy fayı olduğunu belirtmiştir. Bu fay, Bardakçılar jeotermal alanına kadar uzanmaktadır. Sarıköy fayı, granodiyoritik birimde gelişen kırık-çatlak sistemleri aracılığıyla akışkan dolaşımını sağlayan akım yolu işlevi üstlenmekte, bu yapısal kontrol

sayesinde granodiyoritik birim, yaklaşık 650 m kalınlığıyla, sahadaki jeotermal sistemin rezervuar kayacı işlevini görmektedir. Ayrıca aynı çalışmada, bölgesel jeolojik evrime dayanan kavramsal bir model çerçevesinde, sistemin ısı kaynağını da bu granitik sokulumların oluşturabileceği değerlendirilmiştir.

Jeotermal Kaynakların Hidrojeokimyasal Özellikleri

Jeotermal akışkanların kimyasal bileşimi temel olarak su-kayaç etkileşimi süreçleri, yer altı akış yolları ve akışkanın rezervuar içerisindeki kalış süresi tarafından kontrol edilmektedir. Karışma ve soğuma süreçleri de akışkanın nihai bileşiminde rol oynamaktadır. Bu etkileşime bağlı reaksiyon hızı sıcaklığın bir fonksiyonu olup, ortam sıcaklığındaki her 10 °C'lik artış reaksiyon hızını 2-3 kat yükseltmektedir (Eroğlu ve Aksoy, 2003).

Bu süreçlerin Çan ilçesindeki yansımaları, kaynakların kimyasal ve çevresel izotop analiz sonuçlarında izlenebilmektedir (Çizelge 2). Bölgedeki kaynaklar, anyon-kasyon dengeleri ile iz ve minör element dağılımları bakımından belirgin farklılıklar sergilemekte olup gözlenen bu farklılıklar akışkanların rezervuar sıcaklığı, kayaçla etkileşim düzeyi ve beslenme-dolaşım özellikleri hakkında bir hidrojeokimyasal çerçeve sunmaktadır. Jeotermal kaynaklarda hesaplanan CBE değerleri genel olarak kabul edilebilir sınırlar içinde kalmakla birlikte, Çan-Merkez sahasına ait Baba ve Deniz (2008) veri seti diğerlerine kıyasla belirgin biçimde yüksek bir hata oranı (%21,5) vermiştir. Bu durum büyük ölçüde, söz konusu veri setindeki SO_4^{2-} değerinin (721 mg/l), aynı sahaya ait diğer iki bağımsız veri setine (Yalçın, 2007: 1188 mg/l; Karaca vd., 2013: 1170 mg/l) kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ilgili veri seti yorumlamalarda diğer iki bağımsız veri setiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Çan ilçesi jeotermal kaynaklarının farklı yıllara ait kimyasal ve çevresel izotop analiz sonuçları.

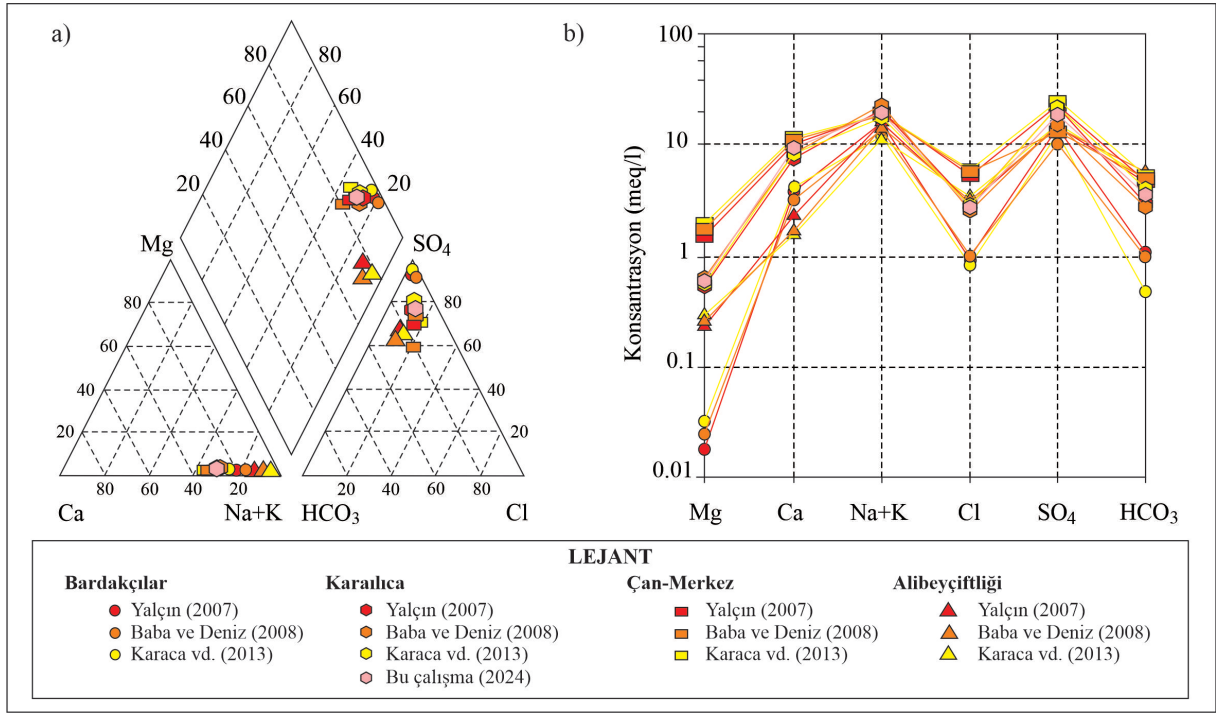
Table 2. Chemical and environmental isotope analysis results of the geothermal resources in the Çan district at different sampling periods.

Parametre	Alibeyçiftliği			Çan-Merkez			Karanlıca				Bardakçılar		
	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)	Bu çalışma (2024)	Yalçın (2007)	Baba ve Deniz (2008)	Karaca vd. (2013)
Na ⁺ (mg/l)	398	506,6	516,7	557	575,9	520	455	476,6	416,8	471,2	310	287,1	285,2
K ⁺ (mg/l)	33,3	13,32	13,43	21	27,01	35	16,9	23,23	20,41	21,7	6,7	7,2	6,94
Mg ⁺² (mg/l)	2,5	3,08	3,33	17,9	23,3	22	5,9	7,23	5,93	5,8	0,2	0,27	0,34
Ca ⁺² (mg/l)	43	30,5	30,17	194	238,2	217,2	148	175,1	148,9	159	75,8	83,5	87,1
Cl ⁻ (mg/l)	100	91	86	180	203	200	100	87	89	95,8	31	29	29
SO ₄ ⁻² (mg/l)	709	702	820	1188	721	1170	1037	1056	1020	1020	745	620	750
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	256	364,5	258	268	293,7	220	183	162	180	210	61	60,8	26,67
SiO ₂ (mg/l)	18,4	24,49	24,02	33	38,27	n.d.	49,6	58,32	50,14	55,83	54,5	70,01	71,66
F ⁻ (mg/l)	7,2	n.a.	n.a.	4,7	n.a.	n.a.	6,9	n.a.	n.a.	n.a.	5,9	n.a.	n.a.
As (µg/l)	n.d.	251,8	246,5	50	101,6	n.d.	100	55,7	91,8	100	n.d.	n.d.	n.d.
B (µg/l)	4100	2029	2414	3900	4050	4947	1600	1991	1877	2200	360	407	465
Fe (µg/l)	n.d.	102	20	710	2090	n.d.	350	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Li (µg/l)	700	607,2	709,2	1070	1146,8	1138	950	1082	1123	1000	120	128,2	142,8
Mn (µg/l)	n.d.	134,99	150,1	1,7	499,81	70	550	781,52	599,1	600	2,6	17,43	32,68
Sr (µg/l)	n.a.	666,76	694,1	n.a.	4360	3604	n.a.	3020	2780	n.d.	n.a.	1588	1665
δ ¹⁸ O (‰)	n.a.	-8,78	-8,91	-7,26	-7,49	-7,35	-8,8	-9,02	-9,06	n.a.	-9,16	-9,54	-9,61
δ ² H (‰)	n.a.	-58,35	-58,33	-59,55	-56,11	-57,3	-59,1	-60,63	-59,4	n.a.	-60,85	-59,93	-59,54
³ H (TU)	n.a.	0,43	n.a.	3,5	1,01	n.a.	0,55	0,31	n.a.	n.a.	0,05	0,22	n.a.
CBE (%)	2,98	2,11	1,81	2,45	21,49	3,66	1,23	6,17	0,24	3,66	0,2	6,77	0,26

n.d.: tespit sınırının altında / below detection limit, n.a.: veri mevcut değil / not available, CBE: iyonik denge hatası (%)

Bu çalışmada jeotermal akışkanın sınıflandırılması Uluslararası Hidrojeologlar Birliği (IAH, 1979) ilkelerine göre yapılmış, majör iyon konsantrasyonları ise Piper (1944) ve Schoeller (1962) diyagramlarında değerlendirilerek Şekil 4a ve b'de sunulmuştur. Alibeyçiftliği jeotermal kaynağı Na-SO₄ fasiyesinde yer alırken; Bardakçılar düşük, Karanlıca ve Çan-Merkez ise

belirgin Ca katkısıyla Na-Ca-SO₄ hidrokimyasal fasiyesinde yer almaktadır. Tüm jeotermal kaynaklarda benzer katyon dizilimi (Na⁺+K⁺ > Ca⁺² > Mg⁺²) ve anyon dizilimi (SO₄⁻² > HCO₃⁻ > Cl⁻) gözlenmekte olup, bu durum kaynakların sülfat baskın bir hidrojeokimyasal fasiyese ait olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Jeotermal kaynakların a) Piper ve b) yarı logaritmik Schoeller diyagramlarında gösterimi.

Figure 4. Geothermal resources plotted on a) Piper and b) semi-logarithmic Schoeller diagrams.

Bununla birlikte, sahalar arasında gözlenen Ca^{+2} katkı derecesindeki farklılık, sahaya özgü su-kayaç etkileşim süreçlerinin de etkili olduğuna işaret etmektedir. En yüksek Na^+ , Ca^{+2} ve SO_4^{-2} konsantrasyonları Çan-Merkez jeotermal kaynağında tespit edilmiştir.

Yüksek Na^+ konsantrasyonu, volkanik kayalar içerisindeki feldispat minerallerinin hidrolizi ile ilişkilidir (Yalçın, 2007). Nitekim Deniz (2010) tarafından jeotermal alanların çevresindeki alterasyon zonlarında saptanan kaolinit (Karalıca'da) ile illit ve haloysit (Bardakçılar'da), bu yoğun feldispat bozunmasının sahaya özgü mineralojik göstergeleridir. Sülfatça zengin akışkanların kökeni ise Çan'ın batısında asit-sülfat koşullarında gelişmiş hidrotermal alterasyon zonlarında bulunan piritin oksidasyonu ile ilişkilendirilmiştir (Yılmaz, 2003; Yalçın, 2007). Alibeyçiftliği'nde saptanan jarosit minerali (Deniz, 2010), asidik ortamlarda pirit

oksidasyonu ile oluşan ikincil bir sülfat fazı olarak bu sürece işaret eden bir göstergedir.

Jeotermal akışkanlardaki Mg^{+2} derişimleri, akışkanın jeotermal olgunluk derecesini ve rezervuar mineralleriyle ulaştığı termodinamik denge durumunu yansıtan parametrelerden biridir. Düşük sıcaklıklı sularda önemli bir katyon olmasına karşın Mg^{+2} , yüksek sıcaklıklı ve nötr-alkali pH koşullarına sahip jeotermal sistemlerde ikincil alterasyon minerallerinin yapısına katılarak çökelmekte ve bu yolla akışkan fazındaki konsantrasyonu azalmaktadır (Guo vd., 2019). Bu kuramsal temel ışığında Bardakçılar'ın, en düşük Mg^{+2} (0,20-0,34 mg/l), en yüksek yüzey sıcaklığı (59 °C) ve en yüksek SiO_2 (54,5-71,66 mg/l) içeriğiyle bölgedeki diğer jeotermal sistemlere kıyasla daha derin dolaşımli bir sistemi temsil edebileceğine işaret etmektedir. Bu jeotermal alanda yüzlek veren hidrotermal alterasyona uğramış kayalarda klorit varlığının tespit edilmiş

olması (Deniz, 2010), bu yorumla mineralojik olarak da örtüşmektedir.

Jeotermal akışkanlarda belirlenen arsenik (As), mangan (Mn), demir (Fe), florür (F⁻) ve bor (B) konsantrasyonları, çevresel yönetim ve halk sağlığı açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bileşenlerdir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2022) tarafından içme suları için önerilen As sınır değeri 10 µg/l'dir. Türkiye'de yürürlükte olan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY, 2016) kapsamında ise As, Mn, F⁻, Fe ve B için belirlenen sınır değerler sırasıyla 10 µg/l, 50 µg/l, 1500 µg/l, 200 µg/l ve 1000 µg/l'dir. Çizelge 2'deki veriler bu sınır değerlerle karşılaştırıldığında, As, Mn ve B içeriğinin Bardakçılar dışındaki üç sahada, F⁻ içeriğinin ise tüm dört sahada, Fe içeriğinin de Çan-Merkez ve Karalıda ilgili limitleri belirgin biçimde aştığı görülmektedir. Bu nedenle jeotermal akışkanların doğrudan içme suyu amacıyla kullanımı uygun değildir. Ekosistemlerin korunması amacıyla deşarj öncesinde ileri arıtma teknolojilerinin uygulanması ve bölgesel ölçekte periyodik izleme çalışmalarının yürütülmesi önerilmektedir.

Jeotermal akışkanlardaki yüksek çözünmüş element içeriği, su kalitesi açısından bir çevresel yönetim sorunu oluştursa da kaynak yönetimi perspektifinden ele alındığında bir geri kazanım fırsatına dönüşebilmektedir. Bu konsantrasyonların temelinde yatan derin dolaşım su-kayaç etkileşimi tektonik ve magmatik aktivitenin sağladığı ısı kaynağıyla desteklenen bir süreç olarak akışkan fazına Li, B ve Sr gibi kritik elementleri taşımaktadır. Yüzey ve sığ yer altı sularının çok üzerindeki bu konsantrasyonlar, kontrolsüz deşarj hâlinde alıcı ortamların jeokimyasını değiştiren bir ekolojik risk taşıırken, aynı zamanda akışkanları kritik hammaddeler için sürdürülebilir bir kaynak olarak konumlandırmaktadır (Inzillo vd., 2026).

Karalıda ve Çan-Merkez jeotermal akışkanlarında ölçülen Li konsantrasyonları (1,12 ve 1,15 mg/l), uzun süreli su-kayaç etkileşimi yoluyla Li zenginleşmesinin gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu değerler hem dünya çapında yüksek Li içerikli jeotermal sahaların hem de Avrupa'nın görece sınırlı zenginleşme gösteren jeotermal sahalarının altında kalmaktadır. Salton Sea (200-300 mg/l; Zhang vd., 2025), Tibet'teki temsili yüksek düzeyde zenginleşmiş kaynaklar (Moluojiang, Semi, Zhumoshu ve Riruo; >35 mg/l; Zhang vd., 2025) ve Çin ulusal standardındaki endüstriyel tenör eşiği (50 mg/l; Wang vd., 2025) ile kıyaslandığında Çan verileri oldukça düşük düzeyde bulunmaktadır. Inzillo vd. (2026) tarafından derlenen Avrupa ölçeğindeki veri setiyle karşılaştırıldığında da aynı tablo geçerlidir. Çan-Merkez'deki Li konsantrasyonu, düşük-orta entalpili Avrupa jeotermal sahalarının en düşük uçtaki değerlerinin (Luigiane 1,4 mg/l; Font Mina 3,2 mg/l; Baden 4,8 mg/l) altında yer almakta, ticari ölçekte marjinal kabul edilen South Crofty maden suyundan (125 mg/l) yaklaşık 100 kat daha düşüktür. Benzer sonuçlar B ve Sr için de geçerlidir: Çan-Merkez'deki B derişimi (3,9-4,9 mg/l), düşük entalpili sistemler için bildirilen tipik aralığın (5-40 mg/l; örn. South Crofty 11 mg/l) altında kalırken, Sr içeriği (3,6-4,4 mg/l) South Crofty'nin (40 mg/l) ve yüksek entalpili (T > 150 °C) sahalarındaki (Rittershoffen 498 mg/l, Mofete 1310 mg/l) değerlerin çok altında kalmaktadır. Bu durum, Çan'daki jeotermal akışkanların doğrudan ekonomik element kazanımı için yeterli olmaktan ziyade, bölgesel su-kayaç etkileşim süreçlerinin bir göstergesi olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Nitekim düşük tenörlü sahalarda dahi çıkarımın önündeki engel yalnızca konsantrasyon düzeyi değil, teknolojik olgunluk düzeyidir. Biga Yarımadası'ndaki Tuzla jeotermal alanında (Li: 20-25 mg/l) gerçekleştirilen pilot ölçekli saha çalışmaları, spinel-tip λ-MnO₂ sorbenti kullanılarak jeotermal akışkanlardan

adsorpsiyon yoluyla Li eldesinin teknik olarak mümkün olduğunu göstermiştir. Tek geçişli saha geri kazanım oranının %1,3 olması ve yaklaşık %93'lük ürün saflığının batarya kalitesi standartlarının ($\geq$ %99,5) altında kalması, sürecin endüstriyel boyuttan ziyade henüz kavram-kanıtı aşamasında olduğuna işaret etmiştir (Toprak ve Demir, 2026). Tuzla'daki Li konsantrasyonunun Çan-Merkez'dekinden yaklaşık 20 kat daha yüksek olmasına karşın elde edilen geri kazanım verimliliğinin bu denli sınırlı kalması, benzer adsorpsiyon temelli yaklaşımların çok daha düşük derişimli akışkanlar için ancak ileri teknolojik gelişmelerle birlikte anlamlı hale gelebileceğini düşündürmektedir.

Doygunluk İndeksi ve Jeotermometre Uygulamaları

Çan ilçesi jeotermal kaynaklarının rezervuar koşullarının değerlendirilmesinde, akışkanların mineral fazlarına göre doymunluk durumları ve farklı jeotermometre yöntemleriyle elde edilen rezervuar sıcaklıkları birlikte ele alınmıştır. Kimyasal analiz sonuçlarından elde edilen doymunluk indeksi (SI) verileri, tüm kaynakların albit ve kuvars minerallerine göre doymunluk üstü olduğunu göstermektedir (Yalçın, 2007; Deniz, 2010). Deniz (2010), mikroklinin tüm kaynaklarda, adulya ve kalsedonun ise çoğunlukla aynı eğilimi sergilediğini, amorf silisin ise doymunluk altı değerlerde seyrettiğini saptamıştır. Aynı çalışmada elde edilen Alibeyçiftliği, Karalıda ve Bardakçılar sahalarındaki belirgin şekilde yüksek albit (1,35-5,02) ve mikroklin (2,3-6,24) SI değerleri, bu sahalarda feldispat-su etkileşiminin gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Sahalar arasındaki en belirgin fark kalsit doymunluğunda gözlenmektedir. Yalçın (2007)'a göre Çan-Merkez kaynağı hem dolomit hem de kalsite göre doymunluk üstüdür. Karalıda dengeye yakın veya hafif doymunluk altı bir karakter sergilerken (Deniz, 2010), Alibeyçiftliği'nde kalsit ve dolomit doymunluk altı değerlerdedir

(Yalçın, 2007). Bardakçılar ise en yüksek kalsit SI değerlerine sahip alan olarak öne çıkmaktadır (Deniz, 2010). Bu sonuç, söz konusu sahada 62-100 m aralığında kesilen rekristalize kireçtaşı seviyesinin (Bülbül vd., 2022) varlığıyla uyumludur. Bu bulgu, karbonat fazlarının akışkanın kimyasal evrimine katkı sağlamış olabileceğine işaret etmekte; bölgesel su-kayaç etkileşiminin de tutarlı bir tablo çizdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sahadaki kabuklaşma riskinin düzeyi yalnızca mineral doymunluk durumuna değil; akışkanın üretim debisi, sıcaklık düşüş hızı ve artezyen çıkışların sondaj üretimine dönüştürülme biçimine de bağlıdır.

Kimyasal jeotermometreler, sıcaklığa bağlı su-mineral dengesini temel alarak rezervuar denge sıcaklığının tahmin edilmesine olanak tanır (Nicholson, 1993; Chenaker vd., 2018). Çalışma kapsamında rezervuar sıcaklıklarının tahmininde silika (kuvars ve kalsedon) ve katyon (Na/K, Na-K-Ca ve Na/Li) çözünürlüklerine dayalı ampirik jeotermometre eşitlikleri kullanılmıştır (Çizelge 3).

Düşük sıcaklık ve yüksek kalsiyum derişimine sahip jeotermal akışkanlarda Na/K jeotermometreleri, gerçek rezervuar sıcaklığından daha yüksek değerler verme eğilimindedir. Na/K jeotermometreleri 180-350 °C aralığında güvenilir sonuçlar vermekte olup (Ellis, 1979), 120 °C'nin altındaki sıcaklıklarda Na/K oranı yalnızca feldispat dengesi tarafından değil, kil minerallerinin oluşumu gibi süreçler tarafından da etkilenmekte, bu da güvenilirliğini azaltmaktadır (Nicholson, 1993). Na-K-Ca jeotermometresi ise akışkandaki CO₂ derişiminden etkilenmekte olup (Giggenbach, 1988), suyun Ca⁺² derişimini etkileyen süreçlere karşı hassastır. Özellikle akışkan yüzeye çıkarken CO₂ kaybetmesi, kalsitin çökmesine ve Ca⁺² derişiminin azalmasına yol açarak hesaplanan sıcaklığın gerçek rezervuar sıcaklığından sapmasına neden olabilir; benzer bir etki sığ sulardan karışım yoluyla da ortaya çıkabilir.

Çizelge 3. Çan ilçesi jeotermal kaynaklarının çeşitli jeotermometre yöntemleriyle hesaplanan rezervuar sıcaklıkları.

Table 3. Reservoir temperatures of the geothermal resources in the Çan district calculated using various geothermometer methods.

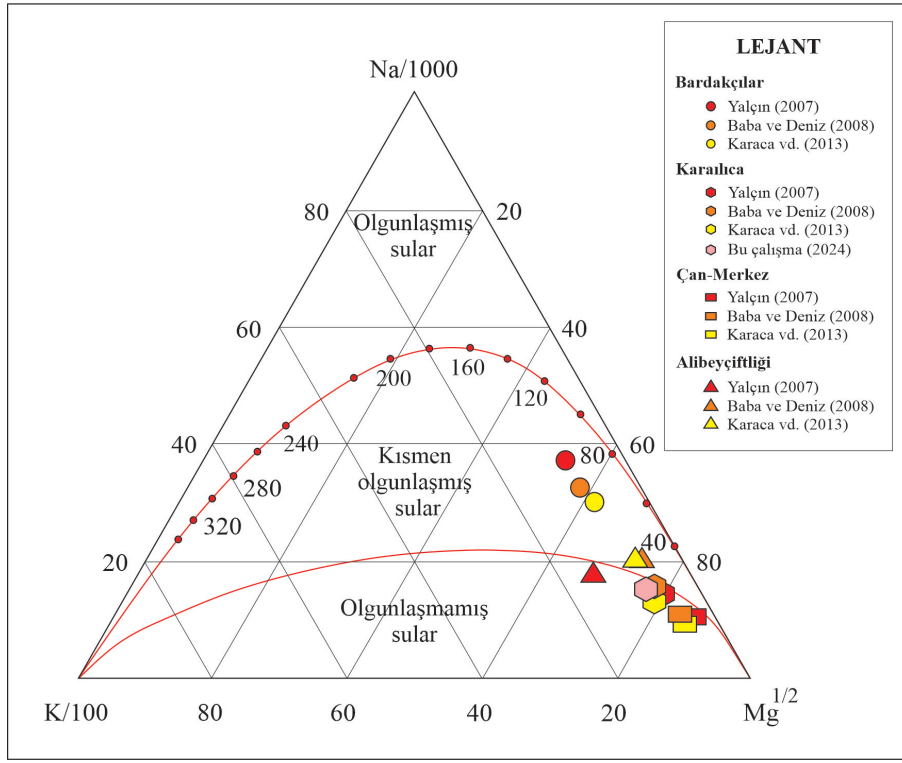
Jeotermal kaynak	Referans	Yüzey sıcaklığı (°C)	Jeotermometre hesaplaması (°C)						
			Kalsedon	Kuvars(a)	Kuvars(b)	Na/K(a)	Na/K(b)	Na-K-Ca	Na/Li
Alibeyçiftliği	Yalçın (2007)	31,5	28	60	66	202	169	168	177
	Baba ve Deniz (2008)	16,3	39	71	76	124	78	139	157
	Karaca vd. (2013)	29,7	39	70	75	124	77	140	163
Çan-Merkez	Yalçın (2007)	48,5	52	83	87	146	102	108	182
	Baba ve Deniz (2008)	46,1	59	90	92	160	118	113	184
	Karaca vd. (2013)	43	n.a.	n.a.	n.a.	185	149	124	189
Karalıca	Yalçın (2007)	50,2	71	101	102	145	101	104	186
	Baba ve Deniz (2008)	49	80	109	109	162	121	112	191
	Karaca vd. (2013)	47,9	72	102	103	163	122	110	202
	Bu çalışma (2024)	48,4	77	107	107	158	117	112	187
Bardakçılar	Yalçın (2007)	58,9	76	106	106	113	66	82	106
	Baba ve Deniz (2008)	52,9	90	118	117	122	75	82	112
	Karaca vd. (2013)	58,5	91	119	118	120	73	80	116

n.a.: veri mevcut değil / not available. Kalsedon (Fournier, 1977); Kuvars(a) - buhar kaybı yok / iletkenlik yoluyla soğuma (Fournier, 1977); Kuvars(b) - maksimum buhar kaybı / adiyabatik soğuma (Fournier, 1977); Na/K(a) (Fournier, 1979); Na/K(b) (Truesdell, 1976); Na-K-Ca (Fournier ve Truesdell, 1973, $\beta=4/3$); Na/Li (Fouillac ve Michard, 1981).

Bu jeotermometre 200 °C üzerindeki rezervuar sıcaklıklarında daha güvenilir sonuçlar vermektedir (Li vd., 2020). Na/Li jeotermometresinin geçerliliği belirli bir sıcaklık aralığından ziyade akışkanın tuzluluğuna (Cl^- derişimine) bağlıdır (Fouillac ve Michard, 1981); çalışma alanındaki tüm kaynaklar Cl^- derişimi bakımından seyreltik su ($\text{Cl}^- < 0,3$ mol/L) kategorisinde yer almaktadır. Ayrıca Na-Li iyon değişim dengesinin kurulabilmesi için akışkanın önceden Na-K dengesine ulaşmış olması gerektiği belirtilmiş olup (Li vd., 2021), bu durum Na/Li jeotermometre sonuçlarının temkinli değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Jeotermal kaynakların kökeni, dengeye ulaşmış olmalarının kontrolü ve uygun jeotermometre seçiminde ise Na-K-Mg üçgen diyagramından (Giggenbach, 1988) yararlanılmaktadır. Diyagramda, Bardakçılar kaynağına ait örnekler kısmen olgunlaşmış sular bölgesinde, Karalıca, Çan-Merkez ve Alibeyçiftliği kaynaklarına ait

örnekler ise olgunlaşmamış sular bölgesinde yer almakta olup, bu bölgede düzensiz dağılım gösteren suların anlamlı rezervuar sıcaklığı sonuçları vermediği bilinmektedir (Li vd., 2021; Stober ve Bucher, 2021) (Şekil 5). Katyon jeotermometresi sonuçları olgunlaşmamış sular grubunu oluşturan sahalar da yüzey sıcaklıklarından belirgin şekilde yüksek değerler üretmektedir. Bölgedeki sistemlerin görece düşük sıcaklıklı olması nedeniyle, akışkanın kayalarla tam dengeye ulaşmadan yüzeye ulaşması, düşük sıcaklıklarda Na/K oranının kil mineral etkileşimi gibi süreçlerden etkilenmesi (Nicholson, 1993) ve/veya yüzeye çıkış sırasındaki CO_2 kaybına bağlı kalsit çökelişi (Giggenbach, 1988), katyon jeotermometrelerinin gerçek rezervuar sıcaklığından yüksek sonuçlar vermesinin başlıca nedenleri arasında değerlendirilebilir. En düşük yüzey sıcaklığına sahip Alibeyçiftliği kaynağı, Na/K ve Na-K-Ca jeotermometrelerinde en yüksek değerleri sergilemektedir.



Şekil 5. Jeotermal kaynakların Na-K-Mg üçgen diyagramındaki (Giggenbach, 1988) konumu.

Figure 5. Distribution of the geothermal resources on the Na-K-Mg ternary diagram of Giggenbach (1988).

Bulgular, söz konusu üç sahada sistemin termodinamik dengeye ulaşmadığı sonucunu desteklemekte ve bu sahalarda katyon jeotermometreleri kullanımının güvenilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu sınırlılık tek bir mekanizmaya indirgenemez; örneğin Alibeyçiftliği'ndeki katyon jeotermometrelerindeki sıcaklık farklılıkları, olgunlaşmamış su karakterinin yanı sıra sahanın sınırlı debisi (0,5-1 l/sn), olası sığ su karışımı ve/veya iletim hatları boyunca yaşanabilecek kondüktif soğuma gibi süreçlerin bir arada etkisini yansıtır olabilir.

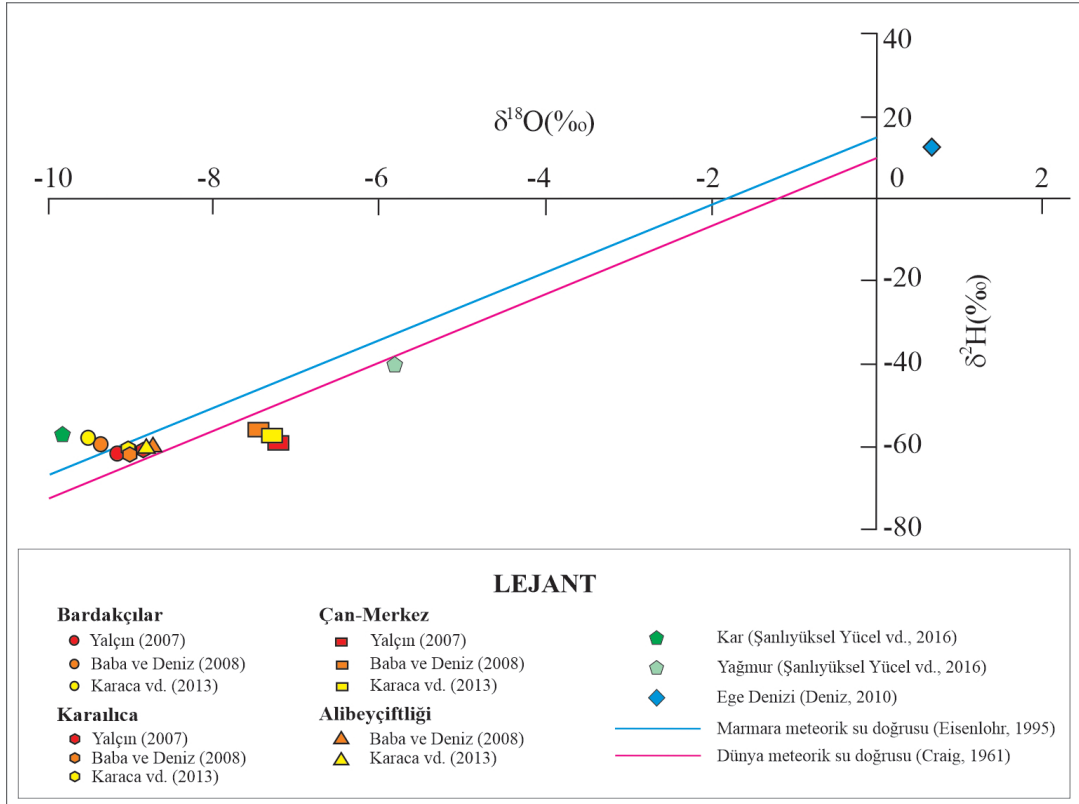
Buna karşın, silika jeotermometreleri tek bir mineralin sıcaklığa bağlı çözünürlüğünü esas aldığından, çok bileşenli katyon iyon değişim reaksiyonlarına kıyasla rezervuar kayacın karmaşık mineral bileşiminden ve iyon değişim dengesizliklerinden daha az etkilenmekte,

örnekleme ve analizinin görece kolay olması nedeniyle de jeotermal araştırmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Doğdu, 2004). Bu sahalarda için de silika jeotermometreleri, katyon jeotermometrelerine kıyasla mevcut veriler çerçevesinde daha tutarlı tahminler sunmaktadır.

Kuars çözünürlüğüne dayalı jeotermometrelerin, yüksek sıcaklıklarda buhar kaybına bağlı düzeltmelerin belirginleşmesi nedeniyle özellikle ~250 °C'nin altındaki sistemlerde güvenilir sonuçlar verdiği vurgulanmaktadır (Fournier, 1977; Verma, 2000); ancak bu genel geçerlilik aralığı içinde dahi, silis çözünürlüğünü kontrol eden fazın sıcaklığa bağlı olarak değiştiği, 180 °C'nin üzerinde kuvarsın (Fournier, 1991), 140 °C'nin altında ise kalsedonun (Eroğlu ve Aksoy, 2003) baskın kontrolcü faz olduğu bilinmektedir. Nitekim çok bileşenli jeotermometre çalışmaları

da kuvars jeotermometresinin buhar kaybı düzeltilmesi yapılmadığında ve akışkanın yüzeye çıkışı sırasında sıg, seyreltik sularla karıştığında rezervuar sıcaklığını belirgin şekilde düşük tahmin edebildiğini göstermektedir (Peiffer vd., 2014). Bu durum, silis jeotermometrelerinin de kaynama veya ikincil çökeltim gibi süreçlerden tamamen bağımsız olmadığı anlamına gelmektedir; akışkanın yüzeye doğru yükselmesi sırasında çözünme-çökeltme veya yeniden dengelenme süreçleri de silis konsantrasyonunu etkileyebilmekte (Verma, 2000), ayrıca yaşanabilecek iletken veya adyabatik soğuma silisin çökeltmesine yol açabilmektedir (Fournier, 1989). Düşük-orta sıcaklıklı sistemlerde kalsedon jeotermometresinin rezervuar sıcaklığını daha uygun değerler vermesi beklenmektedir; çalışma alanındaki tüm sahalara için kalsedon jeotermometresi sonuçları esas alınmıştır.

Kuyu içi sıcaklık ölçümlerinin mevcut olduğu Çan-Merkez (48 °C, 144 m), Karalıda (61,9 °C, 450 m) ve Bardakçılar (67 °C, 750 m) sahalalarında, kalsedon sonuçları (sırasıyla 52-59 °C, 71-80 °C ve 76-91 °C) ölçülen kuyu içi sıcaklıklardan daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, rezervuarın kuyu tabanı derinliğinin ötesinde devam ettiğine ve derin sondajların yapılmasıyla kullanım potansiyelinin artabileceğine işaret etmektedir. Çan-Merkez’de bu sıcaklık farkına, ayrıca sahadaki değişken alüvyon kalınlığına (18-44 m) bağlı olarak akışkanın sıg soğuk yer altı sularıyla karışması da katkıda bulunuyor olabilir. Sondaj bulunmayan Alibeyçiftliği sahasında ise kalsedon sonuçları (28-39 °C) yüzey sıcaklığına (16,3-31,5 °C) diğer sahalara kıyasla belirgin şekilde yakın çıkmıştır; bu durum, sıg suyla karışım ve/veya nispeten sıg rezervuar olasılıklarıyla uyumludur.



Şekil 6. Jeotermal kaynakların $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ diyagramındaki konumu.

Figure 6. Location of the geothermal resources on the $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ diagram.

Bardakçılar'da elde edilen Na-K-Ca jeotermometre sonucu (80-82 °C) da kalsedon aralığıyla örtüşmektedir. Ancak bu jeotermometrenin yüksek sıcaklık değerlerinde (> 200 °C; Li vd., 2020) daha güvenilir olması nedeniyle rezervuar sıcaklığının doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilmemiştir.

Çevresel İzotoplar ve Akışkanın Kökeni

Çan ilçesindeki jeotermal kaynakların oksijen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) ve döteryum ($\delta^2\text{H}$) izotop verileri (Yalçın, 2007; Baba ve Deniz, 2008; Karaca vd., 2013) akışkanların kökenini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Çizelge 2). Değerlendirmede referans çerçevesi olarak Küresel meteorik su doğrusu (GMWL; $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$; Craig, 1961) ile Biga Yarımadası'nda geçerliliği kabul edilen Marmara meteorik su doğrusu (MMWL; $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 15$; Eisenlohr, 1995) esas alınmıştır (Şekil 6).

Baba vd. (2008), Kaz Dağı'nın kuzeydoğusunda bulunan soğuk su kaynaklarının büyük bölümünün GMWL ile MMWL arasında yer aldığını göstererek, sistemin ağırlıklı olarak modern meteorik sularla beslendiğini ortaya koymuştur. Çan ilçesinde Şanlıyüksel Yücel vd. (2016) tarafından ölçülen yerel kar örneği MMWL'nin üzerinde, yerel yağmur örneği ise GMWL'nin altında konumlanmaktadır (yağmur: $\delta^{18}\text{O} = -4,96$ ile $-5,91\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -25,06$ ile $-38,29\text{‰}$; kar: $\delta^{18}\text{O} = -9,84\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -58,24\text{‰}$).

Jeotermal akışkanın yer altı dolaşım süresini belirlemede yaygın olarak kullanılan trityum (^3H) içeriği, beslenme alanından boşalım noktasına kadar geçen süre hakkında bilgi vermektedir (Wei vd., 2021). Trityum içeriğinin 1 TU'nun altında olması, sistemin 1950'lerin başında başlayan termonükleer silah denemeleri öncesi beslenen daha yaşlı suları içerdiğine işaret etmekte; 1 TU'nun üzerindeki değerler ise ölçülebilir ^3H 'nin güncel beslenimini veya aktif bir karışım sürecini yansıtmaktadır (Clark ve Fritz, 1997).

Alibeyçiftliği jeotermal kaynağında ölçülen $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL-MMWL aralığında ve yerel kar bileşimine yakın konumlanmaktadır. ^3H içeriği (0,43 TU), baskın bileşenin 1950'ler öncesi beslenmiş, uzun yer altı kalış süresine sahip yaşlı sulardan oluştuğuna işaret etmekte, düşük oranda modern su katkısının da eşlik edebileceğini düşündürmektedir.

Çan-Merkez kaynağındaki $\delta^{18}\text{O}$ değerleri diğer sahalardan belirgin biçimde daha az negatif olup yerel kar ile yağmur örnekleri arasında yer almaktadır; buna karşılık $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL ve MMWL'nin oldukça altında, yerel kar örneğinin bileşimine yakın konumda sabit kalmaktadır. Bu asimetrik konum, jeotermal akışkanın yüksek sıcaklıkta kayaç/ CO_2 ile girdiği derin bir etkileşim sonucu $\delta^{18}\text{O}$ bakımından zenginleştiğine işaret etmektedir. Bu kaynak, dört saha arasındaki en yüksek HCO_3^- derişimi (268 mg/l) ve en yüksek alkalinite değeriyle (4,4 mmol/l) bu CO_2 girdisini destekleyen jeokimyasal veriler sunmaktadır (Yalçın, 2007). Derin kökenli izotopik kaymadan bağımsız olarak, sahada ikinci ve sığ bir süreç daha etkilidir. Diğer sahalara kıyasla jeotermal akışkanın yüksek ve değişken ^3H içeriği (1,01-3,5 TU) Kocabaş Çayı alüvyon akiferiyle kurulan aktif hidrolik bağlantı sonucu sisteme dönemsel olarak katılan modern su bileşenini yansıtmaktadır.

Karalıda kaynağındaki $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL-MMWL aralığında yer almaktadır. ^3H içeriği (0,31-0,55 TU) 1 TU eşliğinin altında kalarak baskın bileşenin, Alibeyçiftliği'nde olduğu gibi, uzun yer altı kalış süresine sahip yaşlı sulardan oluştuğuna işaret etmektedir. Ancak üst sınırın Alibeyçiftliği'nde ölçülen değere kıyasla bir miktar daha yüksek olması, derin jeotermal bileşene majör iyon ve silika verileriyle de desteklenen sınırlı bir modern/sığ su katkısının eşlik edebileceğini düşündürmektedir.

Bardakçılar kaynağındaki $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerleri GMWL ile MMWL arasında yer almakta ve yerel kar örneğinin bileşimine yakın

konumlanmaktadır. Sahada ölçülen oldukça düşük ^3H değerleri (0,05-0,22 TU), Baba vd. (2008) tarafından bölgedeki soğuk su kaynaklarında saptanan 1,55-6,7 TU değerinin oldukça altında kalarak sistemin bölgedeki diğer jeotermal sistemlere kıyasla belirgin şekilde daha uzun bir yer altı kalış süresine sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu bulgu, sahanın Mg^{+2} - SiO_2 ilişkisi, Giggenbach diyagramındaki kısmen olgunlaşmış sular konumu ve jeotermometreler arası en yüksek tutarlılıkla birlikte değerlendirildiğinde, sistemin bölgedeki diğer sahalarla göre daha derin sirkülasyonlu bir hidrojeolojik yapı sergilediği sonucunu desteklemektedir.

Tüm sahalarla ait $\delta^{18}\text{O}$ değerleri Hedenquist ve Lowenstern (1994)'in magmatik su aralığının ($\delta^{18}\text{O}$: +5,5 ile +9,5‰; $\delta^2\text{H}$: -40 ile -80‰) belirgin biçimde dışında kalarak magmatik katkının ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir. Ege Denizi izotop verileri ($\delta^{18}\text{O} \approx +0,64$ -+1,59‰; $\delta^2\text{H} \approx +11,43$ -+15,56‰, Deniz, 2010) ile karşılaştırması da denizel köken olasılığını ortadan kaldırmaktadır. Bardakçılar, Karalıda ve Alibeyçiftliği sahalarına ait $\delta^{18}\text{O}$ ve $\delta^2\text{H}$ değerlerinin GMWL-MMWL aralığında yer alması, bu kaynakların temel beslenme kaynağının bölgesel meteorik sular olduğunun açık bir göstergesidir. Bu konum, aynı zamanda uzun yer altı kalış süreleri ve geçmiş iklimsel beslenme modelleriyle uyumlu bir tablo ortaya koymaktadır. Nitekim Yalçın (2007), bölgede Kaz Dağı'ndan daha yüksek bir rakım bulunmaması nedeniyle bu tür düşük izotopik bileşimleri soğuk iklim koşulları altında gerçekleşen yağışlarla ilişkilendirmiş; ayrıca Kaz Dağı'ndan uzaklaştıkça $\delta^2\text{H}$ 'nin daha negatife kaydığını ($R^2 = 0,81$) saptayarak bunu yüksek rakımlı beslenimden çok soğuk iklim yağışları ve uzun yer altı kalış süreleriyle açıklamıştır. Buna karşın Çan-Merkez'deki daha az negatif $\delta^{18}\text{O}$ değerleri, yukarıda tartışıldığı üzere büyük ölçüde CO_2 -su etkileşimine bağlı bir $\delta^{18}\text{O}$ kaymasını yansıtmakta; Kocabaş Çayı alüvyon akiferiyle olan hidrolik bağlantı ise sistemin ^3H içeriğindeki

dönemsel değişkenliği açıklamaktadır. Baba vd. (2008) tarafından bölgedeki soğuk su kaynaklarında belirlenen yükseklik- $\delta^{18}\text{O}$ ilişkisi ($y = -0,0025x - 7,0995$; $-0,25\text{‰}/100 \text{ m}$), literatürdeki genel eğilimle (Yurtsever ve Gat, 1981; Clark ve Fritz, 1997) uyumludur ve sahalar arasındaki izotopik farkları nicel bir çerçevede değerlendirmeye imkân tanımaktadır. Bu ayrımın kesinleştirilmesi için ise sistematik yağış izotop verisine ihtiyaç duyulmaktadır.

ÇAN ve ÇEVRESİNDEKİ MADENCİLİK FAALİYETLERİ

Metalik Maden Potansiyeli

Biga Yarımadası'nın çok evreli, karmaşık ve geçişli tektonik evrimi; stratigrafik gelişim, metamorfik zonlanma, magmatizma ve buna bağlı metalojenik sistemleri birlikte kontrol eden bölgesel ölçekli bir jeodinamik çerçeve sunmaktadır (Okay vd., 1990). Yiğit (2012), Biga Yarımadası'nı Tetis Metalojenik Kuşağı içerisinde 18-52 My aralığındaki Senozoyik kalk-alkali magmatizma ile şekillenmiş, ekonomik açıdan önemli cevherleşmeler barındıran bir metalojenik bölge olarak tanımlamıştır. Engin vd. (2012), bölgedeki intrüzif ve ekstrüzif kayaçların başlıca iki evrede geliştiğini; bir grubun Jura öncesi döneme, diğer grubun ise metalojenik açıdan belirleyici olan Oligo-Miyosen dönemine ait olduğunu belirtmiştir. Metalik cevherleşmelerin mekânsal dağılımı da bu ikinci evredeki ekstrüzif ve intrüzif kayaçlarla doğrudan ilişkilidir.

Biga Yarımadası genelinde, porfiri bakır-altın (Cu-Au), epitermal Au ve baz metal skarn sistemleri başta olmak üzere, farklı metal gruplarına ait toplam 205 maden yatağı ve zuhuru tanımlanmıştır (Engin vd., 2012). Bölge; Cu-Au $\pm$ Mo porfiri, Fe $\pm$ Cu proksimal ve Pb-Zn-Cu distal skarn ile Au-Ag ve Pb-Zn-Cu $\pm$ Ag $\pm$ Au epitermal yüksek sülfidasyon (HS), orta sülfidasyon (IS) ve düşük sülfidasyon (LS) tipte

cevherleşmeleri içermektedir (Yiğit, 2012; Kuşcu vd., 2019; Çiçek vd., 2021; Demirela ve Akıska, 2022). Maden yataklarının dağılımı KD-GB uzanımlı bir metalojenik zonlanma sergilemekte olup (Engin vd., 2012), bu dağılım bölgenin ana tektonik dokusunu yansıtan KD-GB doğrultulu doğrultu atımlı fay sistemleriyle (KAFZ batı uzantısı) de ilişkilendirilmektedir (Yiğit, 2012). Söz konusu zonlanma yapısına bağlı olarak, bölgenin geleneksel metallerin yanı sıra sülfür minerallerine bağlı yan ürünler (galyum (Ga), germanyum (Ge), selenyum (Se), kadmiyum (Cd), indiyum (In), tellür (Te), renyum (Re) ve talyum (Tl) vb.) açısından da jeokimyasal potansiyel taşıdığı öngörülmektedir (Engin vd., 2012).

Bölgede potansiyel taşıyan Cd, Ga, Ge ve In gibi elementlerin, ETKB (2025) tarafından hazırlanan Türkiye Kritik ve Stratejik Madenler Raporu kapsamında kritik madenler kategorisinde yer alması, Biga Yarımadası'nın metalojenik önemini ulusal hammadde güvenliği stratejileriyle ilişkilendirmektedir. Bahsi geçen elementlerden Ga, Ge, In, Te ve Re ise USGS'in (2026a) güncel kritik mineraller listesinde de yer alarak bu metalojenik potansiyelin uluslararası ölçekte kritik kabul edildiğine işaret etmektedir. Ayrıca bölgede küçük rezervli Mn ile bölgesel ölçekte cıva (Hg) ve volfram (W) potansiyelinin de bulunduğu bildirilmiştir (Gedikoğlu, 2011; Engin vd., 2012).

Bu genel çerçeve içinde, Çan ve yakın çevresi, porfiri, epitermal ve skarn tipi cevherleşmelerin bir arada gözlemlendiği alt bölgelerden biridir. Özellikle Oligo-Miyosen yaşlı volkanik ve intrüzif kayaçların yaygın olduğu sahalardaki Au, Cu, Pb, Zn ve Fe cevherleşmeleri, bölgedeki güncel madencilik faaliyetlerinin odağını oluşturmaktadır. Yatak ve zuhurların mekânsal dağılımı, bölgede baskın olan tektonik hatlar ile bunlara eşlik eden ikincil fay sistemleri tarafından kontrol edilmektedir (Engin vd., 2012; Yiğit, 2012). Bu yapısal ve jeolojik özellikler, Çan ilçesinin Biga Yarımadası içerisinde metalik maden potansiyeli

açısından ekonomik değeri yüksek alt bölgelerden biri olduğuna işaret etmektedir.

Bölgedeki metalojenik potansiyelin örneklerinden biri olan Halılağa (Cu-Au) porfiri sistemi, Biga Yarımadası'nın Eosen'den Geç Oligosen'e uzanan jeodinamik evrimini yansıtan, çok evreli ve uzun süreli bir magmatik-hidrotermal sürecin ürünüdür. Jeokronolojik veriler; Halılağa sistemindeki magmatik ve hidrotermal etkinliğin, ~39,56 My'daki Eosen evresi (molibdenitte Re-Os) ile ~26,27-24,81 My aralığındaki Geç Oligosen evresi (hidrotermal serisit ve K-feldispatta Ar-Ar) olmak üzere iki ana evrede yoğunlaştığını göstermektedir (Brunetti, 2016; Sánchez vd., 2016; Kuşcu vd., 2019).

Doerksen vd. (2015) tarafından, Halılağa sahasında porfiri sokulumunun (Kestane zonu) yaklaşık 4 km güneydoğusunda (Bakırlık zonu) bakır içerikli granat skarn mineralizasyonu bulunduğu ifade edilmiştir. Aynı raporda, Kestane zonunun yaklaşık 1 km batısında ise hornfels ile rekristalize kireçtaşı arasındaki kontakta kesilen ayrı bir skarn zonunda, dar bir aralıkta (1,9 m) ortalama %16,76 Zn tenörlü yüksek dereceli çinko mineralizasyonu, anomali düzeyinde Au (0,099 ppm) ve Cu (%0,192) ile tespit edilmiştir. Kestane zonunun güneyinde yer alan Kunk Tepe'de ise yüksek kesimlerde HS epitermal altın mineralizasyonu (kuvars-alünit, arjilikten ileri arjiliğe değişen alterasyon) gözlenmektedir (Doerksen vd., 2015). Bu birliktelik, porfiri, skarn ve epitermal sistemlerin aynı magmatik-hidrotermal etkinliğe bağlı tek bir zonlu sistemin parçaları olduğuna işaret etmektedir (Doerksen vd., 2015). Sistem, merkezde düşük tenörlü potasik (biyotit-manyetit $\pm$ K-feldispata) bir çekirdek ve bunu üzerleyen fillik (kuvars-serisit-pirit) alterasyonla, çevresinde propilitik (klorit-epidot) alterasyon ile karakterizedir. En yüksek Au-Cu tenörleri ise bu çekirdeği çevreleyen kesimlerde, yoğun kuvars-manyetit-sülfür damar ağlarıyla ilişkili olarak gözlenmektedir (Doerksen vd., 2015; Sánchez vd., 2016). Halılağa porfiri

sistemi yüzeyinde, kuvars açısından zengin bir porfir sokulumu içinde yer alan limonit-götite ve kuvars stokvörkünden oluşan, asitle yıkanmış limonitik bir kabuk bulunmaktadır (Sánchez vd., 2016; Yılmaz vd., 2019).

Sahadaki sondaj verilerine göre 182,7 Mt belirlenmiş kaynak, %0,27 Cu, 0,30 g/t Au ve %0,0057 Mo tenörüne sahiptir. Mümkün kaynak ise 178,7 Mt olup %0,23 Cu, 0,24 g/t Au ve %0,0087 Mo tenörü içermektedir (Doerksen vd., 2015; Sánchez vd., 2016). Kayaç jeokimyası analizlerinde Cu derişimleri çoğunlukla 500 ppm'in üzerinde olup, Au içeriği genellikle 0,5-1 ppm aralığında, en yüksek değer ise 3,37 ppm olarak saptanmıştır (Yılmaz vd., 2019).

Kaynak tahminlerinin ötesinde, sahanın işletme planlaması da ilerlemiş durumdadır: proje sahibi şirketin güncel raporlarına göre, Halılağa sahası 2 yıl arazi hazırlığı, 15 yıl işletme ve 2 yıl rehabilitasyon aşamalarını kapsayan toplam 19 yıllık bir proje ömrüne sahip olup, işletme süreci boyunca yıllık 6 Mt kapasiteyle toplamda 90 Mt bakır cevheri üretimi hedeflenmektedir (Truva Bakır, 2026).

Çan ilçesindeki bir diğer önemli metalik maden sahası olan **Ağı Dağı** (Au-Ag), Oligosen yaşlı çarpışma sonrası magmatizma tarafından kontrol edilen, HS epitermal bir sistemdir. Bölgesel ölçekte KD-GB ve D-B doğrultulu fay sistemleri, bu evrede hâkim olan genişlemeli rejim altında magmatik merkezlerin konumlanmasını ve hidrotermal akışkanların yollarını denetleyerek cevherleşmenin mekânsal dağılımını belirlemiştir (Yiğit, 2012). Mineralizasyon, dasitik-riyolitik lav kubbeleri, volkanoklastik birimler ile freatik breşler içerisinde gelişmiştir (Yiğit, 2012). Yatak, merkezde masif ve boşluklu silisleşme, bunu çevreleyen ileri arjilik alterasyon zonu (alünit-dikit-pirofilit-kaolinit) ve dış çeperde gelişen arjilik zon ile tanımlanır (Cunningham-Dunlop ve Lee, 2007).

Kuşcu vd. (2019) tarafından belirlenen

jeokronolojik veriler, Ağı Dağı'nın HS epitermal mineralizasyon yaşının ($26,36 \pm 0,16$ My) Halılağa'da tespit edilen genç bir hidrotermal serisitik alterasyon evresi yaşı ($26,27 \pm 0,19$ My) ile örtüştüğünü göstermektedir; bu ikincil olay, Halılağa porfiri sisteminin asıl oluşum yaşından ($\sim 39,5$ My, Eosen; Brunetti, 2016) belirgin şekilde daha gençtir. Bu kronolojik örtüşme, her iki sistemde de benzer zamanlı alterasyon süreçlerini tetiklemiş olabilecek ortak bir bölgesel Geç Oligosen hidrotermal etkinliği işaret etmektedir.

Sahada tanımlanan mineralize zonlar arasında, özellikle Baba Dağı ve Ayitepe zonlarında, oksit zonda Mo içeriği 500 ppm'e kadar yükselirken sülfür zonunda yaklaşık 50 ppm düzeyinde kalmaktadır (Cunningham-Dunlop ve Lee, 2007; Yiğit, 2012). Bu kontrast, sistemin derinlerinde porfiri Au-Mo ile ilişkili bir magmatik-hidrotermal çekirdeğin varlığına işaret etmekte ve epitermal-porfiri geçişine dair kılavuz bir element göstergesi sunmaktadır. Baba Dağı (26,6 Mt; 0,52 g/t Au) ve Deli Dağı (25,4 Mt; 0,67 g/t Au) zonlarına ait kaynak tahminlerinin (Yiğit, 2012) yanı sıra, sahada tamamlanan fizibilite çalışmaları kapsamında hesaplanan toplam görünür ve muhtemel rezerv 54,4 Mt cevherde 0,67 g/t Au tenörü ile yaklaşık 1,17 Moz Au içermektedir (Cormier vd., 2017). Söz konusu veriler, Ağı Dağı sahasının Biga Yarımadası'ndaki en büyük HS epitermal Au sistemlerinden biri olduğuna işaret etmektedir (Yiğit, 2012). Hâlihazırda üretim aşamasına geçmemiş olan saha, yatırım ve geliştirme süreçleri kapsamında değerlendirilmeye devam etmektedir.

Çan ilçesindeki Pb-Zn cevherleşmelerini temsil eden ve yer altı işletmesi olarak faaliyet gösteren Kumarlar ve Kocayayla sahalarında, bölgenin polimetallik baz metal potansiyeli günümüzde değişken ekonomik ve teknik koşullara bağlı olarak kesintili bir üretim süreciyle değerlendirilmektedir. **Kumarlar** polimetallik (Pb-Zn-Cu $\pm$ Au) sahası, yapısal kontrollü bir LS-IS epitermal sistemdir (Bozkaya ve Banks, 2015).

Sahanın litolojisi andezit, tuf ve aglomeradan oluşmaktadır (Demirela ve Akıska, 2022; Abaka, 2024). Cevherleşme, bu birimleri kesen K-G (Çelik, 2009) ve KD-GB doğrultulu, KB-GD dalımlı tektonik hatlar boyunca damar tipinde, saçınımlı ve ağsal yapıda gelişmektedir (Demirela ve Akıska, 2022). Hidrotermal alterasyon, cevherleşme zonu ve yakın çevresindeki tüflerde yoğun silisleşme ve serisitleşme ile karakterize edilirken (Çelik, 2009), cevherli damarları çevreleyen andezitik yan kayaçta propilitik alterasyon baskın olarak gözlenmektedir (Demirela ve Akıska, 2022).

Sistemin mineralojik parajenezini ana bileşen olarak galenit ve sfalerit oluşturmakta; kalkopirit, pirit, fahlerz, markazit, kovellin, limonit ve nabit altın bunlara eşlik etmektedir (Çelik, 2009; Demirela ve Akıska, 2022). Gang minerali olarak kuvars boşluklarda ikinci bir evrede gelişmiştir (Çelik, 2009); ayrıca kalsit, adularya ve klorit saptanmıştır (Demirela ve Akıska, 2022; Abaka, 2024). Bozkaya ve Banks (2015) tarafından, cevherin önemli bir bölümünün sismik olaylarla tetiklenen ani basınç düşümü mekanizması sonucu çökelen amorf silis bantları içerisinde hapsediği ortaya konmuştur. Bu bantlarda ortalama 0,2 ppm Au ve 1,31 ppm Ag saptanmıştır (Bozkaya ve Banks, 2015). Aynı çalışmada, amorf silis örneklerinde Sb (24,3 ppm), Cd (1,77 ppm) ve Ge (1,26 ppm) içerikleri de belirlenmiştir.

Kocayayla polimetalik (Pb-Zn $\pm$ Cu) yatağı, Au-fakir IS tipi epitermal bir sistem olarak sınıflandırılmıştır (Akıska ve Demirela, 2026). Wagner vd. (1985), sahada yatağın işletme geçmişine ışık tutan altı adet terk edilmiş kısa galeri bulunduğunu belirtmiştir. Cevherleşme, andezitik-bazaltik volkanikler ile serisit şist ve serisit-grafit şistlerden oluşan yan kayaçlar içerisinde hidrotermal damarlar şeklinde gelişmiştir; sahanın kuzeyinde ise granodiyorit mostrası bulunmaktadır. Sahadan alınan galenit örneklerinin Pb izotop model yaş ortalaması yaklaşık 12,2 My olarak belirlenmiştir (Demirela ve Akıska, 2022). Yiğit (2012) sahada saptadığı serisitik alterasyonla ilişkili Cu-Mo anomalisi

gösteren stokvörk cevherleşmenin porfiri sisteme işaret ettiğini belirtmiştir.

Hidrotermal alterasyon, damar ve cevherleşme zonları çevresinde yoğun silisleşme ve kloritleşme ile karakterize edilirken, mineralojik analizler serisit-kuvars-kaolinit/nakrit-pirit birlikteliğinden oluşan filik-arjilik ile klorit-kalsit/dolomit-kuvars-pirit birlikteliğinden oluşan propilitik olmak üzere iki temel alterasyon zonunun varlığını ortaya koymaktadır (Akıska ve Demirela, 2026). Sistemin mineralojik parajenezini ana bileşen olarak galenit ve sfalerit oluşturmaktadır; kalkopirit, pirit ve tenantit gibi mineraller bunlara eşlik etmektedir; gang mineralleri ise kuvars ve baritir (Gjelsvik, 1962). Gjelsvik (1962) tarafından saptanan breşleşmiş dokanak zonunda kalkopiritin pirit ve sfaleritten sonra, ancak tenantitten önce oluştuğu belirlenmiş olup, bu durum cevherleşmenin çok evreli bir hidrotermal süreçten geçtiğini düşündürmektedir. Akıska ve Demirela (2026) tarafından sahada yapılan jeokimyasal analizler, cevher örneklerinin Pb (25,3-33.200 ppm), Zn (116,6-9151,5 ppm), Cu (6,4-601,1 ppm) ve As (0,2-76,5 ppm) dahil olmak üzere baz metaller ve ilişkili elementlerde belirgin bir zenginleşme, Cd (0,10-36,84 ppm), Sb (0,50-34,86 ppm) ve Ag (0,05-7,46 ppm) içeriklerinde ise yükselmiş değerler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu birlikte zenginleşmenin galenit ve sfalerit kafesine ikame veya minör sülfotuz fazları şeklinde gerçekleştiği ve hidrotermal kökeni desteklediği belirtilmiştir.

Çan ilçesinin kuzeydoğusunda bulunan **Yuvalar** Fe-Cu skarn yatağı, bölgedeki yoğun antik metalürji faaliyetlerinin izlerini barındırmaktadır. Sahadaki cevherleşme, granodiyorit sokulumu ile mika-şist ve mermer aralanmasından oluşan metamorfik istif arasındaki dokanak boyunca gelişen bir skarn zonu içerisinde oluşmuştur; yatağın başlıca cevher mineralleri kalkopirit, pirit, hematit, limonit ve malakittir (Pernicka vd., 2003). Yatağın jeolojik oluşum yaşına dair kapsamlı bir radyometrik çalışma bulunmamakla birlikte; madencilik faaliyetlerinin tarihsel geçmişine

ışık tutan termolüminesans verileri (Wagner vd., 1985) ve bölgedeki cüruf yığınları içerisinde saptanan Arkaik Dönem (MÖ 8-5. yy.) ile Bizans İmparatorluğu arasına tarihlenen seramik buluntuları, sahanın uzun süreli bir kullanım geçmişine sahip olabileceğini göstermektedir (Körpe, 2024).

Wagner vd. (1985), Yuvalar sahasını bölgede bakır ergitilen merkezlerden biri olarak tanımlamış; Pernicka vd. (2003) ise radyokarbon ve termolüminesans verilerine dayanarak sahadaki bakır üretiminin MÖ 2. binyıl ile Roma dönemi olmak üzere en az iki ayrı evrede gerçekleştiğini belirtmiştir. Fırın kalıntıları üzerinde yapılan termolüminesans analizleri, Roma dönemi metalürjik faaliyetlerinin yaklaşık MS 70 ± 170 civarına tarihlendiğini göstermektedir. Toplam kütlesi yaklaşık 100.000 t olarak tahmin edilen yedi büyük cüruf yığını, sahanın bu dönemdeki arkeometalürjik önemini destekleyen başlıca göstergeler arasındadır. Mineralojik veriler, işletilen ana cevherin kalkopirit olduğunu ve ergitme sürecinde yerel demir kaynaklarının (özellikle limonit) akı maddesi olarak kullanıldığını göstermektedir; jeokimyasal analizi yapılan bir cüruf örneğinde FeO içeriği ağırlıkça %60,3 olarak saptanmıştır (Wagner vd., 1985).

Yuvalar köyü kuzeyindeki Demirli mevkiinde, yaklaşık bir kilometreye yayılan cüruf depolama alanı, antik Troas bölgesinde (Biga Yarımadası'nın büyük bölümünü kapsayan tarihi bölge) bugüne kadar tespit edilen en büyük arkeometalürjik atık sahasıdır (Atabay ve Körpe, 2019). Sahada yürütülen güncel maden arama ve sondaj faaliyetleri kapsamında, bölgenin mineralizasyon potansiyeli mühendislik ve rezerv geliştirme standartları çerçevesinde değerlendirilmektedir (Sütün Enerji, 2026).

Çan ve yakın çevresi, Halılağa porfiri sisteminden, Ağı Dağı HS epitermal sisteme, Kumarlar ve Kocayayla LS-IS/IS tipi epitermal polimetallik damar yataklarına ve Yuvalar skarn yatağına uzanan geniş bir metalojenik spektrum

barındırmaktadır. Söz konusu yatakların cevher parajenezindeki metal çeşitliliği, yalnızca ana metal üretimiyle sınırlı kalmayıp, yan ürün olarak geri kazanılabilecek kritik mineraller açısından da önemli bir katma değer kaynağı olabileceğine işaret etmektedir. Kumarlar sahasındaki Sb ve Ge içerikleri (Bozkaya ve Banks, 2015), Kocayayla sahasındaki Zn, Sb ve Ag zenginleşmesi (Akıska ve Demirela, 2026) ve Halılağa sahasında Kestane zonu yakınındaki skarn zonunda saptanan Zn mineralizasyonu (Doerksen vd., 2015), bu sahaların USGS (2026a) güncel kritik mineraller listesinde yer alan yüksek teknoloji metalleri açısından da potansiyel taşıdığını düşündürmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu listede yer alan kritik minerallerin bölgedeki metalik maden yataklarında somut potansiyelinin doğrulanması ve ekonomik değerlendirilebilirliğinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Söz konusu çeşitlilik, bölgenin jeolojik evrimindeki çok evreli magmatik faaliyetlerin ve bunlara eşlik eden hidrotermal süreçlerin zamansal ve mekânsal sürekliliğini yansıtmaktadır. Hidrotermal aktivite, yalnızca metalik cevherleşmelerle sınırlı kalmamış, yan kayaçlarda gelişen yoğun alterasyon süreçleri aracılığıyla, bölgedeki endüstriyel hammadde oluşumları için de uygun bir jeokimyasal zemin hazırlamıştır.

Endüstriyel Hammadde Potansiyeli

Biga Yarımadası'nda 124 farklı lokasyonda tanımlanmış toplam 26 çeşit endüstriyel hammadde kaynağı bulunmaktadır (Erdoğan vd., 2012). Çan ilçesi, yarımadaının karmaşık tektono-magmatik evrimiyle uyumlu bir jeolojik yapı sergilemektedir. Özellikle Oligo-Miyosen yaşlı kalk-alkali magmatizmanın ürünü olan Çan volkanitlerine ait kayaçlar yoğun hidrotermal alterasyon süreçlerine maruz kalmış ve bu durum bölgeye önemli bir endüstriyel hammadde potansiyeli kazandırmıştır (Ercan vd., 1995). Başta kaolinleşme ve silisleşme olmak üzere gelişen bu alterasyon zonlarının geniş yayılımı, Çan'ı seramik ve cam sanayisinin temel

girdileri olan kaolin ve sileks açısından ulusal ölçekte önemli bir üretim merkezi konumuna taşımaktadır. Bölgedeki magmatik kayalara bağlı feldispat ve kuvars rezervleri de bu potansiyele katkı sağlamaktadır. Seramik sanayisine yönelik bu potansiyele ek olarak; agrega üretimi, inşaat ve enerji sektöründe değerlendirilen kalker oluşumları ile dekoratif amaçlı kullanılan Çan taşı bölgenin diğer önemli endüstriyel kaynaklarını oluşturmaktadır.

Bölgedeki en karakteristik **kaolin** yatakları, KD-GB doğrultulu ÇBFZ üzerinde konumlanan Bahadırılı, Duman ve Çaltıkara ocaklarında gözlenmektedir. Ayrıca Tepeköy, Büyüktepe ve Çekiçler ocakları, bölgedeki kaolinleşmenin mekânsal sürekliliğini ve ekonomik potansiyelini temsil eden diğer önemli sahalarlardır. Bahadırılı, Çaltıkara ve Duman ocaklarında yapılan mineralojik, jeokimyasal ve izotopik çalışmalar kaolinleşmenin gelişim mekanizmasını ortaya koymuştur. Çan volkanitlerini etkileyen asit-sülfat karakterli hidrotermal akışkanlar, fay zonları boyunca K-feldispat ve plajiyoklazı düşük pH (~2-3) koşullarında altere etmiştir (Aydın, 2014). Bu süreçte feldispat ve mikanın hidrolizi element mobilizasyonuna yol açmış, yatakların jeokimyasal evriminde Ba ve Sr içeriklerinde göreceli zenginleşmeler gözlenmiştir (Ünal Ercan vd., 2022a). Aynı çalışmada, aynı ana kayaç ve aynı fay zonu üzerinde birbirine yakın konumlanan bu üç yatağın farklı kökenlerden geliştiği belirlenmiştir: Bahadırılı ve Çaltıkara hipojen kökenliken, Duman yatağı gölsel süreçler ve meteorik su karışımıyla süperjen etkiler altında şekillenmiştir (Ünal Ercan vd., 2022a).

Farklı genetik süreçlerle oluşan kaolin yataklarının ekonomik değeri, mineralin geniş endüstriyel kullanım çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. Kaolin; kâğıt sanayisinde dolgu ve kaplama pigmenti, seramik ve refrakter sanayisinde ana hammadde, kauçuk ve plastik sanayisinde dolgu maddesi, boya ve kaplama sanayisinde ise opaklık, parlaklık ve akışkanlık kazandıran fonksiyonel bir bileşen olarak

kullanılmaktadır (Murray, 2007; Buyondo vd., 2022). Kalsinasyon yoluyla metakaoline dönüştürüldüğünde çimentoda yüksek puzolanik aktivite kaynağı (Murray, 2007), jeopolimer üretiminde ise önemli bir hammadde potansiyeli taşımaktadır (Cheng vd., 2019). Kaolin, biyomedikal alanda yara iyileştirici kompozitlerin bağlayıcı/dolgu bileşeni olarak, yüzeyi metoksi ile modifiye edilmiş formları ise ilaç taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesinde değerlendirilmektedir. Kenar yüzeylerindeki reaktif hidroksil gruplarından kaynaklanan yüksek adsorpsiyon kapasitesi sayesinde ayrıca sentetik boya, ağır metal ve radyoaktif element giderimiyle atık su arıtımında etkin bir adsorban olarak da kullanılmaktadır (Cheng vd., 2019). Bu çok yönlü kullanım alanları, bölgedeki kaolin yataklarının yalnızca jeolojik-genetik açıdan değil, madencilik ve sanayi hammaddesi potansiyeli açısından da önemini göstermektedir.

Bölgedeki magmatizma ve buna bağlı hidrotermal aktivite, genişlemeli tektonik rejim tarafından kontrol edilmektedir. Silis bakımından zengin akışkanların yükselimi, D-B ve KD-GB doğrultulu ana fay sistemleri ile bunlara dik gelişen KB-GD doğrultulu ikincil kırık sistemleri boyunca gerçekleşmektedir (Ünal Ercan ve Ece, 2015; Ünal Ercan vd., 2022b). **Sileks**, yüksek silis içeriği (> %95) sayesinde atmosferik etkilere karşı yüksek fiziksel ve kimyasal direnç göstermekte ve sahada sarp sırtlar, tepeler şeklinde belirgin bir topoğrafya oluşturmaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Bölgedeki bu morfolojinin en tipik örneği, Karalıca jeotermal alanının kuzeyindeki Hamamtepe ve batısındaki Muratlar sileks yataklarıdır. Bu iki sahadaki sileks oluşumlarının iki aşamalı bir hidrotermal süreç sonucunda geliştiği düşünülmektedir: erken evrede asit-sülfat karakterli akışkanlar kaolinit-alünit-halloysit alterasyonunu oluşturmuş, bunu izleyen geç evrede ise nötre yakın pH'lı alkali-klorür akışkanlar silika sinter ve silisleşmiş volkanik kayaç fasiyesleri şeklinde çökelmiştir (Yılğör, 2001; Ünal Ercan vd., 2022b).

Ünal Ercan ve Ece (2015), Hamamtepe'den aldıkları sileks örneklerinin α -kuvars fazında olduğunu, fay zonlarına yakın kesimlerde ise kaolinit ve alünit mineralleri geliştiğini ortaya koymuş; alünitlerde yapılan $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaş tayinleri mineralizasyonun 28-32 My aralığında geliştiğini belirtmiştir. Ünal Ercan vd. (2022b), aynı sahalardaki sinter oluşumlarını izotopik ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$) verilerle inceleyerek sistemin sığ (<150 m) kesimindeki buhar-ısıtmalı asit-sülfat alterasyonunun derinde gelişen bir LS epitermal sistemi örtüğünü ve sinterlerin kendisinin Au içermediğini, buna karşın ilişkili altere zonlarda (özellikle Muratlar'da) yerel olarak ~1 ppm'e varan Au zenginleşmeleri bulunduğunu saptamıştır. Aynı çalışmada, elde edilen $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaş verileriyle bölgedeki alterasyonun üç ayrı dönemde (Muratlar: 22,6-32,4 My; Hamamtepe kuzey: 12,3-15,2 My; Hamamtepe güney: 5-7 My) geliştiği belirlenmiştir.

Sileks, seramik öğütme değirmenlerinde bilye ve astar taşı olarak kullanılan önemli bir hammadde niteliği taşımaktadır (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Biga Yarımadası'ndaki silekslerin büyük bölümü tarihsel olarak işletilmiş, buna karşın bu alterasyon zonlarının epitermal Au-Cu potansiyeli ancak Ağı Dağı gibi sistemlerin keşfinden sonra fark edilmeye başlanmıştır (Yiğit, 2012). Günümüzde Etili çevresindeki ocaklarda sürdürülen üretim faaliyetleri, hem bölgenin jeolojik mirasını görünür kılmakta hem de endüstriyel bir kaynak olarak yerel ekonomiye katma değer sağlamaktadır.

Çan ve çevresindeki arkeolojik araştırmalar, bölgedeki sileks yataklarının Paleolitik Çağ'dan itibaren alet ve silah üretiminde hammadde olarak kullanıldığını ve ilk insanların yerleşim kararlarını etkilediğini göstermektedir (Atabay ve Körpe, 2019). Nitekim bölgenin ilk insan toplulukları tarafından bu denli tercih edilmesinde, hammadde bolluğunun (Özer vd., 2018), çevredeki sulak alanların sağladığı ekolojik çeşitliliğin ve jeotermal kaynakların sunduğu ısınma avantajının ortak rol

oynadığı öne sürülmektedir (Atabay ve Körpe, 2019). Bu bağlamda, Bahadırköyü yakınlarında yer alan İnkaya Mağarası (Şekil 7a), in-situ dolgu tabakaları ve çevresinde tespit edilen binlerce yontma taş alet kalıntısıyla, Batı Anadolu'daki fosil insan varlığına ışık tutacak önemli merkezlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Özer vd., 2018). Bu sahada yürütülen insansız hava aracı (İHA) tabanlı yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve modelleme çalışmalarıyla (Yücel vd., 2024, Şekil 7b), mağara çevresindeki sileks yüzleklerinin KD-GB doğrultusunda yaklaşık 150×30 m'lik bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Orta Paleolitik döneme tarihlenen bu yontma taş endüstrisi, doğrudan antropolojik bir veri içermese de dönem itibarıyla Avrupa, Orta Doğu ve Batı Asya'da yaygın olarak bilinen Neandertaller ile ilişkilendirilebilecek bir iskân/sığınak alanına işaret etmektedir; bölgedeki açık alan buluntu yerleri ise hammadde işleme ve alet üretim alanları olarak değerlendirilmektedir (Özer vd. 2018).

Bölgenin endüstriyel hammadde kaynaklarından biri olan **kalker**, Çan ve çevresindeki temel kayalar içerisinde geniş bir yayılım sunmaktadır. İl Özel İdaresi verileri ve saha gözlemleriyle kalkerlerin Terzialan, Bardakçılar, Derenti, Yaykın, Okçular, Asmalı ve Çomaklı köyleri çevresindeki sahalarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Açık ocak olarak işletilen bu yataklar, bölge madenciliğinin önemli bir kolunu oluşturmaktadır. Agrega üretimi ve termik santrallere hammadde temini başta olmak üzere yapı ve enerji sektörünün çeşitli girdilerinin karşılanmasında kullanılan bu sahaların, bölgedeki üretim ve tüketim noktalarına yakınlığı da hammadde nakliyesinde lojistik avantaj sağlamaktadır. Yaykın köyündeki kalker ocağında, ortalama %55 CaO (~%98 CaCO₃ eşdeğeri) içerikli kalker yıllık 50.000 t kapasiteyle üretilmekte; üretilen malzeme inşaat sektörünün yanı sıra termik santrallere hammadde olarak sunulmaktadır (Çınar ve Şanlıyüksel Yücel, 2025).



Şekil 7. a) İnkaya Mağarası ana bölümünden görünüm. b) İnkaya Mağarası düşey ortofotosu (Yücel vd., 2024).

Figure 7. a) View from the main section of İnkaya Cave. **b)** Vertical view of İnkaya Cave on the orthophoto (Yücel et al., 2024).

Aynı çalışmada, Asmalı köyünde bulunan kalker ocağında, yıllık 450.000 t kapasiteyle üretilen kalkerin tamamının hammadde olarak termik santrale sağlandığı belirtilmiştir.

Çan formasyonunun orta-üst seviyelerinde, kilitaşı-tüfit ardalanması arasında mercekler halinde **diyatomit** düzeyleri gözlenmektedir. Diyatomit adı verilen tek hücreli mikroskobik alglerin amorf silis bileşimindeki kabukları (kavkı), organizmaların ölümünün ardından deniz ve göl ortamlarında birikip istiflenerek zamanla ekonomik değer taşıyan diyatomit yataklarını oluşturur (Çetin ve Taş, 2012). Yüksek gözenekliliği, geniş yüzey alanı ve refrakter özelliği sayesinde diyatomit; filtre yardımcı malzemesi, dolgu maddesi, ısı ve ses yalıtım malzemesi ve hafif yapı malzemesi gibi geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahip bir hammadde (Flower ve Williams, 2025). USGS (2026b) verilerine göre Türkiye, 2025 yılında dünya diyatomit üretiminde %6'lık payı ile (150 bin ton/yıl) küresel ölçekte 5. sırada yer almaktadır ve yaklaşık 44 milyon tonluk önemli bir rezerve sahiptir. Bölgesel ölçekte, Keçiağlı köyü çevresindeki diyatomitler, tüfler içerisinde 50-60 cm'ye ulaşabilen, yer yer 20-30 cm kalınlıkta tabakalar halinde bulunmaktadır (Borat,

1992); ancak düşük kalitesi ve az rezervi nedeniyle işletilmediği bildirilmiştir (Ertin, 2001). Benzer oluşumların Çan ilçe merkezi yakınlarındaki Cemiyet alanı mevkinde de varlığı bildirilmiştir (Erdoğan vd., 2012). Türkiye'nin küresel ölçekteki bu üretim gücü dikkate alındığında; havzadaki potansiyelin nanoteknoloji, tıp ve enerji sektörü gibi yüksek katma değerli alanlar özelinde güncel jeokimyasal analizlerle yeniden değerlendirilmesi, bölgesel kalkınma vizyonu açısından önem taşımaktadır.

Hidrotermal alterasyon süreçlerinde, fay ve çatlak zonları boyunca yükselen hidrotermal akışkan ve gazların etkisiyle sülfür mineralleri (özellikle pirit) oksidasyona uğramaktadır. Bu jeokimyasal süreç, Çan volkanitleri içerisinde yer alan riolitik tüflerde yoğun limonitleşme gelişimine neden olarak kayaç yüzeylerinde karakteristik haleli ve desenli görünümler oluşturmaktadır (Akdaş vd., 2001). Bu çok renkli tüfler yerel literatürde **Çan taşı**, ticari piyasada ise "Rainbow" adıyla tanınmaktadır. Tüflerin kuru birim hacim ağırlığına göre geçiş sınıfı yapı malzemesi niteliği taşıdığı saptanmıştır (Akdaş vd., 2001). Çan taşı, kolay işlenebilirliği ve yüksek ısıl direnci sayesinde mühendislik projelerinde

stratejik avantajlar sunmaktadır; iç ve dış cephe kaplamalarından peyzaj düzenlemelerine, şömine uygulamalarından hediyelik eşya üretimine kadar geniş bir mimari ve dekoratif uygulama çeşitliliğine sahiptir (Tekin, 2009). Tarihsel olarak Söğütalan, Çakıl, Halılağa, Uzunalan, Göle, Bilaller ve Dereoba köyleri çevresinde üretim faaliyetleri yoğunlaşmıştır (Akdaş vd., 2001). Günümüzde üretim, büyük ölçüde Çakıl köyündeki ocakta sürdürülmekte ve çıkarılan hammadde Karakoca köyündeki tesiste işlenmektedir (Çınar ve Şanlıyüksel Yücel, 2025).

Çan, volkanizma ve aktif tektonizmanın şekillendirdiği endüstriyel hammadde çeşitliliğinin yanı sıra, Batı Anadolu'nun önemli enerji koridorlarından birini oluşturmaktadır. Jeotermal kaynakların sunduğu enerji potansiyeli, havzadaki yüksek ısı akısı ve tektonik aktivitenin güncel bir yansımasıdır. Havzanın enerji portföyü, yalnızca jeotermal kaynaklarla sınırlı değildir. Neojen dönemindeki çökme süreçlerinin ve organik madde birikiminin bir ürünü olan linyit rezervleri bölgenin endüstriyel kimliğini tarihsel ve ekonomik açıdan belirleyen temel enerji bileşenidir.

Enerji Hammaddesi Potansiyeli

Çan linyit havzası, yaklaşık 92,5 milyon tonluk toplam rezerviyle Biga Yarımadası'nın en önemli enerji hammadde kaynaklarından birini oluşturmaktadır (MTA, 2026). Kuzeydoğuda Helvacı köyü ile güneybatıda Hacıkasım köyü arasında uzanan havza, yaklaşık 30 km uzunluğa ve 10 km genişliğe sahiptir (Wedding, 1966). Çan formasyonu içerisinde yer alan linyit damarları başta Çan ilçe merkezi olmak üzere, Durali, Karlı, Kulfa, Yaya, Etili, Hacıkasım, Yeniçeri, Helvacı ve Çomaklı köyleri çevresinde geniş yüzlekler vermektedir. 1940 yılında keşfedilen havza, 1979 yılına kadar özel sektör tarafından işletilmiş, bu tarihten itibaren üretim faaliyetleri TKİ ÇLİ tarafından yürütülmeye başlanmıştır (ÇLİ, 2026).

Günümüzde linyit üretimi, TKİ ve özel sektör tarafından yürütülen açık ocak madenciliği faaliyetleri kapsamında sürdürülmekte ve başta enerji üretimi olmak üzere farklı kullanım alanları için ekonomiye kazandırılmaktadır.

Linyitlerin çevresel ve ekonomik değerlendirmesini belirleyen en temel unsurlardan biri, onların mineralojik ve jeokimyasal karakterizasyonudur. Çan linyitlerinin başlıca mineral bileşenlerini kaolinit, kuvars, jips, pirit, opal-CT, kristobalit, plajiyoklaz ve K-feldispat oluşturmaktadır (Tuncalı vd., 2002; Gürdal, 2011; Şanlıyüksel Yücel, 2019). Kömürün mineral fazında baskın olarak bulunan pirit, yalnızca kükürt kaynağı değil, aynı zamanda iz elementlerin başlıca taşıyıcısıdır. Kömürdeki pirit oranı ile As konsantrasyonu arasında pozitif bir ilişki bulunmaktadır (Ünalan, 2013). Çan linyitlerinde belirlenen ortalama As içeriği 253,5 mg/kg (Baba vd., 2016) olarak saptanmış olup, bu değer Ketris ve Yudovich (2009) tarafından belirtilen dünya kömür ortalamasının (8,3 mg/kg) yaklaşık 30 kat üzerindedir. Şanlıyüksel Yücel (2019), Etili ve Çomaklı kömür sahalarındaki As (33,1-75,7 mg/kg), Cu (44,3-48,6 mg/kg), Zn (57-74 mg/kg), Pb (18,7-27,3 mg/kg), Mn (77-232 mg/kg) ve Ni (9,9-18,5 mg/kg) içeriklerinin hem Türkiye (Palmer vd., 2004) hem de dünya kömür ortalamalarından (Swaine, 1990) belirgin biçimde yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Etili, Karlı, Yeniçeri ve Çomaklı sahalarından alınan örneklerin alt ısı değerleri sırasıyla 3628 kcal/kg, 4264 kcal/kg, 4028 kcal/kg ve 2537 kcal/kg olarak belirlenmiştir (Tuncalı vd., 2002). Çan havzası linyitlerinin nem ve kül içeriği, sırasıyla ağırlıkça %8,76-32,56 ve %2,46-38,48 arasındadır (Gürdal, 2011). Linyitlerin ayırt edici jeokimyasal özelliği, oluşum süreçlerinde etkili olan volkanik aktivite ile ilişkili yüksek toplam kükürt içeriğidir. Tuncalı vd. (2002), bu değer %1,63 ile %5,98 arasında değiştiğini ortaya koymuş; Gürdal (2011) ise %0,21 ile %14,36 gibi oldukça geniş bir aralık bildirerek, en yüksek toplam kükürt içeriklerini

Etili, Yaya ve Çomaklı sahalarında saptamıştır. Bu içerik, kömürün evsel ısınmada doğrudan kullanılmasını sınırlamakta ve enerji üretiminde uygun yanma teknolojilerinin seçimini belirleyen önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Bu teknolojik gereklilikler doğrultusunda seçilen uygun yakma sistemleri, Çan linyitlerinin enerji üretiminde etkin biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yerli linyit kaynaklı elektrik üretimi, Türkiye'nin enerji arz güvenliği ve dışa bağımlılığın azaltılması açısından önem taşımaktadır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından yayımlanan 2024 yılı istatistiklerine göre yerli linyit kaynaklı kurulu güç 10.106,5 MW olup, toplam kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımında %8,69'luk bir paya sahiptir (TEİAŞ, 2025). Türkiye'de işletmede olan kömür yakıtlı termik santraller içerisinde Çan ilçesi, iki önemli enerji tesisine ev sahipliği yapmaktadır. Toplam 650 MW kurulu güce sahip termik santraller, bölgedeki enerji üretim kapasitesinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bölgede 2006 yılında, Türkiye'nin akışkan yataklı yakma teknolojisine sahip ilk santrali faaliyete geçmiştir. Tesis, yüksek kükürtlü linyitlerin çevresel standartlara uygun yakılması amacıyla tasarlanmıştır. Tesiste ekonomik geri kazanımı henüz yaygınlaşmayan küller, tesisin yaklaşık 1 km kuzeydoğusunda yer alan vadi tipi depolama alanında düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmektedir. 2018 yılında işletmeye alınan diğer santral, kritik altı pulverize yakma teknolojisiyle çalışmaktadır. Bu tesiste, yanma verimliliğini artırmak ve emisyon limitlerini optimize etmek amacıyla Çan, Malkara ve Soma havzalarından temin edilen linyitler belirli oranlarda harmanlanarak (paçal) kullanılmaktadır.

Her iki santralin linyit ocaklarına olan coğrafi yakınlığı, havza madenciliğinin merkezi bir planlama anlayışıyla yürütülmesine olanak sağlamakta ve nakliye maliyetlerini azaltarak lojistik süreçlerin optimizasyonuna katkı

sunmaktadır. Çan linyit havzası, mevcut rezervlerin uygun yakma teknolojileriyle entegrasyonu sayesinde yerel enerji üretiminde sürekliliği sağlarken, aynı zamanda çevresel yönetim süreçlerinin ve emisyon kontrolünün teknik bir gereklilik olduğu bir hammadde sahasıdır.

ÇAN ve ÇEVRESİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR KAYNAK ve ENERJİ YÖNETİMİ

Sürdürülebilir kalkınma, doğal kaynakların korunmasını, ekonomik büyümenin sürekliliğini ve toplumsal refahın artırılmasını eş zamanlı hedefleyen bütüncül bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır (UN, 2015). Çevresel, ekonomik ve sosyal boyutların dengeli yönetimini gerektiren bu yaklaşım; kaynak etkinliği, enerji arz güvenliği ve çevresel risklerin azaltılması gibi stratejik unsurları kapsamaktadır (Mancini ve Sala, 2018). Özellikle enerji ve madencilik gibi kaynak yoğun sektörlerde bu ilkelerin hayata geçirilmesi; operasyonel süreçlerin ekosistem dengesi gözetilerek planlanmasını ve uzun vadeli projeksiyonlar doğrultusunda yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Sürdürülebilirlik ilkelerinin operasyonel düzeyde uygulanmasını sağlayan başlıca araçlardan biri akıllı madenciliktir. Yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), otomasyon ve veri analitiği gibi ileri teknolojilerin bütünleşmesine dayanan bu dijital dönüşüm yaklaşımı, madencilik faaliyetlerinde verimlilik, iş güvenliği ve çevresel performansı artırmayı amaçlamaktadır (Choi, 2023). Bu entegrasyon sayesinde geleneksel madencilik uygulamaları veri odaklı sistemlere evrilmekte, karar verme süreçleri hızlanmakta ve faaliyetler daha şeffaf, izlenebilir ve etkin biçimde yönetilebilmektedir.

Jeolojik açıdan karmaşık ve ekolojik hassasiyeti yüksek Çan ilçesi ve çevresi gibi bölgeler, sürekli ve yüksek çözünürlüklü bir takibi gerektirmekte; bu da dijital dönüşüm araçlarının etkinliğini daha da belirgin kılmaktadır. İHA

destekli yüksek çözünürlüklü haritalama, CBS tabanlı üç boyutlu modelleme ve gerçek zamanlı çevresel izleme yöntemleri bu kapsamda tercih edilen uygulamalardır. Söz konusu yöntemlerin veri hassasiyetinin artırılmasına, olası çevresel etkilerin izlenmesine ve iş sağlığı ve güvenliği standartlarının uygulanmasına katkı sağladığı görülmektedir. Bu çerçevede bölüm, Çan ilçesini çevresel, ekonomik, sosyal ve enerji sürdürülebilirliği boyutlarıyla ele almaktadır.

Çevresel Sürdürülebilirlik: Asit kaya/meden Drenajı Yönetimi ve Rehabilitasyon

Madencilik faaliyetlerinden bağımsız, yüzeye yakın sülfürlü jeolojik birimlerin atmosferik koşullara maruz kalarak doğal oksidasyonla suyun pH değerini düşürmesi, asit kaya drenajı (AKD) olarak tanımlanmaktadır (Karadeniz, 2008). Buna karşılık, asit maden drenajı (AMD) ise madencilik faaliyetleri neticesinde pirit vb. sülfürlü mineralleri içeren kayaların yüzey alanının genişleyerek oksijen, su ve mikroorganizmalara (*Acidithiobacillus ferrooxidans* vb.) maruz kalmasıyla oksidasyon süreçlerinin hızlanması sonucu ortaya çıkan, düşük kaliteli drenaj oluşumuyla karakterize kompleks bir biyojeokimyasal süreçtir (Şanlıyüksel Yücel vd., 2016).

Çan, hidrotermal alterasyona uğramış volkanik kayaların oksidasyonundan kaynaklanan AKD ile linyit madenciliği faaliyetleri sonucu gelişen AMD sorunlarının eş zamanlı olarak gözlemlendiği bölgelerden biridir. Şanlıyüksel Yücel (2013) tarafından, ilçenin Muratlar, Halılağa, Keçiağılı, Hacıkasım ve Hacıbekirler köylerini kapsayan sahada yürütülen hidrojeokimyasal çalışmalarda, su kaynaklarının pH değerinin 3,47 ile 7,47 (ortalama 4,96) arasında değiştiği, EC değerinin 2840 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ 'ye ve As içeriğinin 92,9 $\mu\text{g}/\text{l}$ 'ye kadar yükseldiği saptanmıştır. Bölgedeki benzer bulgular diğer çalışmalarda da desteklenmektedir: Şengüenalp (2009), Tepeköy'de örnekleme

yaptığı su kaynağının As konsantrasyonunu 45,6 $\mu\text{g}/\text{l}$ olarak raporlamıştır. Baba vd. (2012) ise Muratlar'da alterasyon zonlarından alınan kayaç örneklerinde 735,7 mg/kg As içeriği tespit etmiş; yüksek konsantrasyonun ana kaynağı olarak arsenopirit (FeAsS), realgar (AsS) ve orpiment (As_2S_3) minerallerine işaret ederek, bu birimlerle etkileşimli sondaj sularında As içeriğinin 150 $\mu\text{g}/\text{l}$ 'ye ulaştığını bildirmiştir. Arsenik, Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC, 2012) tarafından kanserojen olarak sınıflandırılmıştır; içme sularında bulunması durumunda uzun dönemde önemli sağlık riskleri oluşturabilmektedir. Bu doğrultuda, yönetmeliklerde (İTASHY, 2016; WHO, 2022) önerilen As limit değerinin (10 $\mu\text{g}/\text{l}$) belirgin biçimde üzerinde olan kaynakların içme suyu olarak kullanılmaması ve su kalitesinin düzenli olarak izlenmesi önem taşımaktadır.

İşletme faaliyetleri sona eren Çan'daki bazı kömür sahalarında rehabilitasyon süreçlerinin uygulanmadığı saptanmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve Baba, 2013). Açık işletme yöntemiyle bozulan topografik yapıda oluşan derin çukurluklar, zamanla yüzeysel drenaj ve yer altı sularının sızmasıyla dolmuştur. Sahada yüzlek veren kömür damarları, altere volkanik kayaçlar ve pasalar içerisindeki sülfür minerallerinin oksidasyonu, ortamda asidi nötrleştirici minerallerin bulunmaması, bakteri faaliyetleri ve coğrafi etmenler gibi birçok faktör sonucunda sahada asit maden gölleri oluşmuştur (Şanlıyüksel Yücel, 2013; Şanlıyüksel Yücel vd., 2016). Etili kömür sahasında bulunan 9 adet asit maden gölü, bölgeyi Türkiye'de bu oluşumların bilinen en yoğun sahalarından biri konumuna getirmektedir (Şanlıyüksel Yücel vd., 2014). Bu göllerde düşük pH değeri (3,09) ile yüksek SO_4^{2-} (4740 mg/l) ve metal (Fe: 389 mg/l, Al: 321 mg/l, Mn: 165 mg/l, Zn: 10 mg/l ve Ni: 2 mg/l) konsantrasyonu saptanmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017). Asit maden drenajı/gölleri, yakın ve uzak çevresinde yer alan alıcı ortamlar üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı olarak çok boyutlu çevre sorunlarına yol açmaktadır.

Bu nedenle, Çan'daki AMD kaynaklı çevresel risklerin izlenmesi ve azaltılması amacıyla farklı yöntemler araştırılmıştır.

Şanlıyüksel Yücel ve Yücel (2017), İHA (hexacopter) kullanarak Etili ve Çomaklı kömür ocaklarındaki maden göllerine ait yüksek çözünürlüklü (1-6 cm) ortofotolar üretmiş ve *Structure from Motion* tekniği ile sahanın üç boyutlu modellerini oluşturmuştur. CORS istasyon ağına bağlı RTK-GNSS ölçümleri ile koordinatları belirlenen yer kontrol noktaları sayesinde yüksek konumsal doğruluk elde edilen çalışmada, maden göllerinin toplam alanı Etili sahasında 13,2 ha, Çomaklı sahasında ise 16,7 ha olarak hesaplanmıştır. Çalışma, İHA teknolojisinin sunduğu düşük maliyetli ve hızlı veri üretim kapasitesinin, antropojenik etkilerle dinamik değişim gösteren maden sahalarının morfolojik gelişimini izlemede etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

İleri ve Şanlıyüksel Yücel (2020) tarafından, Etili kömür ocağındaki asit maden gölünden alınan su örneklerinin arıtımında uçucu küllerin etkinliği laboratuvar ölçekli kesikli (batch) testlerle incelenmiştir. Çalışmada, uçucu külün özgül yüzey alanını ve dolayısıyla metal adsorpsiyon kapasitesini artırmak amacıyla, 20 kHz'lik bir ultrasonik prob ve 40 kHz'lik bir ultrasonik banyo kullanılarak gerçekleştirilen ultrases destekli modifikasyon uygulanmıştır. Metal giderimi için optimum koşulların belirlenmesi sürecinde ultrasonik frekans, adsorban dozu, temas süresi, pH ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip modifiye uçucu küllerin kullanımı, AMD kaynaklı metal kirliliğinin (Fe, Al, Zn, Co, Ni ve Cu) gideriminde ekonomik bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Modifiye uçucu kül/AMD oranının 1:10, temas süresinin 120 dk ve başlangıç pH'nın 5 olduğu koşullarda, metal konsantrasyonlarının Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2015) tarafından belirlenen deşarj limitlerinin altına düşürüldüğü tespit edilmiştir.

Şanlıyüksel Yücel ve İleri (2020) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada, Etili kömür ocağında AMD oluşumuna neden olan pasalar ile uçucu küllerin uygun koşullarda karıştırılmasının, çevresel risklerin azaltılması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Jeokimyasal analizler ve asit-baz hesaplama testleri sonucunda, pasaların asit üretim potansiyelinin etkin bir şekilde sınırlandırılması için ağırlıkça en az %30 oranında uçucu kül ile karıştırılması gerektiği saptanmıştır. Belirlenen optimum karışım oranına göre gerçekleştirilen liç testleri sonucunda, sızıntı suyunun pH değerinin yükseldiği; buna karşın EC, sülfat ve metal (Al, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn) konsantrasyonlarının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Deneylerin 24. saatinden itibaren sızıntı suyundaki metal konsantrasyonlarının Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2015) tarafından belirlenen limit değerlerinin altına düştüğü ve 720 saatlik izleme periyodu boyunca bu kararlı yapının korunduğu belirlenmiştir. Uçucu külün içerdiği yüksek CaO, asiditeyi nötralize edip pH değerini yükseltirken, sahip olduğu ince taneli yapı, sülfürlü minerallerin yüzeylerini kaplayarak oksidasyon süreçlerini fiziksel bir bariyerle sınırlandırmaktadır. Laboratuvar ölçekli bu bulgular, atıkların birlikte değerlendirilmesine dayalı ekonomik ve sürdürülebilir rehabilitasyon yaklaşımlarının bölgedeki çevre sorunlarının çözümünde uygulanabilir olduğuna işaret etmektedir. Yöntemin sahadaki uzun süreli etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamak amacıyla pilot ölçekli saha uygulamalarının gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Bölgede madencilik faaliyetleri kaynaklı AMD'ye ek olarak, jeotermal sistemlerde de benzer olası bir sülfat kökeni belirsizliği söz konusudur. Deniz (2010) tarafından jeotermal alanların yakın çevresindeki alterasyon zonlarında saptanan jarosit (Alibeyçiftliği), kaolinit (Karalıca) ve illit/halloysit (Bardakçılar) gibi mineralojik bulgular, bölgedeki jeotermal kaynaklardaki sülfat baskınlığının büyük ölçüde

derin/paleo-hidrotermal alterasyon sürecinden kaynaklandığını göstermektedir. Benzer şekilde, Çan'ın batısında 250 m derinliğe kadar incelenen örneklerdeki bol miktardaki piritin asit-sülfat tipi hidrotermal alterasyon süreçleriyle oluştuğu belirlenmiştir (Yılmaz, 2003; Yalçın, 2007). Nitekim Karalıda ile Tepeköy arasında yer alan Hamamtepe sileks ocağında, birbirine yakın iki ocaktan (H1, H2) alınan alünit örnekleri farklı $\delta^{34}\text{S}$ değerleri vermiştir: H1'de -2,7/-3,3‰ (magmatik-hidrotermal), H2'de -19,6‰ (mikrobiyal/sedimanter köken; Ünal Ercan vd., 2022b). Karalıda jeotermal kaynağının pH (6,56) ile Fe (350 µg/l), As (100 µg/l), Mn (600 µg/l) ve SO_4^{2-} (1020 mg/l) içerikleri (Çizelge 2); asit maden gölündeki kuvvetli asidik ve yüksek metal yüklü karakterden (pH: 3,09; Fe: 389.567 µg/l; As: 12 µg/l; Mn: 165.520 µg/l; SO_4^{2-} : 4.740 mg/l; Şanlıyüksel Yücel ve Yücel, 2017) oldukça farklıdır. Jeotermal kaynağın nötre yakın pH'ı ile düşük Fe ve Mn içeriğine karşın yüksek As içermesi, jeokimyasının AKD/AMD olası etkileşiminden ziyade hidrotermal minerallerle (arsenopirit, realgar, orpiment; Baba vd., 2012) ilişkili derin kökenli bir zenginleşmeyle daha uyumlu olduğuna işaret etmektedir. Jeotermal kaynaklardaki sülfat kaynağının belirlenmesinde tek başına $\delta^{34}\text{S}$ - SO_4^{2-} yeterli olmayabilir. Hamamtepe H1/H2 örneğinde görüldüğü gibi, birbirine yakın konumlarda dahi çok farklı $\delta^{34}\text{S}$ imzalarına sahip birden fazla olası kükürt kaynağı bulunmaktadır. Pirit oksidasyonu sırasında kükürt izotop fraksiyonlanmasının ihmal edilebilir düzeyde olması ve üretilen sülfatın kaynak piritin $\delta^{34}\text{S}$ imzasını büyük ölçüde koruması (Şanlıyüksel Yücel vd., 2016), ölçülen değerlerin doğru kaynağa atfedilmesini kolaylaştırır da hangi kaynağın baskın olduğunu tek başına belirlemeye yetmez. Bu nedenle, $\delta^{18}\text{O}$ - SO_4^{2-} ile $\delta^{18}\text{O}$ - H_2O arasındaki kütle dengesi ilişkisinin, Fe(II)/Fe(III) oranı gibi tamamlayıcı jeokimyasal göstergelerle birlikte değerlendirildiği çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

Bu teknolojik ve jeokimyasal çözüm önerilerine ek olarak, bölgedeki maden sahalarının rehabilitasyonu, işletmenin çevresel ayak izini kalıcı olarak azaltmayı hedefleyen bölgesel çevre yönetimi yaklaşımının önemli bir bileşenidir. Bu doğrultuda, TKİ ÇLİ bünyesindeki kömür ocaklarında 1991-2023 yılları arasında gerçekleştirilen dekapaj ve üretim faaliyetleri sonucunda bozulan topoğrafyanın iyileştirilmesi amacıyla, toplam 1.335 ha alanda 1.917.088 adet fidan dikimi gerçekleştirilmiştir. Bölgenin ekolojik koşullarına uygun olarak yapılan ağaçlandırma çalışmalarında kızılçam, akasya ve fıstıkçanı gibi ağaç türlerinin yanı sıra sarısalkım ve lavanta gibi bitki türleri de tercih edilmiştir (TKİ, 2026). Bu rehabilitasyon uygulamalarının toprak stabilitesini artırdığı, yüzey akışı ile erozyon süreçlerini sınırladığı ve AMD oluşum riskini azalttığı değerlendirilmektedir.

Ekonomik ve Sosyal Sürdürülebilirlik

Çanakkale İl Özel İdaresinin 2024 yılı verilerine göre, Çan ilçesinde toplam 38 adet aktif maden ruhsatı bulunmaktadır. Bölgedeki madencilik faaliyetleri; kalker ve taş ocakçılığının yanı sıra linyit odaklı enerji üretimini, seramik sanayisinin temel girdisi olan endüstriyel hammaddelerin çıkarımını ve metalik maden işletmeciliğini kapsamaktadır. Bölge ekonomisinin temel bileşenlerinden biri olan bu sektör, Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) 2024 yılı verilerine göre ilçede (büyük çoğunluğu özel sektörde olmak üzere) 6.937 kişiye istihdam sağlamaktadır. Sektörün yarattığı bu etki yalnızca doğrudan istihdamla sınırlı kalmamakta, yerel nüfusun gelir düzeyini ve tüketim yapısını belirleyerek bölgesel ekonomik canlılığı tetikleyen ana unsur olarak öne çıkmaktadır.

Sektördeki iş gücünün demografik yapısı incelendiğinde, toplam çalışanların %3,53'ünü (245 kişi) kadınların oluşturması, sektörün büyük ölçüde erkek iş gücüne dayalı olduğunu ortaya

koymaktadır. Küresel madencilik sektöründe kadın çalışan oranının %10 ile %15 arasında değiştiği (Bansal vd., 2024) göz önüne alındığında, yerel verilerin küresel ortalamanın oldukça altında kaldığı görülmektedir. Madencilik sektörünün otomasyon ve dijitalleşme ile dönüştüğü bu süreçte, kadınların bilim, teknoloji, mühendislik ve matematik (STEM) alanındaki düşük temsiliyeti kariyer ilerlemesinin önündeki büyük engellerden biri olarak tanımlanmaktadır (IGF, 2023; Ackah-Baidoo, 2025). Bu tablo, sosyal sürdürülebilirlik kapsamında sadece farkındalık artırmanın ötesinde teknik kapasiteyi geliştirecek ve kadın istihdamını tedarik zincirinin her aşamasında teşvik edecek yapısal dönüşümlere duyulan ihtiyaca işaret etmektedir.

Demografik tabloyu tamamlayacak şekilde, ilçenin genel nüfus verileri de sektörel bağımlılığın boyutunu ortaya koymaktadır. Çan ilçesinin 2024 yılı toplam nüfusu 46.920 kişidir (TÜİK, 2025). İlçede doğrudan madencilik sektöründe çalışan nüfus, toplam nüfusun %14,8'ini oluşturmaktadır. Aktif çalışma çağındaki (15-64 yaş) nüfus baz alındığında, bu istihdam oranının %20-25 aralığına yaklaşabileceği tahmin edilmektedir. Sektörün yarattığı doğrudan istihdamın yerel hizmet ve tedarik sektörleri üzerindeki çarpan etkisi (World Bank, 2025), bölgede çok daha geniş bir istihdam ekosistemi ve ekonomik canlılık oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Bu göstergeler, Çan ekonomisinin madencilik faaliyetlerine yönelik yüksek düzeyde sektörel bağımlılığını ortaya koyarken, bu sektörün bölgesel sürdürülebilirlik açısından önemli bir role sahip olduğuna işaret etmektedir.

Ancak tek bir sektöre olan bu yüksek bağımlılık, rezerv tükenmesi, emtia fiyatlarındaki dalgalanmalar veya sınırda karbon düzenleme mekanizması gibi küresel faktörler karşısında sosyal kırılganlık riskini artırmaktadır. Çan ilçesinde madencilik faaliyetlerinin uzun vadede sürdürülebilirliğinin sağlanması; iş gücü çeşitliliğinin artırılması, kadın istihdamını

teşvik eden mesleki eğitim programlarının yaygınlaştırılması ve madencilik gelirlerinin bölgesel kalkınma projelerine yönlendirilmesi gibi stratejilere bağlıdır. Bu tür yaklaşımlar, sektörün yalnızca ekonomik büyüme sağlayan bir alan olmasının ötesinde, yerel toplulukların sosyal dayanıklılığını güçlendiren bir kalkınma aracına dönüşmesine katkı sağlayabilir.

Bu stratejilerden bir diğeri işletme ömrünü tamamlamış maden sahalarının rehabilitasyon süreçlerinin jeoturizm ve jeomiras temelli arazi kullanım yaklaşımlarıyla ele alınmasıdır. Maden turizmi, jeoturizm ve endüstriyel turizmle ilişkili, hızla gelişen bir turizm alt sektörü olarak tanımlanmaktadır (Rybár ve Hronček, 2017; Jelen, 2018). Rehabilit edilen maden sahalarının rekreasyon ve eğitim alanlarına dönüştürülmesi, madencilik faaliyetlerinin sona ermesiyle oluşabilecek sosyo-ekonomik daralma riski taşıyan bölgeler için yeni bir dönüşüm fırsatı sunmaktadır. Sahaların, uzun dönemli jeokimyasal stabilitenin izlendiği çevresel gözlem alanları olarak planlanması, bölgenin hem bilimsel araştırmalar hem de genel kamuoyu için bir ilgi odağı haline gelmesine olanak tanıyacaktır.

Madencilik kaynaklı sosyoekonomik yapının ötesinde, bölgenin enerji kaynağı çeşitlendirilmesi de sürdürülebilir kalkınma vizyonunun tamamlayıcı bir bileşenini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Çan ilçesindeki jeotermal kaynaklar, yalnızca termal ve sağlık turizmi uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp, çok yönlü bir bölgesel kalkınmayı destekleyebilecek bir jeotermal kullanım potansiyeli taşımaktadır. Türkiye’de 40-45 °C gibi düşük sıcaklıklara sahip jeotermal suların ısı pompasına gerek duyulmadan doğrudan alan ve bölgesel ısıtmada kullanıldığı (Mertoğlu vd., 2021) göz önüne alındığında, Bardakçılar sahasındaki akışkan sıcaklığı (59-67 °C) bu tür bir uygulama için uygun değerlerdedir. Bu sahanın bölgesel ısıtma amaçlı kullanımının kaynak potansiyeli açısından değerlendirilmesi için jeotermal kaynak (59 °C, ~3 l/sn) ve sondaj (67

°C, 95 l/sn; Bülbül vd., 2022) verileri ile bölgenin 1929-2025 dönemi yıllık ortalama sıcaklık değeri (15,2 °C; MGM, 2026) referans alınarak yaklaşık termal güç hesaplanmıştır ($P = Q \times \rho \times C_p \times \Delta T$; Mertoğlu vd., 2021; referans sıcaklık olarak bölgenin ortalama sıcaklık değeri alınmış olup, hesaplama kaynağın teorik ısıl potansiyelini yansıtmaktadır). Kaynak verileriyle bu değer ~0,55 MWt sonucunu verirken, sondaj verileriyle ~20,6 MWt olarak hesaplanmıştır. Ancak bu maksimum değer, sürdürülebilir bir üretim testiyle henüz doğrulanmadığından sahanın kesin ısıl kapasitesi olarak değil, potansiyel büyüklüğüne işaret eden bir üst sınır olarak değerlendirilmelidir.

Düşük-orta entalpili jeotermal kaynakların kademeli kullanımı, ısıl potansiyelin her sıcaklık seviyesinde en üst düzeyde değerlendirilmesini sağlayan bir yaklaşımdır; jeotermal akışkan bir uygulamada ısını kısmen bıraktıktan sonra, daha düşük sıcaklık gerektiren bir sonraki sürece yönlendirilerek kaynağın enerji potansiyelinden aşamalı olarak yararlanır (Rubio-Maya vd., 2015). Bu yaklaşımın en yaygın örneklerinden biri ABD'nin Klamath Falls (Oregon) bölgesinde uygulanmakta olup, 93 °C'lik jeotermal akışkan sırasıyla sera ısıtması, akuakültür ve sulama amacıyla kademeli olarak kullanılmaktadır (Rubio-Maya vd., 2015). Bölgedeki jeotermal kaynaklar arasında elverişli sıcaklık ve debi değerlerine sahip olan Bardakçılar sahası, ölçülen kuyu sıcaklığı itibarıyla Zhang vd. (2025)'in genel sıcaklık-uygulama sınıflandırmasında bölgesel ısıtma ve evsel sıcak su için önerilen 60-100 °C aralığına girmektedir. Bu özelliğiyle saha, kademeli bir düzenlemeyle planlanabilir bölgesel ısıtma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu tür jeotermal yatırımların ekonomik uygulanabilirliğinin artırılması için yer altı ısı çıkarım verimliliğinin geliştirilmesi ve sistem maliyetlerinin düşürülmesine yönelik ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Zhang vd., 2025).

Bölgesel ısıtmanın ekonomik olarak değerlendirilmesinde gözetilmesi gereken bir diğer unsur ise sismik risktir: Çan-Merkez ve Karalıda jeotermal kaynaklarında 1953 Yenice-Gönen depremi sonrasında gözlenen kalıcı debi azalması (Müller, 1955), büyük depremlerin jeotermal sistemlerin üretim kapasitesini uzun vadede geri dönüşü olmayan biçimde azaltabileceğini ve bu tesislerin işletme ekonomisinin sismik risk faktörü göz önünde bulundurularak planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Söz konusu riskler uygun mühendislik ve izleme stratejileriyle yönetildiğinde, kademeli kullanımın bölgesel kalkınmaya olan katkıları da bu sistemlerin önemini artırmaktadır. Jeotermal kaynaklı bölgesel ısıtma sistemleri ithal fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak toplumlar için enerji bağımsızlığı ve güvenliğini güçlendirmektedir; bunun yanı sıra bu sistemlerin geliştirilmesi ve işletilmesi mühendislik, inşaat, bakım ve idari hizmetler gibi farklı sektörlerde istihdam yaratmakta, bu projelere yapılan yatırımlar da kırsal ve kentsel alanlarda yerel ekonomileri canlandırarak ekonomik kalkınmayı teşvik etmektedir (Kassem ve Moscariello, 2024).

Kalkınma odaklı bulgulara ek olarak, jeotermal akışkanın kimyasal içeriği de ayrı bir inceleme konusunu oluşturmaktadır. Jeotermal akışkanın yalnızca bir ısı taşıyıcısı değil, aynı zamanda çözünmüş elementler açısından potansiyel bir maden kaynağı olarak ele alınması, bölgenin kaynak çeşitliliği stratejisine çok boyutlu bir perspektif kazandırmaktadır. Çan-Merkez ve Karalıda jeotermal kaynaklarında tespit edilen Li, B ve Sr konsantrasyonlarının, AB kritik hammaddeler listesinde (Grohol ve Veeh, 2023) yer alan elementlerden olması bölgesel önemini gündeme getirmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik, kaynakların rasyonel kullanımını ve kârlılık marjlarının fizibilite eşiğini aşmasını gerektirir. Bölgedeki element anomalilerinin görece düşük konsantrasyonu nedeniyle kısa ve orta vadede ekonomik bir madencilik yatırımından ziyade, rezervuar kökenini ve hidrojeokimyasal

süreçleri aydınlatan önemli birer jeokimyasal izleyici olarak değerlendirilmesi, Avrupa veri setiyle (Inzillo vd., 2026) kıyaslandığında daha gerçekçi bir yaklaşımdır.

Sürdürülebilirliğin çevresel ve sosyal boyutu, yerel ekosistemin ve toplum sağlığının korunmasını gerektirmektedir. Alibeyçiftliği, Çan-Merkez ve Karailıca jeotermal kaynaklarında yüksek konsantrasyonda tespit edilen As ve Mn, 2023 yılında AB kritik hammaddeler listesine eklenmiş olsa da bu sınıflandırma ekonomik önem ve arz riski kriterlerine dayandığından, söz konusu elementlerin toksikolojik risk profiliyle doğrudan bir ilişkisi bulunmamaktadır (Grohol ve Veeh, 2023). Dolayısıyla mevcut lokal sistem koşullarında bu elementler ekonomik bir hedeften ziyade titizlikle yönetilmesi gereken birer çevresel risk faktörü olarak değerlendirilmelidir. Bölgedeki jeotermal enerji faaliyetlerinin güvenli sürdürülebilirliği, bu elementlerin alıcı ortama deşarj edilmeden önce çevresel bir izleme sürecine tabi tutulmasına ve uygun arıtma/reenjeksiyon prosedürlerinin uygulanmasına bağlıdır.

Enerji Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi

Çan ilçesindeki enerji üretim faaliyetlerine bağlı olarak, yüksek hacimli bir atık yönetimi ihtiyacı doğmaktadır. Çanakkale Çevre Durum Raporu 2024 yılı verilerine göre, ilçedeki iki termik santralin yıllık toplam kömür tüketimi yaklaşık 4 milyon tona ulaşmaktadır. Bu tesislerde enerji üretim süreci sonucunda açığa çıkan toplam yıllık uçucu kül miktarı ise aynı raporda 1.115.369 ton olarak kaydedilmiştir. Çanakkale genelinde (Çan ilçesi dahil beş termik santral için) hesaplanan verilere göre, toplam kül atığının %27,33'ü geri kazanılmakta, %72,67'si ise düzenli depolama yöntemiyle bertaraf edilmektedir (ÇÇŞİDİM, 2025); ancak bu oranın Çan ilçesi özelinde farklılık gösterip göstermediğine dair ayrı bir veri raporda yer almamaktadır.

Bu genel tablonun yanı sıra, ilçede faaliyet gösteren pulverize kömür yakan termik santralde oluşan uçucu kül ve sentetik alçı taşının (baca gazı desülfürizasyonu-FGD-jipsi), 2020 yılından itibaren toplamda 1,3 milyon tonunun ihraç edildiği rapor edilmiştir (ODAŞ, 2024). Bu ihracata ek olarak, 2024 yılında santral ile bir çimento fabrikası arasında, toplam 2 milyon ton uçucu kül tedarikini kapsayan uzun vadeli bir iş birliği anlaşması imzalanmıştır (Akçansa, 2025; ODAŞ, 2025). Söz konusu iş birliği, endüstriyel simbiyoz yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmekte olup, uçucu külün alternatif hammadde olarak çimento ve hazır beton üretim sürecine entegre edilmesini içermektedir. Bu kapsamda, 2025 yılında devreye alınan kül değirmeni yatırımıyla birlikte tesisin uçucu kül üretim kapasitesi artırılmış; bu sayede piyasaya arz edilebilir ürün niteliğine daha yüksek oranda dönüştürülen uçucu kül, çimento ve hazır beton üreticilerine sunulmaktadır (ODAŞ, 2025).

Uçucu küllerin farklı sektörlerde kullanımı depolama sahası ihtiyacının azaltılması ve olası çevresel risklerin kontrol altına alınması açısından önem taşımaktadır. Uçucu küller; zeolit sentezi, polimer kompozitler, tarımsal toprak ıslahı ve atık su arıtımı gibi farklı sektörel uygulamalarda da ekonomik bir değer olarak ön plana çıkmaktadır (Kuznia, 2025). Ayrıca kapatılmış yer altı maden sahalarında uygulanan uçucu kül enjeksiyonu tekniklerinin, atık bertarafı ile arazi rehabilitasyonunu eş zamanlı sağlayarak AMD risklerinin azaltılmasına katkı sunabileceği bildirilmektedir (Ahmaruzzaman, 2010). Bölgeden alınan örneklerle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çalışmada bu yaklaşımın etkinliği ampirik olarak doğrulanmıştır (Şanlıyüksel Yücel ve İleri, 2020). Bu çerçevede, AMD odaklarının rehabilitasyonunda ve pasa stabilizasyonunda uçucu kül kullanımına yönelik uygulamalar, Çan özelinde madencilik-enerji sektörleri arasında döngüsel bir kaynak yönetimi modeli kapsamında uygulanabilir.

Bölgedeki endüstriyel simbiyoz uygulamaları, ilçe'deki enerji-maden-sanayi etkileşiminin döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda bütüncül bir planlamayla ele alınması gerekliliğine işaret etmektedir. Atıkların geri kazanımıyla başlayan bu süreç, rehabilite edilen maden alanlarının yeniden ekonomiye kazandırılmasıyla tamamlanmaktadır. TKİ ÇLİ sahasında madencilik faaliyeti tamamlanan ve rehabilite edilen alan üzerine 2024 yılında kurulan, 5 MW kurulu güce sahip güneş enerjisi santrali, bu yaklaşıma somut bir uygulama örneğidir. Kurum yetkililerinden alınan güncel verilere göre 80.000 m² alana yayılan tesisin 2025 yılı toplam elektrik üretimi 7.548 MWh olarak gerçekleşmiş; bu üretimin %28'i (2.117 MWh) işletmenin öz tüketimine, %72'si (5.431 MWh) ise şebekeye verilmiştir. Bu uygulama; atık yönetimi, arazi rehabilitasyonu ve yenilenebilir enerji üretimini bir arada ele alan, karbon ayak izinin azaltılması hedefleriyle uyumlu bir model olarak değerlendirilebilir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Biga Yarımadası'nın jeoekonomik açıdan öne çıkan bir konumunda yer alan Çan ilçesi, morfolojik ve tektonik özellikleri, jeotermal kaynakları ve maden yataklarıyla tarihsel süreçten günümüze etkin bir yerleşim ve üretim merkezi niteliğini sürdürmektedir. Bu çalışmada, Çan ve yakın çevresinin doğal kaynak potansiyeli, sürdürülebilir kaynak yönetimi perspektifi kapsamında değerlendirilmiş ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır.

Bölgede yer alan düşük-orta entalpili jeotermal kaynaklar (Alibeyçiftliği hariç) hâlihazırda termal ve sağlık turizmi amacıyla kullanılmaktadır. Bardakçılar ve Karailıca jeotermal alanlarına ait kalsedon jeotermometre verileri, ölçülen kuyu içi sıcaklıklarından (sırasıyla 67 °C ve 61,9 °C) daha yüksek, 70 °C'nin üzerindeki rezervuar sıcaklıklarına işaret etmektedir. Bu tahmini sıcaklıklar, söz konusu

kaynakların farklı kullanım alanlarında kademeli olarak değerlendirilme potansiyeli taşıdığını göstermekle birlikte, işletme parametrelerinin kesinleştirilmesi için uzun süreli/sürdürülebilir üretim testleriyle doğrulanması gerekmektedir. Bununla birlikte, Alibeyçiftliği, Çan-Merkez ve Karailıca kaynaklarında tespit edilen yüksek As ve Mn konsantrasyonları, bu suların içme suyu olarak kullanılmasını engellemekte ve alıcı ortama deşarj öncesi çevresel izleme ile arıtma süreçlerini zorunlu hale getirmektedir. Karailıca ve Çan-Merkez akışkanlarında belirlenen Li, B ve Sr içerikleri ise görece düşük konsantrasyonları nedeniyle kısa vadede ekonomik bir geri kazanım hedefinden çok, hidrojeokimyasal süreçleri aydınlatan jeokimyasal izleyiciler olarak değerlendirilmelidir.

Yaklaşık 92,5 milyon ton linyit rezervine sahip olan bölge, iki termik santral ile yerel elektrik enerjisi üretiminde rol üstlenmektedir. Enerji hammaddelerinin yanı sıra bölge, seramik sanayisinin temel girdileri olan kaolin, sileks ve feldispat gibi endüstriyel hammadde rezervleriyle de öne çıkmaktadır. Türkiye, küresel feldispat üretiminin %32'sini gerçekleştirmekte ve AB ihtiyacının %51'ini tek başına karşılamaktadır; bu nedenle feldispat 2023 yılında AB kritik hammaddeler listesine girmiştir (Grohol ve Veeh, 2023). Türkiye'de 2024 sonu itibarıyla 190 feldispat işletme ruhsatlı sahası bulunmaktadır; bunlardan 7'si Çanakkale'de (Durmaz vd., 2026), 2'si ise Çan'dadır. Türkiye genelinde tüvenan olarak doğrudan değerlendirilebilen yüksek kaliteli feldispat rezervlerinin hızla tükenmesi nedeniyle geriye daha düşük kaliteli rezervlerin kaldığı bildirilmektedir (Durmaz vd., 2026). Bu durum, feldispatın kritik hammadde statüsüyle birleştiğinde arz güvenliği açısından taşıdığı önemi daha da artırmaktadır. Bu veriler ışığında, Çan ve çevresindeki feldispat kaynaklarının saha ölçeğinde karakterize edilmesi ve arz güvenliği perspektifinden ayrıca değerlendirilmesi önerilmektedir.

Kumarlar sahasında belirlenen Sb ve Ge içerikleri (Bozkaya ve Banks, 2015), Halılağa sahasının batı skarn zonundaki yüksek Zn tenörü (%16,76; Doerksen vd., 2015) ve kaynak tahminlerine dahil edilen Mo tenörleri (%0,0057-0,0087; Doerksen vd., 2015; Sánchez vd., 2016) bölgedeki kritik mineral potansiyeline işaret etmektedir. USGS'in (2026a) kritik mineraller listesinde yer alan Re, Te, Ga ve In gibi diğer elementlerin yan ürün geri kazanım potansiyeli ise metalik maden yataklarında doğrulanmayı bekleyen bir araştırma alanıdır. Ayrıca Mo ve Zn, ETKB (2025) raporunda hem stratejik hem de kritik maden olarak tanımlanmaktadır. Bu yataklarda yapılacak detaylı mineralojik ve jeokimyasal araştırmalar ile kritik minerallerin belirlenmesi, maden işletmelerinin ekonomik sürdürülebilirliğini artırmanın yanı sıra sektörel katma değerini yükseltilmesine de katkı sağlayacaktır.

Bölgedeki madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliği, yalnızca ekonomik potansiyelle değil, çevresel risklerin yönetimiyle de ele alınması gereken bir konudur. Yüksek kükürt içerikli kayaçların ve pasaların oksidasyonu sonucu gelişen AKD/AMD, su kaynaklarının As, Fe ve Al gibi elementlerle kirlenmesine yol açarak ekosistem üzerinde çevresel riskler oluşturmaktadır. Bu kapsamda, termik santral atığı uçucu küllerin asidik drenaj nötralizasyonu ve pasa oksidasyonunun sınırlandırılmasındaki etkinliğinin saha ölçeğinde araştırılması önemlidir. Uçucu küllerin kullanım alanlarının artırılması, atık hacminin azaltılması açısından döngüsel ekonomi odaklı çözüm seçenekleri arasında yer almaktadır.

Çevresel risklerin yönetiminin yanı sıra, bölge ekonomisinin sektörel çeşitlendirilmesi de sürdürülebilirlik hedefleri açısından önem taşımaktadır. Rehabilite edilen linyit sahasında güneş enerjisi santrali kurulması gibi uygulamalar bu alanları yenilenebilir enerji üretimine kazandırırken, jeoturizm uygulamalarının

geliştirilmesi söz konusu sahaların sosyo-ekonomik açıdan yeniden değerlendirilmesine olanak sunmaktadır. Bununla birlikte ilçe ekonomisinin %14,8 oranında madencilik sektörüne bağımlı olması, sektörel çeşitlendirme gereksinimini ortaya koymaktadır. Bu bağımlılığın azaltılması sürecinde toplumsal cinsiyet eşitliği de gözetilmesi gereken bir diğer boyuttur. Sektördeki kadın istihdam oranının (%3,53), küresel madencilik sektörü ortalamasının (%10-15; Bansal vd., 2024) oldukça altında kalması, sosyal sürdürülebilirlik açısından geliştirilmesi gereken bir alana işaret etmektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, bölgenin sürdürülebilir kaynak yönetimi ekseninde gelişimini desteklemek amacıyla aşağıdaki öncelikli öneriler sunulmaktadır:

(i) Başta Kocabaş Çayı olmak üzere önemli su kaynaklarında ve madencilik faaliyetlerinde gerçek zamanlı dijital izleme sistemlerinin ve İHA tabanlı akıllı uygulamaların operasyonel süreçlere entegre edilmesi,

(ii) Jeotermal enerji potansiyelinin değerlendirilebilmesi için MT/ERT gibi jeofizik yöntemler, yapısal analiz, sıcaklık gradyanı verileri ve hidrojeolojik modelleme ile hedef rezervuar zonlarının belirlenmesi, ardından bu zonlarda derin sondajların planlanması,

(iii) Jeotermal kaynakların konut ısıtma, seracılık ve endüstriyel süreçleri kapsayan kademeli bir kullanım modeliyle planlanarak enerji verimliliğinin artırılması,

(iv) Metalik maden yataklarındaki kritik mineral içeriğinin (Ge, Mo, Zn ve Sb vb.) detaylı mineralojik ve jeokimyasal analizlerle belirlenerek geri kazanım potansiyelinin tekno-ekonomik açıdan değerlendirilmesi,

(v) Termik santral atığı uçucu küllerin kullanım alanlarının çeşitlendirilerek yaygınlaştırılması,

(vi) Rehabilite edilen linyit sahasında hâlihazırda uygulanan 5 MW kurulu güce sahip

güneş enerjisi santrali örneğinin farklı sahalarda da hayata geçirilmesi,

(vii) İnkaya Mağarası gibi bilimsel önemi yüksek sahaların, kazı faaliyetleri tamamlandıktan sonra bölgesel jeomirasın bir parçası olarak koruma-kullanma dengesi gözetilerek jeoturizme kazandırılması,

(viii) STEM alanlarında kadın istihdamını, mesleki eğitimini ve kariyer ilerlemesini teşvik eden politikalarla sektörde kapsayıcı bir iş gücü yapısının oluşturulması.

Sonuç olarak bu çalışma, Çan ilçesinde su-enerji-maden etkileşiminin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Önerilen entegre yaklaşım, bölgenin çevresel açıdan sürdürülebilir bir üretim yapısına geçişini desteklerken, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın temiz enerji, rekabetçi ve yeşil endüstri ile döngüsel ekonomi eylem alanlarıyla uyumunu güçlendirme potansiyeli taşımaktadır.

EXTENDED SUMMARY

Geological conditions and the availability of natural resources have historically played a significant role in determining the location of human settlements. Situated in a geoeconomically prominent part of the Biga Peninsula, the Çan district has maintained its character as an active settlement and production center from historical times to the present day, owing to its morphological and tectonic characteristics, geothermal resources, and rich mineral deposits. In this study, the geothermal energy and mining potential of Çan and its immediate surroundings are examined in light of field observations, hydrogeochemical analyses, current institutional data, and literature findings. The multifaceted relationships between geological factors and the potential for energy, industrial raw materials, and metallic minerals are addressed from a sustainable resource management perspective, encompassing

environmental risk management, circular economy, and inclusive regional development. Furthermore, the study evaluates the district's natural resource potential along the water-energy-mining nexus and presents actionable recommendations prioritizing environmental remediation with economic viability.

The geological basement of the Çan district comprises the Paleozoic Kazdağ metamorphics (Bingöl, 1969) and tectonically bounded, low-grade metasedimentary rocks of probable pre-Triassic age assigned to the Kalabak formation (Krushensky et al., 1980). These units are structurally overlain by the Permian-Middle Triassic Karakaya complex (Bingöl et al., 1973), which is predominantly in tectonic contact with the underlying rocks but locally rests unconformably upon them. The region has been further shaped by the Upper Cretaceous Çetmi melange (Okay et al., 1990), which tectonically overlies the Kazdağ metamorphics and the Karakaya complex; the Oligo-Miocene Evçiler pluton (Öngen, 1978), representing multi-stage products of magmatic activity; and the Çan volcanics (Ercan et al., 1995), which are associated with metallic ore deposits. As magmatic activity declined during the Early-Middle Miocene, the economically important lignite-bearing Çan formation (Hezarfen, 1976) accumulated in tectonically controlled lacustrine basins. It is unconformably overlain by the Pliocene Kulfa formation (Balkış and Yazıcı, 1996) and Quaternary alluvium.

The tectonic framework of the region is governed by the southern branch of the North Anatolian Fault Zone (particularly the Çan-Biga fault zone, Şaroğlu et al., 1987, and the Yenice-Gönen fault, Ketin and Roesli, 1953), which, through its NE-SW-trending right-lateral strike-slip character (Barka and Gülen, 1988), controls both basin morphology and the distribution of geothermal resources and alteration zones. This tectonic regime, which has historically produced destructive earthquakes in 1737 (Ambraseys and

Jackson, 2000) and 1953 (Ketin and Roesli, 1953) and maintains active seismicity today, constitutes a fundamental factor determining the geological evolution and the energy and mineral resource potential of the region.

Within the scope of this study, field investigations in the Çan district were conducted at the geothermal fields in 2024 and at the mining quarries and operations in 2025. Current data on geothermal and mining fields in the region were obtained through official requests submitted to the relevant institutions and through consultations with institutional representatives. The physicochemical properties of the geothermal resources, including temperature, pH, electrical conductivity, and salinity, were measured in situ using a portable multiparameter instrument, while the locations of geothermal resources and mineral deposits were recorded with a handheld GPS device. For the hydrogeochemical analyses, sampling was carried out only at the Karailıca geothermal resource, while data for the other fields were compiled from the literature. The major, minor, and trace element analyses of the collected samples were performed at MTA laboratories using ICP-OES, ICP-MS, and IC instruments. Piper and Schoeller diagrams were used to interpret hydrogeochemical processes, whereas the Na-K-Mg diagram (Giggenbach, 1988) was used to assess the reliability of geothermometer calculations.

Among the goals of sustainable development, geothermal resources stand out for their low operating costs and diverse applications. The Çan geothermal potential is represented by four fields, namely Alibeyçiftliği, Çan-Merkez, Karailıca, and Bardakçılar, with surface temperatures of approximately 31-58.4 °C. During the cold and glacial phases of the Paleolithic, these fields are suggested to have offered potential habitats for early human communities owing to their microclimatic effects (Atabay and Körpe, 2019).

The 1953 Yenice-Gönen earthquake caused a permanent decline in discharge at the Çan-Merkez and Karailıca geothermal systems (Müller, 1955). Examination of borehole data from the geothermal fields shows that, in Çan-Merkez, the Çan-1 well (300 m) yielded 0.6 L/s at 43 °C, whereas the Çan-2 well (100 m) yielded only 0.2 L/s at 28-36 °C (Öktü et al., 1991). In Karailıca, the Eti-1 well (450 m) exhibited a high yield of 2.1-8 L/s at 59.2-61.9 °C (Kahraman et al., 2005), while the nearby Eti-2 well (350 m) yielded only 0.6 L/s at 46 °C. This discrepancy despite close proximity indicates that reservoir productivity is largely governed by local structural and lithological controls. The deepest borehole in the region was drilled at Bardakçılar to a depth of 750 m, yielding fluid at 67 °C with a discharge of 95 L/s (Bülbül et al., 2022).

Alibeyçiftliği water belongs to the Na-SO₄ facies, while Bardakçılar, Karailıca, and Çan-Merkez fall within the Na-Ca-SO₄ facies. This sulfate dominance is attributed to pyrite oxidation within acid-sulfate hydrothermal alteration zones west of Çan (Yılmaz, 2003; Yalçın, 2007), an interpretation corroborated by the identification of jarosite in altered rocks at Alibeyçiftliği (Deniz, 2010). Sulfide oxidation also mobilizes trace elements: As, F⁻, Mn, and B concentrations in the Alibeyçiftliği, Çan-Merkez, and Karailıca waters exceed national (İTASHY, 2016) and international (WHO, 2022) drinking-water limits, rendering these waters unsuitable for potable use and warranting advanced treatment prior to discharge and periodic regional monitoring.

Li concentrations measured in the Karailıca and Çan-Merkez geothermal fluids (1.12 and 1.15 mg/L, respectively) indicate that a certain degree of element enrichment has occurred through prolonged water-rock interaction. A similar interpretation applies to the B (3.9-4.9 mg/L) and Sr (3.6-4.4 mg/L) concentrations measured at Çan-Merkez. However, these element contents remain below not only those of geothermal fields showing high enrichment worldwide, but also

those of Europe's relatively low-enrichment fields (Wang et al., 2025; Zhang et al., 2025; Inzillo et al., 2026). Therefore, in terms of their Li, B, and Sr contents, these fluids should be regarded not as a short-term economic recovery target, but rather as geochemical tracers that illuminate hydrogeochemical processes.

The reservoir temperatures of the geothermal resources in the Çan district were evaluated using silica and cation geothermometers. On the Giggenbach (1988) diagram, only Bardakçılar plots within the partially equilibrated waters field. Since chalcedony solubility governs silica equilibrium below 140 °C (Eroğlu and Aksoy, 2003), the chalcedony geothermometer results of 28-39 °C, 52-59 °C, 71-80 °C, and 76-91 °C for Alibeyçiftliği, Çan-Merkez, Karılıca, and Bardakçılar, respectively, are considered the most appropriate estimates among the available data.

The $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ data of the geothermal resources in the Çan district (Yalçın, 2007; Baba and Deniz, 2008; Karaca et al., 2013) reveal that Alibeyçiftliği, Karılıca, and Bardakçılar plot within the GMWL-MMWL range, reflecting recharge of regional meteoric origin, whereas Çan-Merkez exhibits markedly different isotopic behavior. At this field, evidence of an oxygen-18 shift, driven by a deep process associated with high-temperature rock/ CO_2 interaction, is observed, a finding further supported by the field's highest HCO_3^- and alkalinity values (Yalçın, 2007). Tritium data (Yalçın, 2007; Baba and Deniz, 2008) point to distinct mixing processes among the fields: the low ^3H values at Alibeyçiftliği (0.43 TU) and Karılıca (0.31-0.55 TU) indicate long groundwater residence times predating the 1950s thermonuclear era, while the markedly lower and narrower ^3H range at Bardakçılar (0.05-0.22 TU) points, together with corroborating geochemical evidence discussed below, to an even longer residence time and a more deeply circulating hydrogeological system. In contrast, the higher and more variable ^3H content at Çan-

Merkez (1.01-3.5 TU) reflects a shallow/modern water component periodically entering the system through hydraulic connection with the Kocabaş Stream alluvial aquifer.

In areas of widespread Oligo-Miocene volcanic and intrusive rock outcrops around Çan, Au, Cu, Pb, Zn, and Fe mineralization has formed the basis of mining activities extending from antiquity to the present day (Yiğit, 2012). The distribution of mineral deposits and occurrences exhibits NE-SW-trending zonation (Engin et al., 2012). The region hosts significant mineralization systems, notably the Halılağa (Cu-Au) porphyry system and the Ağı Dağı (Au-Ag) HS epithermal deposit. Halılağa's indicated resource (182.7 Mt at 0.27% Cu, 0.30 g/t Au, and 0.0057% Mo) and inferred resource (178.7 Mt at 0.23% Cu, 0.24 g/t Au, and 0.0087% Mo) (Doerksen et al., 2015) position it as a candidate to be one of the largest Cu-Au deposits in the Biga Peninsula (Yiğit, 2012). Ağı Dağı, with combined Baba Dağı and Deli Dağı resources (Yiğit, 2012) and proven/probable reserves of 54.4 Mt at 0.67 g/t Au (~1.17 Moz; Cormier et al., 2017), represents one of the largest HS epithermal gold systems in the Biga Peninsula.

The Kumarlar and Kocayayla deposits are structurally controlled, vein-type polymetallic systems reflecting the region's base-metal potential. Kumarlar, a Pb-Zn-Cu $\pm$ Au deposit, is an LS-IS epithermal system (Bozkaya and Banks, 2015); ore is largely hosted within amorphous silica bands precipitated by seismically triggered pressure drops, with average Au and Ag contents of 0.2 ppm and 1.31 ppm, respectively, alongside Sb, Cd, and Ge (Bozkaya and Banks, 2015). Kocayayla is an Au-poor Pb-Zn $\pm$ Cu deposit classified as an IS-type epithermal system (Akısa and Demirela, 2026). It is characterized by a brecciated contact zone (Gjelsvik, 1962) and stockwork mineralization associated with a Cu-Mo anomaly, which may indicate an underlying porphyry system (Yiğit, 2012). Geochemical analyses further show

marked enrichment in base metals, accompanied by elevated concentrations of As, Cd, Sb, and Ag (Akiska and Demirela, 2026). The Yuvalar Fe-Cu skarn deposit is one of the most significant centers preserving traces of intense ancient metallurgical activity in the region. Mineralization occurs within a skarn zone developed at the contact between a granodiorite intrusion and a metamorphic sequence comprising alternating mica schist and marble (Pernicka et al., 2003). Radiocarbon and thermoluminescence dating indicate at least two phases of copper production, one during the second millennium BC and another in the Roman period, the latter dated to approximately AD 70 ± 170 (Pernicka et al., 2003). The presence of seven slag heaps, amounting to approximately 100,000 tons, together with ceramic finds ranging from the Archaic to the Byzantine periods (Körpe, 2024), points to a prolonged history of metallurgical activity at the site.

The Çan district possesses substantial industrial raw material potential arising from intense hydrothermal alteration processes associated with Oligo-Miocene calc-alkaline volcanism. The Bahadırlı, Duman, and Çaltıkara kaolin deposits in the region are structurally controlled and exhibit distinct evolutionary histories (Ünal Ercan et al., 2022a). The silex occurrences exposed in the region represent remnants of fossil epithermal systems within the Biga Peninsula, having developed through a two-stage hydrothermal process (early acid-sulfate alteration followed by late-stage alkali-chloride silicification; Ünal Ercan et al., 2022b). With their high silica content (>95%), these deposits constitute an important raw material for the ceramics industry (Şanlıyüksel Yücel, 2013). Finds at İnkaya Cave and its surroundings demonstrate that silex was actively exploited for tool production during the Middle Paleolithic (Özer et al., 2018). In addition, the region's high-purity limestone deposits serve mainly as feedstock for thermal power plants and as aggregate for

the construction sector. Although the diatomite occurrences within the Çan formation have wide-ranging industrial applications, the local occurrences around Keçiagılı are not currently exploited owing to their low quality and limited reserves (Ertin, 2001). Çan stone, a variegated and patterned rock resulting from pyrite oxidation and limonitization within rhyolitic tuffs, is valued as a construction and decorative material owing to its ease of workability and high thermal resistance (Tekin, 2009).

The Çan lignite basin (~92.5 Mt reserve; MTA, 2026), cropping out around the district center and surrounding villages, is defined by elevated sulfur content (0.21-14.36 wt%), attributed to volcanic activity during basin deposition (Gürdal, 2011). Pyrite, the dominant mineral phase in the coal, is possibly associated with several trace elements, most notably As, which averages 253.5 mg/kg (Baba et al., 2016), roughly 30 times the world coal average (Ketris and Yudovich, 2009). Hosting two thermal power plants with a combined 650 MW capacity, the basin substantially supports Türkiye's energy security, while requiring continued technical measures for environmental and emission management.

Çan is a significant region where natural acid rock drainage from altered volcanic rocks and acid mine drainage from mining activities co-occur. Regional waters show pH as low as 3.47 and As up to 92.9 µg/L (Şanlıyüksel Yücel, 2013), roughly nine times the WHO (2022) limit. Altered rocks reach 735.7 mg/kg As, with groundwater As up to 150 µg/L (Baba et al., 2012). The Etili coal field's nine acid mine lakes (Şanlıyüksel Yücel et al., 2014) represent one of the highest known densities in Türkiye, posing ecological risk through low pH (<4) and elevated Al, Fe, Mn, Zn, and Ni (Şanlıyüksel Yücel and Yücel, 2017). Mitigation approaches include UAV-based mine lake monitoring (Şanlıyüksel Yücel and Yücel, 2017), fly-ash-based metal adsorption (İleri and Şanlıyüksel Yücel, 2020), and fly ash amendment

of waste rock to neutralize drainage (Şanlıyüksel Yücel and İleri, 2020). Complementing these efforts, the TKİ ÇLİ planted 1,917,088 seedlings over 1,335 ha (1991-2023; TKİ, 2026) to enhance soil stability, limit erosion, and reduce AMD generation.

Çan hosts 38 active mining licenses, directly employing 6,937 people (14.8% of the population; TÜİK, 2025), with female employment (3.53%) far below the global mining average (10-15%; Bansal et al., 2024), indicating structural gender imbalance and, alongside single-sector dependence, exposing the region to social fragility risks.

Bardakçılar's high discharge and temperature make it well suited for cascading applications such as district heating and greenhouse cultivation. After the 1953 earthquake, discharge reductions observed at Çan-Merkez and Karailıca (Müller, 1955) warrant careful seismic risk planning for such investments. Elevated As and Mn at Alibeyçiiftliği, Çan-Merkez, and Karailıca, despite their 2023 EU critical raw materials listing (Grohol and Veeh, 2023) based on economic/supply criteria rather than toxicological risk, should be managed as environmental risk factors under current local conditions.

Thermal power plants in Çan consume approximately 4 million tons of coal annually, generating 1,115,369 tons of fly ash. Across the five thermal power plants operating in Çanakkale Province, approximately 27% of ash waste is recovered, while the remaining 73% is disposed of in landfills; however, Çan-specific data are not available (ÇÇŞİDİM, 2025). Since 2020, 1.3 million tons of fly ash and FGD gypsum have been exported (ODAŞ, 2024), and a 2024 agreement to supply 2 million tons of fly ash to a cement plant as a clinker substitute exemplifies industrial symbiosis (Akçansa, 2025; ODAŞ, 2025). Additionally, the 5 MW solar power plant on a rehabilitated TKİ ÇLİ site, which combines land rehabilitation, waste

management, and renewable energy generation, further exemplifies circular-economy integration: of its 7,548 MWh total output in 2025, ~28% (2,117 MWh) was used for the facility's self-consumption.

Based on these findings, this study evaluates the natural resource potential of the Çan district from a sustainable resource management perspective. Priority recommendations include real-time digital/UAV monitoring, deep-geothermal reservoir drilling, cascading geothermal use, critical-mineral determination (Ge, Mo, Zn, Sb, etc.) in metallic ore deposits, diversified fly ash applications, solar power plant replication at other abandoned-mine sites, and the promotion of women's employment. These recommendations demonstrate that a holistic approach to the water-energy-mining nexus in the Çan district will support alignment with the objectives of the European Green Deal.

KATKI BELİRTME

Veri paylaşımı sağlayan Çanakkale İl Özel İdaresi ve Çanakkale Sosyal Güvenlik İl Müdürlüğüne, arazi çalışmalarına sundukları katkılardan dolayı Prof. Dr. Mehmet Ali Yücel'e ve Prof. Dr. Mustafa Çınar'a, ayrıca çalışmanın niteliğinin geliştirilmesine katkı sunan değerli hakemlere teşekkür ederim. Bu çalışmada kullanılan hidrojeokimyasal analiz sonuçları ÇOMÜ-BAP FBA-2023-4409 no'lu proje kapsamında üretilmiş ve bu proje tarafından desteklenmiştir.

ORCID

Deniz Şanlıyüksel Yücel  <https://orcid.org/0000-0001-6546-5624>

KAYNAKLAR / REFERENCES

Abaka, M. A. (2024). *Kumarlar (Çan-Çanakkale) polimetallik (Pb-Zn-Cu±Au) cevherleşmesini oluşturan çözeltilerin özellikleri* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Ackah-Baidoo, P. F. (2025). Gender and mining: Assessing the landscape for women entrepreneurs in the critical minerals supply chain. *The Extractive Industries and Society*, 24, Article 101753. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101753>
- AFAD, (2026, 25 Mart). *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Kataloğu*. <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- Akçansa, (2025). *2025 Entegre Faaliyet Raporu*. Akçansa Çimento Sanayi Ticaret A.Ş. https://www.akcansa.com.tr/wp-content/uploads/2026/04/Akcansa_2025_EFR_TR-21-nisan-v2.pdf
- Akdaş, H., Bozkurt, M. R. ve Dikduran, T. (2001). Çan taşı – Desenli yapıtaşı. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, (s. 153-162). Afyon.
- Akiska, S. & Demirela, G. (2026). Geology, Alteration, Geochemistry, and Regional Sulfur Isotope Constraints on Pb–Zn ± Cu Mineralization in the Biga Peninsula (NW Türkiye): Insights from the Kocayayla Deposit. *Applied Sciences*, 16(5), 2604. <https://doi.org/10.3390/app16052604>
- Akkuş, İ., Akıllı, H., Ceyhan, S., Dilemre, A. ve Tekin, Z. (2005). *Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri* (Envanter Serisi no: 201). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Altunkaynak, Ş., Dilek, Y., Genç, C.Ş., Sunal, G., Gertisser, R., Furnes, H., Foland, K. & Yang, J. (2012). Spatial, temporal and geochemical evolution of Oligo-Miocene granitoid magmatism in western Anatolia, Turkey. *Gondwana Research*, 21(4), 961-986. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.010>
- Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A. (2000). Seismicity of the Sea of Marmara since 1500. *Geophysical Journal International*, 141(3), F1-F6. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x>
- Atabay, M. ve Körpe, R. (2019). *Antik Çağ'dan Günümüze Çan*. Emsal Matbaa, Ankara.
- Aydın, A. (2014). *Çan-Çanakkale Bölgesi Kaolinit Yataklarının ve Çevresinin Petrografik Mineralojik ve Jeokimyasal İncelenmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Baba, A. ve Deniz, O. (2008). *Biga Yarımadası'ndaki jeotermal kaynakların potansiyeli, kullanım alanlarının belirlenmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi* (Proje no: 104Y082). TÜBİTAK ÇAYDAG (yayımlanmamış).
- Baba, A., Deniz, O. ve Şanlıyüksel, D. (2008). Kazdağları kuzeydoğusunda bulunan soğuk su kaynaklarının izotopik özellikleri. *II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu*, (s. 1-12).
- Baba, A., Ertekin, C. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2012). High arsenic levels in water resources resulting from geogenic resources: A case study from Muratlar Region, NW Turkey. *39th International Association of Hydrogeologists Congress*, Eylül 16-21, Niagara Falls, Canada, (s. 110).
- Baba, A., Gürdal, G. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2016). Enrichment of trace element concentrations in coal and its combustion residues and their potential environmental and human health impact: Can Coal Basin, NW Turkey as a case study. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 19(5-6), 455-480. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2016.083665>
- Balkış, M. ve Yazıcı, B. (1996). *TKİ Çan Linyit İşletmesi Raporu*. Türkiye Kömür İşletmeleri (yayımlanmamış).
- Bansal, S., Nangia, P., Singh, S. & Cichon, D. (2024). Where's our share: Agenda for gender representation in mining industry. *Resources Policy*, 90, Article 104820. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104820>
- Barka, A. & Reilinger, R. (1997). Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica*, 40(3), 587-610. <https://doi.org/10.4401/ag-3892>
- Barka, A. A. & Gülen, L. (1988). New constraints on age and total offset of the North Anatolian Fault Zone: implications for tectonics of the eastern Mediterranean region. *Middle East Technical University Journal of Pure and Applied Sciences*, 21(1-3), 39-63.
- Bingöl, E. (1969). Kazdağ masifinin merkezi ve güneydoğu kesiminin jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 72, 110-123.
- Bingöl, E., Akyürek, B. ve Korkmazer, B. (1973). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve Karakaya formasyonunun bazı özellikleri. *Cumhuriyetin 50. Yılı Yerbilimleri Kongresi*, (s. 70-77). MTA Genel Müdürlüğü.

- Birkle, P. & Satır, M. (1995). Dating, geochemistry and geodynamic significance of the Tertiary magmatism of the Biga Peninsula, NW Turkey. A. Erler, T. Ercan, E. Bingöl, S. Örcen (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on the Geology of the Black Sea Region*, (pp. 171-180). General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara.
- Borat, M. (1992). *Türkiye diyatomitlerinin özellikleri ve filtrasyon karakteristikleri* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bozcu, M., Akgün, F., Gürdal, G., Bozcu, A., Kapan Yeşilyurt, S. ve Karaca, Ö. (2008). *Çan-Yenice-Bayramiç (Çanakkale) Linyit Havzasının Sedimentolojik, Petrolojik, Jeokimyasal ve Palinolojik İncelenmesi* (Proje no: 105Y114). TÜBİTAK.
- Bozkaya, G. & Banks, D. A. (2015). The importance of supersaturated silica deposition for base-metal Au-Ag mineralization in western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24(2), 99-110. <https://doi.org/10.3906/yer-1405-10>
- Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey - a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 3-30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Brunetti, P. (2016). *Magmatic-hydrothermal evolution and post-ore modifications of the Halilağa porphyry Cu-Au deposit, NW Turkey* [Master's thesis]. University of British Columbia.
- Buyondo, K. A., Kasedde, H. & Kirabira, J. B. (2022). A comprehensive review on kaolin as pigment for paint and coating: Recent trends of chemical-based paints, their environmental impacts and regulation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, Article 100244. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100244>
- Bülbül, E., Çam, D., Büyükboyacı, Ü. & Karaca, S. (2022). *Çanakkale ili Çan ilçesi AR:17/03 no.lu Bardakçılar jeotermal kaynak arama ruhsat alanına ait jeotermal etüt (jeoloji-jeofizik) ve ÇÇB-2010/20 jeotermal araştırma sondajı kuyu bitirme raporu*. MTA Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Chenaker, H., Houha, B. & Vincent, V. (2018). Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria. *Geothermics*, 75, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.009>
- Cheng, H., Zhou, Y. & Liu, Q. (2019). Kaolinite Nanomaterials: Preparation, Properties and Functional Applications. In P. Yuan, J. Thill & F. Bergaya (Eds.), *Nanomaterials from Clay Minerals: Guide for Advanced Materials Applications*, (pp. 285-334). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814533-3.00006-5>
- Choi, Y. (2023). Recent Advances in Smart Mining Technology. *Applied Sciences*, 13, Article 3726. <https://doi.org/10.3390/app13063726>
- Clark, I. & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press.
- Cormier, A., Jutras, M., Welhener, H., Minard, T., Chiaramello, P. & Cremeens, J. (2017). *NI 43-101 Feasibility Study Technical Report on the Ağı Dağı Project and Preliminary Economic Assessment on the Çamyurt Project, Çanakkale Province, Turkey* (Technical Report). JDS Energy & Mining Inc. (yayımlanmamış).
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Cunningham-Dunlop, I. R. & Lee, C. (2007). *Agi Dagi gold property, Canakkale Province, Turkey* (Technical Report). Fronteer Development Group Inc. (yayımlanmamış).
- Çağlar, K. Ö. (1948). *Türkiye Maden Suları ve Kaplıcaları Fasikül 2*. MTA Enstitüsü Yayınları.
- ÇÇŞİDİM, (2025). *Çanakkale İli 2024 Yılı Çevre Durum Raporu*. T.C. Çanakkale Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü (yayımlanmamış)
- Çelik, Ş. (2009). *Kumarlar (Çan-Çanakkale) kurşun-çinko cevherleşmesinin jeolojisi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelmen, O., Elidemir, S. & Karadağlar, M. (2025). Update on the utilisation of geothermal energy for space and greenhouse heating in Türkiye. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 177, 146-157. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1716476>
- Çetin, M. ve Taş, B. (2012). Biyolojik Orijinli Tek Doğal Mineral: Diyatomit. *TÜBAV Bilim*, 5(2), 28-46.
- Çınar, M. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2025). *Çanakkale Madenciliğinde Yeni Ufuklar: Teknoloji, Sürdürülebilirlik ve Stratejik Dönüşüm*. Holistance Publications. <https://doi.org/10.55094/holistence.537>

- Çiçek, M., Oyman, T. & Palmer, R. P. (2021). Variation of Cu, Fe, S and Pb isotopes in sulfides from hydrothermal mineralization from the Yenice region in Çanakkale, Biga Peninsula, NW Turkey. *Ore Geology Reviews*, 136, Article 104255. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104255>
- ÇLİ, (2026, 26 Mart). *Dekapaj*. TKİ Çan Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü, Üretim Esasları. <https://cli.tki.gov.tr/dekapaj>
- Delaloye, M. & Bingöl, E. (2000). Granitoids from western and northwestern Anatolia: Geochemistry and modeling of geodynamic evolution. *International Geology Review*, 42(3), 241-268. <https://doi.org/10.1080/00206810009465081>
- Demirela, G. & Akiska, S. (2022). Evaluation of Pb isotope systematics and metal sources of the Biga Pb–Zn Province (NW Turkey) and comparison with the Pb isotope systematics of the Rhodope Massif. *Journal of African Earth Sciences*, 187, Article 104445. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104445>
- Deniz, O. (2010). *Çanakkale Çan Çevresindeki Jeotermal Sistemlerin Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelenmesi* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dewey, J. F. & Şengör, A. M. C. (1979). Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuous tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 84-92. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90%3C84:AASRCM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90%3C84:AASRCM%3E2.0.CO;2)
- Doerksen, G., Freudigmann, S., Pilotto, D., Rykaart, M., Abrahams, G., Simmons, G., Kirkham, G. & Gray, J. (2015). *Revised Preliminary Economic Assessment Technical Report Halilağa Project, Turkey* (Canadian National Instrument 43-101 Technical Report). JDS Energy and Mining Inc (yayımlanmamış).
- Doğdu, M. Ş. (2004). Jeotermal Suların Rezervuar Sıcaklığının Tahmininde Kullanılan Jeotermometre Hesaplamaları İçin Bilgisayar Programı. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 28(2), 1-12.
- DSİ, (2026, 25 Mart). *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, İşletmedeki Baraj ve Göletler*. <https://bolge25.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/943>
- Durmaz, K., Demir, B. G. ve Akbulut, A. (2026). Dünya ve Türkiye açısından feldispat madenciliği ve ticareti. *Kuzey Ege Teknik Bilimler ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 64-74. <https://izlik.org/JA95LF95PT>
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Okay, A. İ., Şentürk, Y. ve Kar, H. (2012). Biga Yarımadası'nın Tersiyer Öncesi Jeolojisi. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 7-74). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- Ediger, V. Ş. (1988). *Biga Yarımadası'ndaki Kömürlü Birimlerden Alınan Örneklerin Palinolojik Analizi* (Rapor no: 1296). Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı Araştırma Grubu (yayımlanmamış).
- Eisenlohr, T. (1995). *Die Thermalwässer der Armutlu-Halbinsel (NW Türkei) und deren Beziehung zu Geologie und aktiver Tektonik* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. ETH Zurich.
- Ellis, A. J. (1979). Chemical geothermometry in geothermal systems. *Chemical Geology*, 25(3), 219-226. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(79\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(79)90143-8)
- Emre, Ö., Doğan, A. ve Yıldırım, C. (2012). Biga Yarımadasının Diri Fayları ve Deprem Potansiyeli. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 163-198). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F. (2013). *Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1:1.250.000*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara.
- Engin, T., Özkan, Y. Z., Sarı, R., Şen, P., Gedikoğlu, A. ve Özpeker, I. (2012). Biga Yarımadası'nın Metalojenisi. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 207-272). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- EPDK, (2026, Haziran). Elektrik piyasası sektör raporu: Nisan 2026. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-16382/2026-yili-nisan-ayi-sektor-raporlari-yayimlanmist>
- EPİAŞ, (2026, Haziran). Elektrik piyasası aylık raporu: Mayıs 2026. <https://www.epias.com.tr/spot-elektrik-piyasasi/elektrik-piyasasi-bultenler/elektrik-piyasasi-aylik-bulten/>
- Ercan, T., Satır, M., Steinitz, G., Dora, A., Sarıfakioğlu, E., Adis, C., Walter, H. J. ve Yıldırım, T. (1995). Biga Yarımadası ile Gökçeada, Bozcaada ve Tavşan Adalarındaki (KB Anadolu) Tersiyer

- Volkanizmasının Özellikleri. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 117, 55-86.
- Erdoğan, M., Gençoğlu, H. ve Mahmetoğlu, Y. (2012). Biga Yarımadası'nın Endüstriyel Hammadde Olanakları. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi*, (s. 273-288). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayın Serisi No: 28, Ankara.
- Eroğlu, A. ve Aksoy, N. (2003). Jeotermal suların kimyasal analizi. *VI. Ulusal Tesisat Kongresi, Jeotermal Enerji Semineri Kitapçığı* (s. 149-183). TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları.
- Ertin, G. (2001). Biga Yarımadasında Madencilik. *Coğrafya Dergisi*, 9, 81-108.
- ETKB, (2024). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Jeotermal*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-jeotermal> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2026)
- ETKB, (2025). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Türkiye Kritik ve Stratejik Madenler Raporu*. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/TKDB/tr/Belgeler/Tu%CC%88rkiye_Kritik_ve_Stratejik_Madenler_Raporu.pdf (Erişim tarihi: 14 Şubat 2026)
- Flower, R. J. & Williams, D. M. (2025). Diatomites: Their formation, distribution and uses. In S. A. Elias (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (3rd ed.), Vol. 2 (pp.: 50-61). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99931-1.00080-5>
- Fouillac, C. & Michard, G. (1981). Sodium/lithium ratio in water applied to the geothermometry of geothermal waters. *Geothermics*, 10(1), 55-70. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(81\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(81)90025-0)
- Fournier, R. O. (1977). Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5(1-4), 41-50. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(77\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0375-6505(77)90007-4)
- Fournier, R. O. (1979). A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geothermal Resources Council*, 3, 221-224.
- Fournier, R. O. (1989). Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters. *UNU Geothermal Training Programme*, 10, 1-66.
- Fournier, R. O. (1991). Water geothermometers applied to geothermal energy. In F. D'Amore (Ed.), *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (pp. 37-63). UNITAR/UNDP Publications.
- Fournier, R. O. & Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), 1255-1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)
- Gedikoğlu, A. (2011). Biga Yarımadası metalik maden yatakları. *Biga Yarımadası'nın Jeolojisi Sempozyumu Bildirileri* (s. 48-62).
- Genç, Ş. C. (1998). Evolution of the Bayramic, magmatic complex, Northwestern Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 233-249. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00057-2)
- Genç, Ş. C., Dönmez, M., Akçay, A. E., Altunkaynak, Ş., Eyüpoğlu, M. ve Ilgar, Y. (2012). Biga Yarımadası Tersiyer Volkanizmasının Stratigrafik, Petrografik ve Kimyasal Özellikleri. E. Yüzer ve G. Tunay (Ed.ler), *Biga Yarımadası'nın Genel ve Ekonomik Jeolojisi* (s. 121-162). MTA Özel Yayın Serisi No: 28.
- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Ca-Mg geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12), 2749-2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Gjelsvik, T. (1962). Investigations of lead-zinc deposits in northwest Anatolia, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 59, 60-68.
- Grohol, M. & Veeh, C. (2023). *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report*. European Commission (yayınlanmış).
- Guo, Q., Liu, M., Luo, L., Yan, K., Guo, W., Wu, G., Yan, W. & Wang, Y. (2019). Geochemical controls on magnesium and its speciation in various types of geothermal waters from typical felsic-rock-hosted hydrothermal systems in China. *Geothermics*, 81, 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.006>
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2024). Evolution of worldwide geothermal power 2020-2023. *Geothermal Energy*, 12, 14. <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00290-w>
- Gürdal, G. (2011). Abundances and modes of occurrence of trace elements in the Çan coals (Miocene), Çanakkale-Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 87(2), 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.06.008>
- Gürer, Ö. F., Sanğu, E., Gürer, A. & Akın, M. (2021). Late Cenozoic shift from extension to strike-slip stress regime in the west of the Biga Peninsula,

- NW Turkey. *Journal of Structural Geology*, 148, Article 104348.
<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104348>
- Hedenquist, J. & Lowenstern, J. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
<https://doi.org/10.1038/370519a0>
- Hezarfen, C. (1976). *Çanakkale-Çan Kömür Yatağı Fizibilite Araştırması* (Rapor no: 7113). Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü.
- IAH, (1979). *Map of mineral and thermal water of Europe. Scale 1:500.000*. International Association of Hydrogeologists, Paris, France.
- IARC, (2012). *Arsenic, Metals, Fibres and Dusts* (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C). International Agency for Research on Cancer. <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Arsenic-Metals-Fibres-And-Dusts-2012>
- IGF, (2023). *Women and the Mine of the Future Global Report. Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development* (IGF).
<https://www.igfmining.org/resource/women-and-the-mine-of-the-future-global-report>
- Inzillo, B. M., Santoro, S., Zegeye, R. B., Tufa, R. A., Argurio, P., Straface, S. & Curcio, E. (2026). Geothermal fluids-derived critical raw materials for a sustainable and independent European supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 240, Article 117166. h
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117166>
- İleri, B. & Şanlıyüksel Yücel, D. (2020). Metal removal from acid mine lake using ultrasound-assisted modified fly ash at different frequencies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, Article 185.
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-8150-4>
- İTASHY, (2016). *İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*. Resmî Gazete, 20/10/2016, Sayı: 29863.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7510&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Jelen, J. (2018). Mining Heritage and Mining Tourism. *Czech Journal of Tourism*, 7(1), 93-105.
<https://doi.org/10.1515/cjot-2018-0005>
- Kahraman, S., Demirel, V., Beker, K., Gökmenoğlu, O. ve Zaman, U. (2005). *Çanakkale-Çan-Etili Sahası Jeotermal Enerji Aramaları, Eti-1 Kuyu Bitirme Raporu* (Rapor no: 10772). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi/Jeofizik Etütleri Dairesi (yayımlanmamış).
- Karaca, Z., Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M. A., Kamacı, C., Çetiner, Z. S., Erenoğlu, R. C. ve Akçay, Ö. (2013). *Çanakkale ili (Biga Yarımadası) Jeotermal Kaynakları ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Biga Yarımadası Jeotermal Bilgi Sistemi* (Proje no: DFD12/0011). Güney Marmara Kalkınma Ajansı (yayımlanmamış).
- Karadeniz, M. (2008). *Sülfürlü Madenlerin Sorunu Asit Maden Drenajı ve Çözümü* (Oda Yayın No: 146). TMMOB Maden Mühendisleri Odası.
- Kartal, T. (1974). *Çanakkale-Çan Kaplıcası Hidrojeoloji Etüdü* (Rapor no: 6649). MTA (yayımlanmamış).
- Kassem, M. A. & Moscariello, A. (2024). Advancing sustainable energy: A systematic review of geothermal-powered district heating and cooling networks. *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1), Article 2417436.
<https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2417436>
- Ketin, İ. & Roesli, F. (1953). Makroseismische Untersuchungen über das nordwestanatolische Beben vom 18. März 1953. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 46(2), 187-208.
<https://doi.org/10.5169/seals-161697>
- Ketris, M. P. & Yudovich, Y. E. (2009). Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135-148.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
- Koçyiğit, A. (2009). Biga Yarımadası'nın Yeni Tektoniği: Biga Fay Sistemi, KB Türkiye. 62. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, (s. 498-499).
- Körpe, R. (2024). Antik Çağ Troas Bölgesi Madenleri. 5. *Türkiye Tarihi Madenler Konferansı Bildiriler Kitabı*, (s. 20-26). Trakya Üniversitesi.
- KRDAE, (2026a, 25 Mart). *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. Türkiye'de 1900-2004 Yılları Arasında Can Kaybı ve Hasara Neden Olmuş Önemli Depremler (Ms>5.0)*. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Depremler/tlrange2.htm>
- KRDAE, (2026b, 25 Mart). *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma*

- Enstitüsü. 03 Mayıs 2018 Çan (Çanakkale) Depremi.* http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/wp-content/uploads/2018/05/03_05_2018_Can-Canakkale.pdf
- Krushensky, R. D., Akçay, Y. ve Karaeğe, E. (1980). Geology of the Karalar-Yeşiller area, northwest Anatolia, Turkey. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1461, 1-72. <https://doi.org/10.3133/b1461>
- Kuşcu, İ., Tosdal, R. M. & Gençaloğlu-Kuşcu, G. (2019). Episodic porphyry Cu (–Mo–Au) formation and associated magmatic evolution in Turkish Tethyan collage. *Ore Geology Reviews*, 107, 119-154. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.005>
- Kuznia, M. (2025). A review of coal fly ash utilization: Environmental, energy, and material assessment. *Energies*, 18, Article 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
- Kürçer, A., Özalp, S., Özdemir, E., Uygun Gündoğan, Ç. ve Duman, T. Y. (2019). 18 Mart 1953 Yenice-Gönen Depremi (Ms=7.2) ışığında Yenice-Gönen Fayı'nın aktif tektonik ve paleosismolojik özellikleri, KB Türkiye. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 159, 29-63. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.500553>
- Li, J., Sagoe, G. & Li, Y. (2020). Applicability and limitations of potassium-related classical geothermometers for crystalline basement reservoirs. *Geothermics*, 84, Article 101728. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101728>
- Li, J., Sagoe, G., Wang, X. & Yang, Z. (2021). Assessing the suitability of lithium-related geothermometers for estimating the temperature of felsic rock reservoirs. *Geothermics*, 89, Article 101950. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101950>
- Mancini, L. & Sala, S. (2018). Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 57, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>
- McKenzie, D. P. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30(2), 109-158. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>
- McKenzie, D. P. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1), 25-32. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90071-7)
- Mertoğlu, O., Şimşek, Ş. & Başarır, N. (2021). Geothermal energy use: projections and country update for Turkey. *Proceedings, World Geothermal Congress 2021*, Reykjavik, Iceland, (s. 11).
- MGM, (2026, 25 Mart). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmî İstatistikler: İl ve İlçelerimize Ait İstatistikî Veriler (Çanakkale).* <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=CANAKKALE>
- MTA, (2026, 26 Mart). *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Kömür Arama Araştırmaları.* <https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari>
- Murray, H. H. (2007). *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays.* Elsevier.
- Müller, G. (1955). *Çanakkale vilayetindeki termal kaynaklar* (Rapor no: 2221). Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı (yayınlanmamış).
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77844-5>
- ODAŞ, (2024). *Odaş Sürdürülebilirlik Raporu - 2024.* Odaş Elektrik Üretim Sanayi Ticaret A.Ş. <https://www.odalas.com.tr/uploads/2025081918313935439.pdf>
- ODAŞ, (2025). *Odaş Sürdürülebilirlik Raporu - 2025.* Odaş Elektrik Üretim Sanayi Ticaret A.Ş. <https://www.odalas.com.tr/uploads/20260722174828665.pdf>
- Okay, A. İ., Siyako, M. ve Bürkan, K. A. (1990). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 2(1), 83-121.
- Okay, A. İ., Satır, M., Maluski, H., Siyako, M., Monie, P., Metzger, R. & Akyüz, S. (1996). Paleo- and Neo-Tethyan events in northwest Turkey: Geological and geochronological constraints. In A. Yin & T.M. Harrison (Eds.), *Tectonics of Asia*, (pp. 420-441). Cambridge University Press.
- Okay, A. İ. & Satır, M. (2000). Coeval plutonism and metamorphism in a latest Oligocene metamorphic core complex in northwest Turkey. *Geological Magazine*, 137(5), 495-516. <https://doi.org/10.1017/S0016756800004532>
- Öktü, G., Uzel, Ö. F. ve Şaroğlu, F. (1991). *Çanakkale-Çan sıcaksu sondajları (Çan-1, Çan-2) kuyu bitirme raporu.* Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayınlanmamış).
- Önder, İ. (2002). *Çan jeotermal alanı sıcak su aramaları jeofizik rezistivite (DES) ve SP-türev etütleri raporu.* 10 s. (yayınlanmamış)

- Öngen, S. (1978). Petrographie und petrochemie des Çavuşlu-Karaköy granitoid massivs. *İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Mecmuası Seri B*, 43, 93-115.
- Öngen, S. (1992). *Les échanges métasomatiques entre granitoïdes et encaissants particuliers (calcaires, dolomies, ultrabasites, séries manganésifères): l'exemple de la péninsule de Biga, Anatolie nord-ouest, Turquie* [Yayınlanmamış Doktora Tezi]. Université de Nancy, Faculté des Sciences de la Terre.
- Özalp, S., Kürçer, A., Özdemir, E. & Duman, T. Y. (2016). The Bekten Fault: The palaeoseismic behaviour and kinematic characteristics of an intervening segment of the North Anatolian Fault Zone, Southern Marmara Region, Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4), 347-362. <https://doi.org/10.1080/09853111.2016.1208524>
- Özdamar, Ş. (2018). Evciler Plütunu'nun (KB Türkiye) Petrolojisi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 149-165. <https://doi.org/10.17780/ksujes.392826>
- Özdamar, Ş., Roden, M. F., Zou, H., Billor, M. Z., Hames, W., Georgiev, S. & Dunkl, I. (2021). Petrogenesis of Oligocene plutonic rocks in western Anatolia (NW Turkey): Insights from mineral and rock chemistry, Sr-Nd isotopes, and U-Pb, Ar-Ar and (U-Th)/He geochronology. *Geochemistry*, 81(2), Article 125747. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125747>
- Özer, İ., Sağır, M., Baykara, İ., Dinçer, B., Koca Özer, B., Şahin, S., Eren, E. ve Özdemir, A. (2018). Çanakkale İlinde Paleolitik Dönem İnsan İzleri. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 58(1), 99-116. <https://doi.org/10.33171/dtcfjournal.2018.58.1.6>
- Özkaymak, C. & Sözbilir, H. (2012). Tectonic geomorphology of the Spildagi High Ranges, western Anatolia. *Geomorphology*, 173, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.003>
- Palmer, C. A., Tuncalı, E., Dennen, K. O., Coburn, C. T. & Finkelman, R. B. (2004). Characterization of Turkish coals: a nationwide perspective. *International Journal of Coal Geology*, 60, 85-115. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2004.05.001>
- Peiffer, L., Wanner, C., Spycher, N., Sonnenthal, E. L., Kennedy, B. M. & Iovenitti, J. (2014). Optimized multicomponent vs. classical geothermometry: Insights from modeling studies at the Dixie Valley geothermal area. *Geothermics*, 51, 154-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.12.002>
- Pernicka, E., Eibner, C., Öztunalı, Ö. & Wagner, G. A. (2003). Early Bronze Age metallurgy in the North-East Aegean. In G. A. Wagner, E. Pernicka & H. P. Uerpman (Eds.), *Troia and the Troad: Scientific Approaches*, (pp. 143-172). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05308-9_10
- Pickett, E. A. & Robertson, A. H. (2004). Significance of the volcanogenic Nilüfer Unit and related components of the Triassic Karakaya Complex for Tethyan subduction/accretion processes in NW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13 (2), 97-143.
- Piper, M. A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Rubio-Maya, C., Ambríz-Díaz, V. M., Pastor-Martínez, E. & Belman-Flores, J. M. (2015). Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 689-716. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>
- Rybár, P. & Hronček, P. (2017). Mining tourism and the search for its origins. *Geotourism*, 3, 50-51. <https://doi.org/10.7494/geotour.2017.50-51.3>
- Sánchez, M. G., McClay, K. R., King, A. R. & Wijbrams, J. R. (2016). Cenozoic crustal extension and its relationship to porphyry Cu-Au-(Mo) and epithermal Au-(Ag) mineralization in the Biga Peninsula, northwestern Turkey. In J. P. Richards (Ed.), *Tectonics and Metallogeny of the Tethyan Orogenic Belt*, (Special Publication No. 19, pp. 113-138). Society of Economic Geologists.
- Sarp, S., Burçak, M., Yıldırım, T. ve Yıldırım, N. (1998). *Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve jeotermal enerji olanakları ile Balıkesir-Havran-Derman kaplıca sahasının detay jeotermal etüdü ve gradyan sondajları* (Rapor no: 10537). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayınlanmamış).
- Schoeller, H. (1962). *Les Eaux Souterraines: Hydrologie Dynamique et Chimique. Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources*. Masson et Cie.
- Siyako, M., Bürkan, K. A. ve Okay, A. İ. (1989). Biga ve Gelibolu Yarımadılarının Tersiyer jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 1(3), 183-199.
- Sözbilir, H., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Softa, M., Tepe, Ç., Özkaymak, Ç. ve Baba, A. (2018). Çanakkale-Ayvacık Deprem Fırtınasının (14

- Ocak-20 Mart 2017) Sismik Kaynakları. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 6, 1-17.
- Stober, I. & Bucher, K. (2021). *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development* (2nd ed.). Springer Nature Switzerland AG.
- Sütun Enerji, (2026, 26 Mart). *Sütun Enerji Madencilik A.Ş., Demir, Bakır ve Çinko Madenleri*. <https://www.sutunenerji.com/demir-bakir-cinko-madenleri>
- Swaine, D. J. (1990). *Trace Elements in Coal*. Butterworth & Co. London.
- Şanlıyüksel Yücel, D. (2013). *Asidik su kaynaklarının karakteristikleri, oluşumunu sağlayan faktörler ve hidrojeokimyasal özellikleri (Çan-Bayramiç; Biga yarımadası örneği)* [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şanlıyüksel Yücel, D. (2019). Characterization and comparison of mine wastes in Can Coal Basin, northwest Turkey: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78, Article 154. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8160-0>
- Şanlıyüksel Yücel, D. & Baba, A. (2013). Geochemical Characterization of Acid Mine Lakes in Northwest Turkey and Their Effect on the Environment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(3), 357-376. <https://doi.org/10.1007/s00244-012-9843-7>
- Şanlıyüksel Yücel, D. ve İleri, B. (2020). Antropojenik kaynaklı metal kirliliğinin çevresel etkilerinin azaltılmasında uçucu kül kullanımı. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(1), 43-56. <https://doi.org/10.25288/tjb.593416>
- Şanlıyüksel Yücel, D. ve Yücel, M. A. (2017). Terk edilmiş kömür ocaklarında oluşan maden göllerinin hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve insansız hava aracı ile üç boyutlu modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 780-791.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Karaca, Z. & Yücel, M. A. (2013). Determining hydrogeochemical characteristics of geothermal resources in Biga Peninsula (city of Canakkale), NW Turkey. *40th International Association of Hydrogeologists Congress*, (p. 261). 15-20 September 2013, Perth, Australia.
- Şanlıyüksel Yücel, D., Yücel, M. A. & Baba, A. (2014). Change detection and visualization of acid mine lakes using time series satellite image data in geographic information systems (GIS): Can (Canakkale) County, NW Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 72(11), 4311-4323. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3330-6>
- Şanlıyüksel Yücel, D., Balcı, N. ve Baba, A. (2016). Generation of acid mine lakes associated with abandoned coal mines in northwest Turkey. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(4), 757-782. <https://doi.org/10.1007/s00244-016-0270-z>
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A. (1987). *Türkiye'nin Diri Fayları ve Depremsellikleri* (Rapor no: 8174). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Şener, M. F., Uzelli, T., Akkuş, İ., Mertoğlu, O. & Baba, A. (2023). The potential, utilization, and development of geothermal energy in Türkiye. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 171, 69-90. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1229381>
- Şengör, A. M. C. & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y. & Sungurlu, O. (1985). Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: nature and evolution of the western termination of Palaeo-Tethys. J. E. Dixon & A. H. F. Robertson (Eds.), *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean* (pp. 77-112). Special Publication of Geological Society, Blackwell Scientific Publications.
- Şengör, A. M. C., Özeren, M. S., Keskin, M., Sakıncı, M., Özbakır, A. D. & Kayan, İ. (2008). Eastern Turkish high plateau as a small Turkic-type orogen: implications for post-collisional crust-forming processes in Turkic-type orogens. *Earth-Science Reviews*, 90(1-2), 1-48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.05.002>
- Şengüenalp, F. (2009). *Çan ilçe sınırları içerisinde yaşayan insanların kan ve saç As-Pb ve Hg değerlerinin yeraltı suları ile ilişkisinin tıbbi jeoloji açısından değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şimşek, Ş. (2002). Origin and characteristics of geothermal energy resource of the wider Aegean Region. *The International Workshop on Possibilities of Geothermal Energy Development*

- in the Aegean Islands Region (Proceed.), vol. 1, (pp. 1-8). Milos Island, Greece.
- Taymaz, T., Jackson, J. & McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106, 433-490. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03906.x>
- TEİAŞ, (2025, 10 Aralık). *Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2024 Yılı İstatistikleri*. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>
- Tekin, İ. (2009). *Çan taşı ekonomisi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- TKİ, (2026, 30 Mart). *Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. Ağaçlandırma Çalışmaları*. <https://www.tki.gov.tr/agaclandirma-calismalari>
- Toprak, S. & Demir, M. M. (2026). Subgram-scale precipitation of lithium peroxide from Tuzla geothermal brine using commercial λ -MnO₂ adsorbent in situ. *ACS Sustainable Resource Management*, 3(2), 433-443. <https://doi.org/10.1021/acssusresmg.5c00481>
- Truesdell, A. (1976). Summary of section III: Geochemical techniques in exploration. *Proceedings 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*. U.S. Government Printing Office.
- Truva Bakır, (2026, 26 Mart). *Truva Bakır Maden İşletmeleri A.Ş., Bayramiç Bakır Madeni*. <https://truvabakir.com.tr/bayramic-bakir-madeni/>
- Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker, A., Gencer, Z., Ayçık, H. ve Şahin, N. (2002). *Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları.
- TÜİK, (2025, 27 Aralık). *Türkiye İstatistik Kurumu. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2024*. <https://veriportali.tuik.gov.tr>
- UN General Assembly, (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations, New York.
- USGS, (2026a). *Mineral commodity summaries 2026* (Version 1.3). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026.pdf>
- USGS, (2026b). *Mineral commodity summaries 2026: Diatomite*. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-diatomite.pdf>
- Ünal Ercan, H. ve Ece, Ö. I. (2015). Hamamtepe sileks ocağının mineralojik, jeokimyasal ve kökensel irdelenmesi, Etili-Çanakkale. 68. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı*, (s.362-363). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Ünal Ercan, H., Ece, Ö. I., Çiftçi, E. & Aydın, A. (2022a). Comparison of epithermal kaolin deposits from the Etili area (Çanakkale, Turkey): Mineralogical, geochemical, and isotopic characteristics. *Clays and Clay Minerals*, 70(5), 753-779. <https://doi.org/10.1007/s42860-022-00214-4>
- Ünal Ercan, H., Ece, Ö. I., Schroeder, P. A. & Gülmez, F. (2022b). Characteristics and evolution of the Etili silica sinter epithermal deposits, Çanakkale-Turkey: Relation to alkali chloride vs acid-sulfate fluids. *Ore Geology Reviews*, 142, Article 104726. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104726>
- Ünalan, G. (2013). *Kömür Jeolojisi* (2. Baskı). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi-41.
- Verma, M. P. (2000). Chemical thermodynamics of silica: a critique on its geothermometer. *Geothermics*, 29(3), 323-346. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00064-4)
- Wagner, G. A., Pernicka, E., Seeliger, T. C., Öztunalı, Ö., Baranyi, I., Begemann, F. & Schmitt-Strecker, S. (1985). Geologische Untersuchungen zur frühen Metallurgie in NW-Anatolien. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 101-102, 45-81.
- Wang, D., Xue, F., Ren, L., Li, X., Wang, S. & Er, X. Q. (2025). Critical minerals in Tibetan geothermal systems: Their distribution, flux, reserves, and resource effects. *Minerals*, 15(1), Article 93. <https://doi.org/10.3390/min15010093>
- Wedding, H. (1966). *Çan Çanakkale kömür havzaları Çan Durali bölümünün detay harita çalışmaları hakkında rapor* (Rapor no: 4399). Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı (yayımlanmamış).
- Wei, Z. A., Shao, H., Tang, L., Deng, B., Li, H. & Wang, C. (2021). Hydrogeochemistry and geothermometry of geothermal waters from the Pearl River Delta region, South China. *Geothermics*, 96, Article 102164. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102164>
- Westaway, R. (1994). Present-day kinematics of the middle-east and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12071-12090. <https://doi.org/10.1029/94JB00335>

- WHO. (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- World Bank, (2025). Turning Minerals and Metals into Development. <https://www.worldbank.org/en/news/immersive-story/2025/12/12/turning-minerals-and-metals-into-development> (Erişim tarihi: 28 Mart 2026).
- Yalçın, T. (2007). Geochemical characterization of the Biga Peninsula thermal waters (NW Turkey). *Aquatic Geochemistry*, 13(1), 75-93. <https://doi.org/10.1007/s10498-006-9008-2>
- Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2015). *Orman ve Su İşleri Bakanlığı*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150415-18.htm>
- Yılğör, A. (2001). *Çan (Çanakkale) yöresi sileks oluşumlarının jeolojisi ve endüstriyel yönden değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, H. (2003). Exploration at the Kuscayiri Au (Cu) prospect and its implications for porphyry-related mineralization in western Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2-3), 133-150. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00274-1](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00274-1)
- Yılmaz, H., Yousefi, M., Parsa, M., Sönmez, F. N. & Maghsoodi, A. (2019). Singularity mapping of bulk leach extractable gold and -80# stream sediment geochemical data in recognition of gold and base metal mineralization footprints in Biga Peninsula South, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 153, 156-172. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.015>
- Yiğit, Ö. (2012). A prospective sector in the Tethyan Metallogenic Belt: Geology and geochronology of mineral deposits in the Biga Peninsula, NW Turkey. *Ore Geology Reviews*, 46, 118-148. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.015>
- Yurtsever, Y. & Gat, J. R. (1981). Atmospheric waters. In J. R. Gat & R. Gonfiantini (Eds.), *Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*, (pp. 103-142). International Atomic Energy Agency.
- Yücel, M. A., Şanlıyüksel Yücel, D. ve Özer, İ. (2024). İnkaya Mağarası ve çevresinin (Çan, Çanakkale) insansız hava aracı termal ve RGB kamera görüntüleri ile modellenmesi. F. Yıldırım (Ed.), *37. Arkeometri Sonuçları Toplantısı* (ss. 299-307). T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı.
- Yücel Öztürk, Y., Helvacı, C. & Satır, M. (2005). Genetic relations between skarn mineralization and petrogenesis of the Evciler Granitoid, Kazdağ, Çanakkale, Turkey and comparison with world skarn granitoids. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 14(3), 255-280.
- Zhang, B., Wang, F., Wang, R., Shang, Y., Li, F., Li, M. & Wang, T. (2025). Geothermal lithium extraction technology: Research status and prospects. *Energies*, 18(12), Article 3146. <https://doi.org/10.3390/en18123146>



Preliminary Results of Geological and GIS Studies from Surface Surveys at the Ancient City of Arneai (SW Türkiye)

Arneai Antik Kenti Yüzey Araştırmaları: Jeoloji ve CBS Çalışmalarının Ön Sonuçları (GB-Türkiye)

Ferda Öner^{1*} , Yaşar Arlı² 

¹ *Sahilkent Mahallesi, 10400, Ayvalık- Balıkesir, Türkiye*

² *Akdeniz University, Department of Archaeology, 07070, Antalya, Türkiye*

• Geliş/Received: 15.02.2026 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 29.05.2026 • Kabul/Accepted: 05.06.2026
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 15.08.2026 • Baskı/Printed: 31.08.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Abstract: A comprehensive surface survey was conducted in 2025 at the ancient city of Arneai, a site documented only to a limited extent in the scholarly literature. The investigations were carried out by an interdisciplinary team supported by modern technologies, focusing on the general geology of the city and its building stones. The ancient city of Arneai is located within the Tauride tectonic belt, which includes the Taurus Mountains. The oldest geological unit in the study area is the Upper Cretaceous Beydağları Formation which is overlain by Paleocene, Eocene, and Miocene units. Carbonate units are prevalent in the region. These units, predominantly limestone, were used as building stones in antiquity. Building stones for the ancient city were extracted from local (in-situ) limestone bedrock. Scattered, generally fragmented terracotta materials found on the surface appear to have two distinct colors. The red soil material is estimated to have higher iron content than the yellowish material. The small amount of slag material identified during the survey suggests the presence of small-scale smelting furnaces (possibly for lead production). These preliminary results provide a framework for future systematic archaeological excavations and detailed geological investigations.

Keywords: Arneai, geoarcheology, geology, structural geology.

Öz: 2025 yılında, bilimsel literatürde oldukça sınırlı düzeyde belgelenmiş olan Arneai antik kentinde kapsamlı bir yüzey araştırması gerçekleştirilmiştir. Modern teknolojilerle desteklenen disiplinler arası bir ekip tarafından yürütülen incelemeler, kentin genel jeolojisi ve yapı taşları üzerine odaklanmıştır. Arneai antik kenti ve çevresi, Toros Dağları'nı da kapsayan Torid tektonik kuşağı içerisinde yer almaktadır. Bölgedeki en yaşlı jeolojik birim, üzerinde Paleosen, Eosen ve Miyosen birimlerin yer aldığı Üst Kretase yaşlı Beydağları Formasyonu'dur. Bölgede karbonatlı birimler yaygınlık göstermektedir. Ağırlıklı olarak kireçtaşıdan oluşan bu birimler, antik çağda yapı taşı olarak kullanılmıştır. Antik kentin yapı taşlarının, yerel (in-situ) kireçtaşı ana kayasından üretildiği gözlemlenmiştir. Yüzeyde bulunan, genel olarak parçalı haldeki dağınık terakota (pişmiş toprak) malzemeler iki farklı renkte görülmektedir. Kırmızı renkli malzemenin, sarımsı malzemeye oranla daha yüksek demir içeriğine sahip olduğu tahmin edilmektedir. Yüzey araştırması sırasında tespit edilen az miktardaki cüruf malzemesi, (muhtemelen kurşun üretimi için kullanılan) küçük ölçekli ergitme ocaklarının varlığına işaret etmektedir. Bu ön sonuçlar, gelecekte yapılacak sistematik arkeolojik kazılar ve ayrıntılı jeolojik incelemeler için bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Arneai, jeoarkeoloji, jeoloji, yapısal jeoloji.

INTRODUCTION

Located in the mountainous terrain of the Central Lycia region, the ancient city of Arneai is situated on a steep mountain promontory south of the village of Ernez (formerly Günçalı) within the Finike district of Antalya province (Figure 1) (Arlı, 2025). To reach the city, one must travel about 29 km on the Finike-Elmalı road, pass the village of Gökbük, and then take the shortcut on the left towards Kaş (Arlı, 2025). Then 12 km past this junction, the village of Yazır appears, 7 km further, another junction leads to a village road. Proceeding 4 km down this road is the village of Ernez (Arlı, 2025). Arneai, which encompasses İnönü and Asar Hills, remains one of the lesser-known cities in the Lycian region.

To date, no systematic excavation or comprehensive surface surveys have been conducted at the site. Systematic surface surveys within the urban territory by a multidisciplinary research group commenced in 2025.

The earliest data regarding the city was provided by C. Texier, who visited in 1836 (Texier, 1862). Sharing his observations on the city's location, name, and extant architectural remains, Texier noted that the settlement's modern name,

Ernez, could be easily identified with the Arneai mentioned by Stephanos Byzantios (Texier, 1862). In 1847, T. A. Spratt and E. Forbes also mentioned Arneai in their joint work (Spratt and Forbes, 1847; Arlı, 2025). However, in their work entitled 'Travels in Lycia', both researchers stated they intended to visit the city but were unable to enter due to a plague quarantine, limiting their observations to distance viewing (Spratt and Forbes, 1847; 2008; Arlı, 2025). Nevertheless, they concurred with H. Loev, who had the opportunity to visit the city prior to the outbreak, noting the phonetic similarity between "Ernez" and "Arneai", and confirming that the ruins on the hill corresponded to the ancient city (Spratt and Forbes, 1847; 2008; Arlı, 2025).

In addition to these sources, researchers visiting in the late 19th century examined the city's inscriptions and published archaeological data (TAM II 756-783). In the early 20th century, another researcher who conducted investigations at the site provided accounts concerning the city and documented its Byzantine-period structures (Rott, 1908). Toward the end of the 20th century, G. E. Bean published a brief introductory text on Arneai, drawing on earlier accounts (Bean, 1962, 1978).



Figure 1. Location map of the ancient city of Arneai (URL-1).

Şekil 1. Arneai antik kenti yer bulduru haritası (URL-1).

Beyond these existing records, this study aims to share archaeological data obtained from the comprehensive, interdisciplinary surface survey conducted at Arneai.

Accordingly, this paper presents preliminary results about the general geology of the ancient city and its surroundings, as well as characteristics of its building stones (including ceramics), based on the fieldwork within the scope of surface surveys conducted in 2025.

The ancient city is located south of Ernez village, centered around Kale Hill (726 m) and the Asar Ridge (Figure 2). However, initial investigations indicate that the ruins extend over a much wider area than the immediate vicinity of Ernez village.

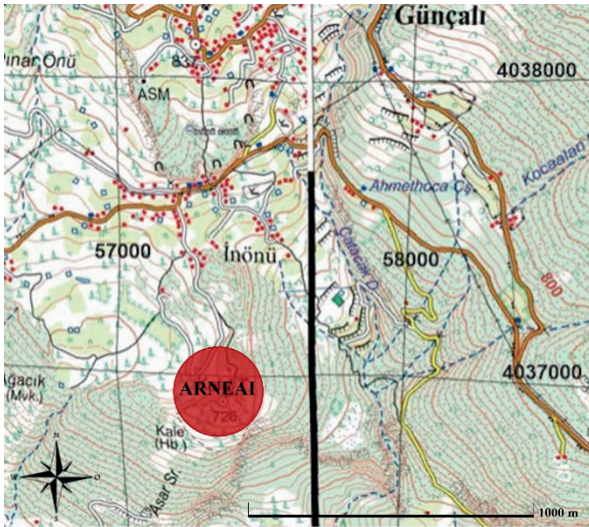


Figure 2. Topographic map of the ancient city of Arneai and surroundings (European Datum 1950, 6 degree).

Şekil 2. Arneai antik kenti ve çevresinin topoğrafik haritası (ED50-6 derece).

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) and TOPOGRAPHIC ANALYSIS

To establish the geographic information system (GIS) infrastructure for the archaeological surface surveys of the ancient city of Arneai, stereographic images were first obtained along specific lines using an unmanned aerial vehicle (UAV-Drone). Subsequently, 3D orthophotos of the study area were generated. As Google Earth satellite imagery often lacks sufficient resolution, this issue was resolved by integrating 3D images derived from drone footage into GIS software, enabling the acquisition of clearer visuals of ancient structures.

A DJI Mavic Pro drone was used for aerial imaging. Stereographic flights were planned using Fly Drone Controller software, ensuring 60% overlap between images and flight lines. Flight altitudes were maintained between 60–80 m based on software guidance. Due to the scale of the site, the survey area was segmented, and the data subsequently merged to create a unified dataset. To minimize the noise inherent in photogrammetric data, a 5x5 median convolution filter was applied to the digital elevation model (DEM) (Figure 3). Image alignment, dense point cloud generation, and 3D modeling processes were performed using Agisoft Metashape Professional. The high-resolution orthophoto obtained at the end of this process documents the current state of the study area (Figure 4A). The high-resolution dataset generated in Agisoft Metashape was subsequently exported to Global Mapper software for advanced topographic analysis. Filtered dataset enabled the production of a refined hillshade (relief) map, which significantly improved the visibility of micro-topographic features—such as terrace walls and collapsed structures—that are otherwise obscured in standard satellite imagery (Figure 4C).

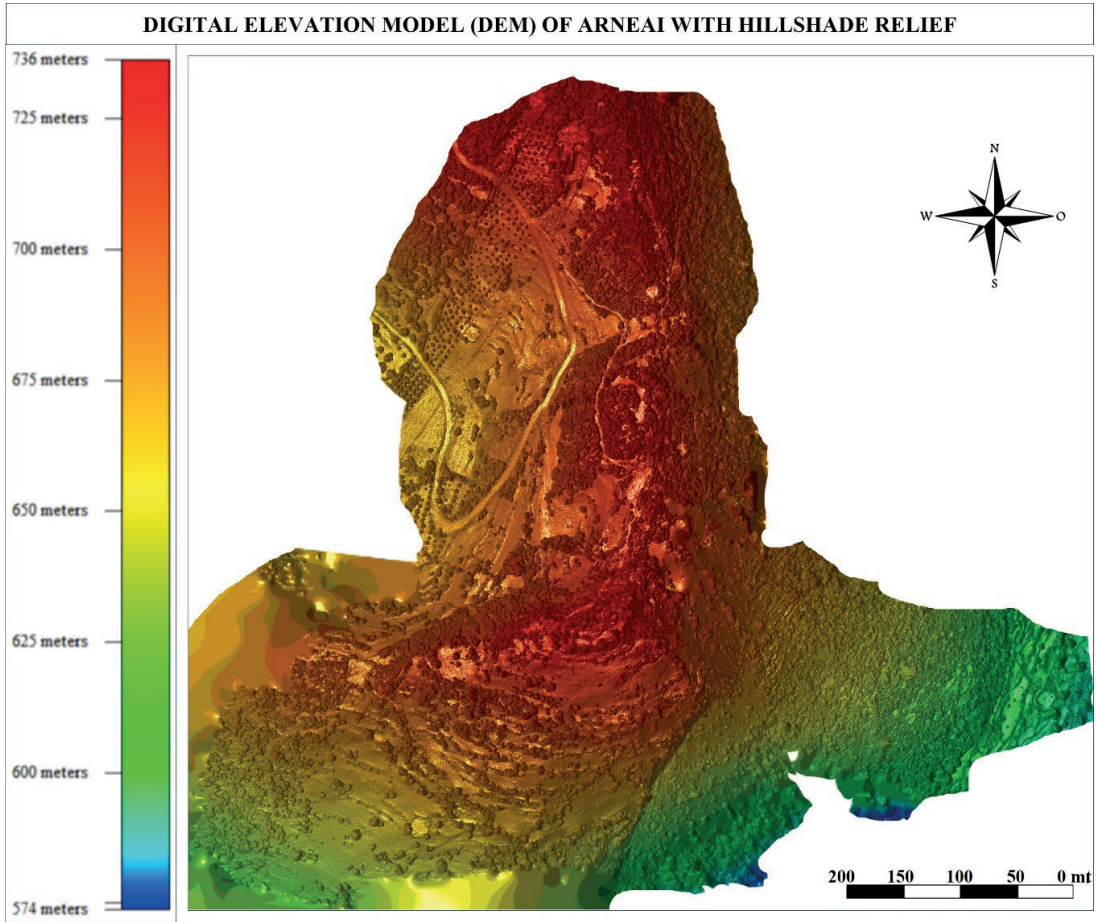


Figure 3. Digital elevation model (DEM) of Arneai. The model is enhanced with a 5x5 median convolution filter and hillshade relief to visualize the micro-topographic features and elevation ranges (574 m to 736 m) of the settlement area.

Şekil 3. Arneai Sayısal Yükseklik Modeli (SYM). Yerleşim alanındaki mikro-topografik özellikleri ve yükseklik aralıklarını (574 m - 736 m) görselleştirmek amacıyla; model, 5x5 Median Convolution Filter (Ortanca Konvolüsyon Filtresi) ve Hillshade (gölgeli kabartma) analizi ile zenginleştirilmiştir.

Within the scope of geomorphological slope analysis conducted to evaluate the spatial organization of the settlement, the data were classified into five categories (0-5°, 5-15°, 15-25°, 25-45°, and 45-90°) to distinguish between habitable plains and steep terrain (Figure 4B). These analyses scientifically demonstrated the ancient city's adaptation to the rugged Lycian topography and terracing strategies. To ensure full compatibility with the existing 1/25,000 scale topographic maps of the region, all GIS data were projected in the ED50 (European

Datum 1950) 6-degree geodetic system. The spatial data obtained constitute the primary dataset for discussing the correlation between the architectural distribution of the settlement fabric and topographic constraints. Preliminary assessments of whether the architectural remains identified in the 2025 surface survey are randomly distributed or spatially organized reveal a clustered spatial pattern rather than a random distribution; this indicates that the placement of structures was largely conditioned by topographical suitability and functional planning principles.

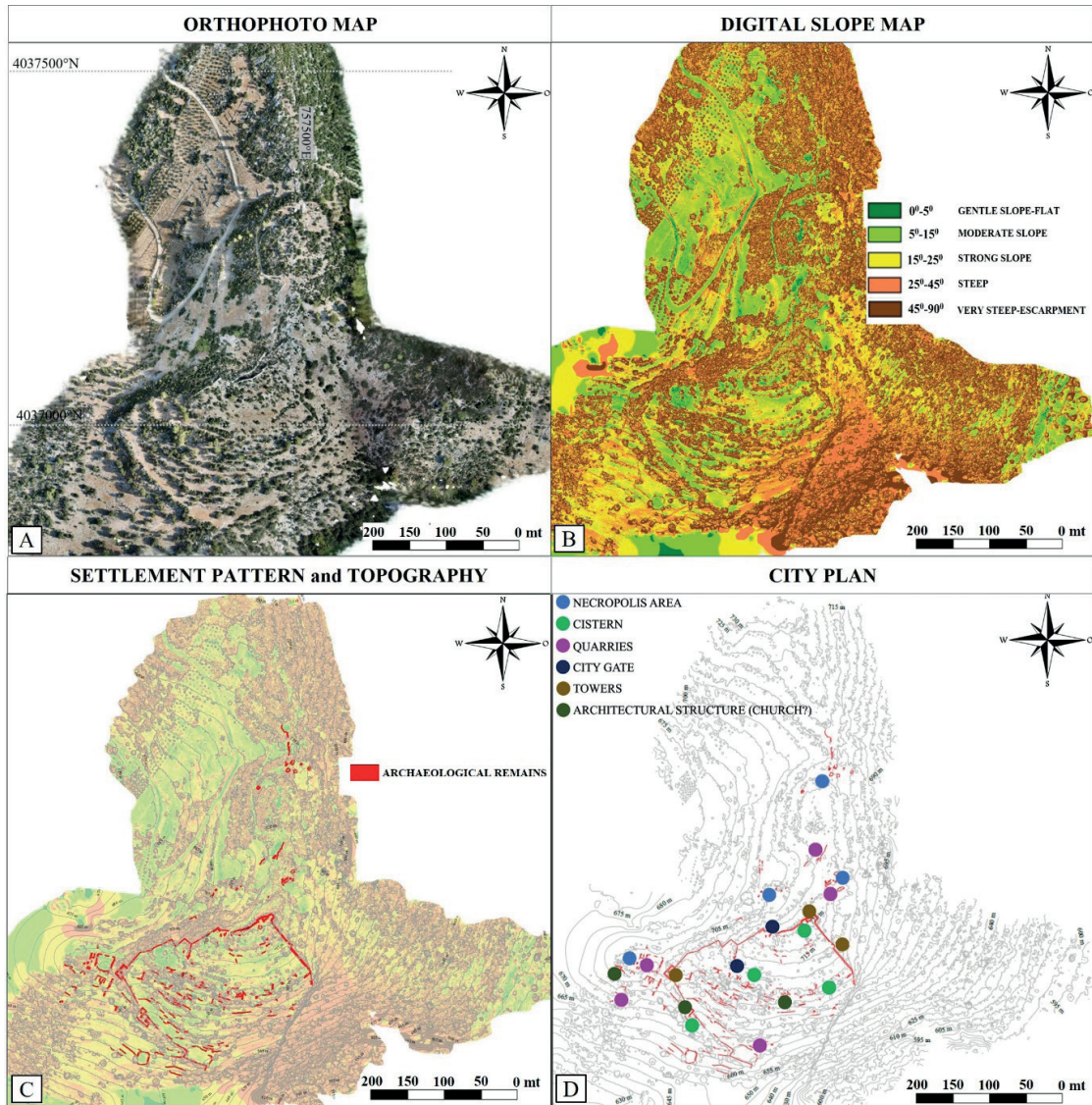


Figure 4. Integrated GIS analysis of Arneai: (A) orthophoto map, (B) digital slope map, (C) settlement pattern and topography, (D) city plan.

Şekil 4. Arneai entegre CBS analizi; (A) Ortofoto haritası, (B) Sayısal eğim haritası, (C) Yerleşim dokusu ve topografya, (D) Şehir planı.

Specifically, the architectural remains tend to concentrate in areas with moderate slopes between 10° and 15°, where construction costs and terracing requirements are relatively lower. This clustered organization reflects a deliberate settlement strategy adapted to the rugged geomorphology of Central Lycia.

The urban development of Arneai represents a sophisticated adaptation to the rugged Lycian topography, where architectural planning was strictly dictated by geomorphological and geological constraints. To quantify this relationship, a series of advanced GIS-based spatial analyses were performed using a high-resolution DEM (Figure 3).

Quantitative data derived from the reclassified slope analysis indicate that approximately 70% of the architectural remains identified during the initial survey season are concentrated on moderate gradients between 10° and 15°. This specific range appears to serve as a deliberate engineering threshold; while gentler slopes (0° to 10°) were prioritized for public buildings to minimize substructure costs, residential units were strategically distributed across steeper terraces (15° to 25°). Areas exceeding 45° gradient functioned as natural defensive barriers; in these sections, the precipitous terrain superseded the need for artificial fortification, highlighting a cost-effective defense strategy (Figure 4B).

The city's defensive network and visual command were evaluated through viewshed analysis conducted from the acropolis (736 m) and identified watchtowers (Figure 3, 4C, 4D). The results indicate comprehensive visual dominance over the entire valley and the surrounding *territorium*, enabling synchronized control of the urban core and its rural hinterland. This strategic positioning is further supported by the city's hydrological adaptation. Drainage networks were engineered parallel to contour lines to manage surface runoff, while cisterns were strategically positioned at higher elevations to facilitate gravity-fed water distribution (Figure 4D). Hydrological analyses derived from the DEM show that water management strategies in Arneai are closely related to the natural topography. Drainage channels identified during the first surface survey season appear to have been planned parallel to contour lines. Furthermore, the placement of cisterns at higher elevations suggests the deliberate use of gravity-assisted water distribution systems. These preliminary findings are significant in demonstrating that hydrological adaptation was a fundamental component of the city's planning strategy.

In addition to standard line-of-sight analyses, the reciprocal line-of-sight relationships between the acropolis and potential watchtower locations were assessed to reconstruct the settlement's defensive communication network. The results indicate that the main observation points were in direct visual contact with both the urban core and the surrounding valley systems. This interconnected visual network likely enabled rapid communication and regional surveillance in mountainous terrain. These preliminary findings suggest that the strategic placement of defensive structures reflects not only military concerns but also an advanced understanding of topographical visibility and terrain control (Figure 5).

Surface finds and architectural data identified during the 2025 surface surveys were subjected to kernel density analysis in the Global Mapper environment (Figure 6). The density layer, generated using search radius parameters that optimally reflect the spatial continuity and clustering pattern of the data, was overlaid with the settlement plan and topographic data (overlay analysis). The resulting analytical map strongly supports the interpretation that socio-spatial activity within the settlement was not randomly distributed. It forms a single high-density hotspot (very high density) in the sheltered terrace between elevations of 645 m and 670 m and in the center of the main architectural fabric. This analysis is consistent with the interpretation that settlement organization was shaped by defense, accessibility, and topographic adaptation strategies.

The relationship between the archaeological fabric and the geological substrate was further elucidated through overlay analysis. The primary building material consists of *in-situ* limestone sourced from five ancient quarries identified in the immediate vicinity of the settlement. The spatial proximity of these quarries to major construction zones indicates a highly organized

logistical strategy aiming to reduce transport costs. Furthermore, functional zoning reflects a clear geological correlation: necropolis areas were established on monolithic limestone outcrops suitable for rock-cut tombs, whereas domestic and public sectors were positioned on more workable local limestone units. The subsequent repurposing of exhausted quarries as workshops or artisanal areas further illustrates the efficient and multi-phased utilization of Arneai's geological resources.

GEOLOGICAL SETTING OF ARNEAI AND ITS SURROUNDINGS

General Geology

Regionally, the ancient city of Arneai is situated within the Tauride tectonic belt (Figure 7) (Ketin, 1966; Okay and Tüysüz, 1999). The region is represented by oceanic crust rocks from the Tethys Ocean and overlying dense marine carbonate and clastic sediments, which were uplifted following closure of the ocean. The region, now known as the “Taurus Mountains”, extends eastward as a high limestone mountain range into Iran and the Himalayas (Zhao et al. 2020).

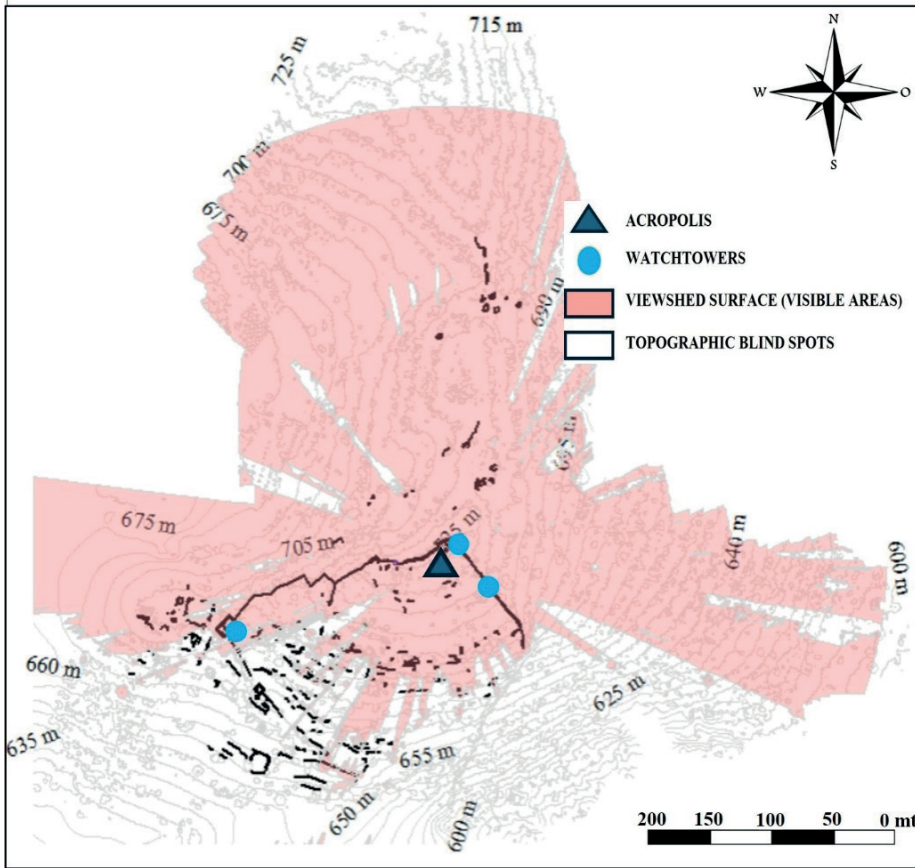


Figure 5. Intervisibility and viewshed map of Arneai. The computational model integrates topographic contours to visualize the tactical line of sight and optical surveillance coverage radiating from defensive checkpoints within the settlement topography (595 m to 725 m).

Şekil 5. Arneai Görünürlük (Viewshed) ve Karşılıklı Görüş Haritası. Savunma kontrol noktalarından yayılan taktiksel görüş hattını ve optik gözetleme hakimiyetini yerleşim topoğrafyası (595 m - 725 m) üzerinde görselleştirmek amacıyla; bilgisayarlı model, eş yükselti eğrileri ile bütünleştirilmiştir.

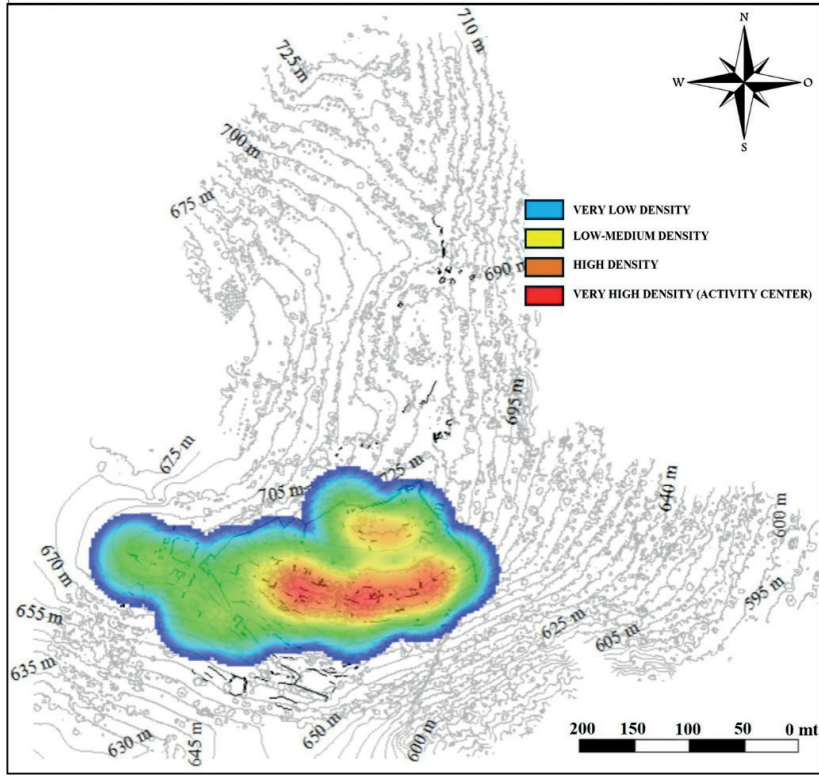


Figure 6. Kernel density estimation (KDE) map of Arneai. The model is integrated with topographic contours to visualize the spatial concentration and distribution hierarchy of architectural remains and artifact assemblages on the settlement terraces (635 m to 725 m).

Şekil 6. Arneai Çekirdek Yoğunluk (Kernel Density) Haritası. Yerleşim teraslarındaki (635 m - 725 m) mimari kalıntıların ve buluntu gruplarının mekânsal yoğunlaşmasını ve dağılım hiyerarşisini görselleştirmek amacıyla; model, topoğrafik eş yükselti eğrileri ile bütünleştirilmiştir.

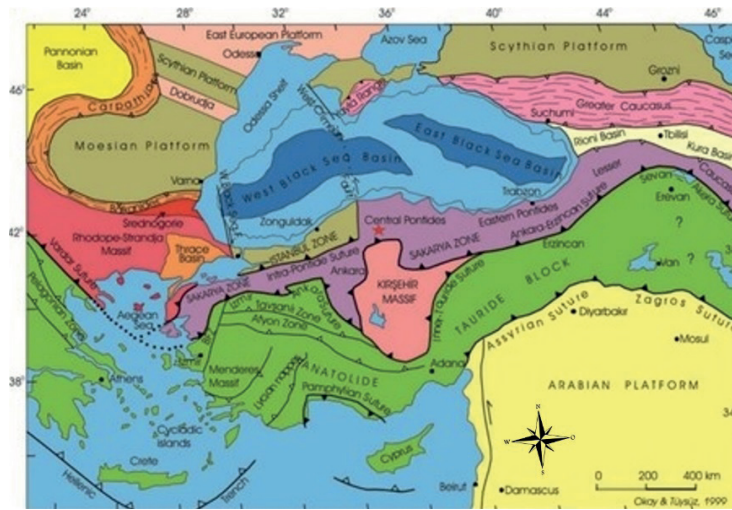


Figure 7. Tectonic units of Anatolia (Okay & Tüysüz, 1999).

Şekil 7. Anadolu'nun tektonik birlikleri (Okay ve Tüysüz, 1999'dan değiştirilmiştir).

The ancient city of Arneai and its surroundings are located within the tectonic unit known as the Beydağı Autochthon (Şenel, 1997). The base of the Beydağı autochthon consists of Upper Cretaceous (Cenomanian) limestones deposited in a shelf environment. These are overlain by Paleocene and Eocene limestone-dominant sedimentary units (Şenel and Bölükbaşı, 2010; Şenel et al. 1994; Rathur, 1967). Clayey horizons are observed within the Paleocene units. Upper Cretaceous limestones represent the oldest unit in the region (Figure 8).

The research area lies within the Teke Peninsula, part of the Western Taurus system. The main geological units consist of the widespread Beydağları autochthon, the overlying Lycian nappes, and the Yeşilbarak nappe, which

represents lateral continuity between them. The allochthonous Lycian nappes were transported onto the Beydağları autochthon from the north/northwest during the early Langhian period. This tectonic emplacement caused intense deformation in the autochthonous units, resulting in folding, faulting, and southward thrusting (Susuzdağ thrust). Current geological data reveal that large-scale fault systems were active in the late Pliocene and subsequent periods. The area acquired its present morphological characteristics through the combined effects of post-Langhian erosional processes and these tectonic structures (Şenel and Bölükbaşı, 2010). The geological units defined in this study are discussed based on the formation nomenclature used by Şenel and Bölükbaşı (2010) (Figure 9).

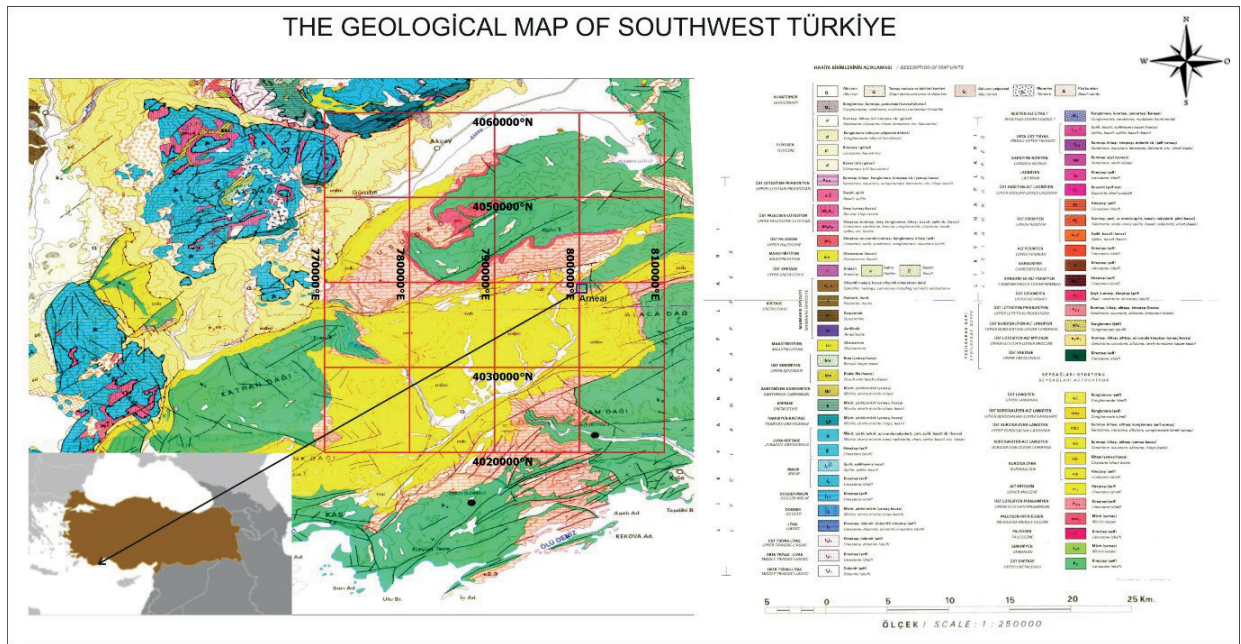


Figure 8. Regional geological map of the ancient city of Arneai and its surroundings (Şenel and Bölükbaşı, 2010) (ED-50, 6 degree).

Şekil 8. Arneai antik kenti ve yakın çevresinin bölgesel jeoloji haritası (Şenel ve Bölükbaşı, 2010) (ED50-6 derece).



Figure 9. Geological map of the ancient city of Arneai and its surroundings (simplified based on MTA, 2010 data, from Şenel and Bölükbaşı, 2010; European Datum 1950, 6 degree).

Şekil 9. Arneai antik kenti ve çevresinin jeoloji haritası (Şenel ve Bölükbaşı, 2010 verileri kullanılarak MTA, 2010'dan basitleştirilmiştir) (ED50-6 derece).

Beydağları Formation (Krf)

The Beydağları Formation, composed of Liassic-Late Cretaceous neritic carbonates, is represented by Late Cretaceous limestones with reefal characteristics containing rudist fossils in places (Figure 9).

The formation consists of medium-to-thick layered reefal gray to light-gray weathering surfaces and beige, cream, or off-white fresh fracture surfaces. It includes local layers of off-white, chalky clayey limestone, as well as beige and light-gray dolomite and dolomitic limestone.

Dolomitization and recrystallization are common in and around the rudist reefs. The unit is hard, densely fractured, and exhibits karstic dissolution cavities. Fractures are calcite-filled, while wider fissures are locally filled with aragonite.

Gedikbaşı Formation (Tpg)

The Gedikbaşı Formation is represented by medium-to-thick bedded, hard, and densely fractured neritic limestones. Weathered surfaces are gray or light gray, while fracture surfaces are beige, cream, or light brown. Due to lithological

similarities, it is difficult to distinguish from the Beydağları Formation. These limestones, which are locally milioidal and algal, also contain occasional dolomite and dolomitic limestone layers. The formation is dated to the Paleocene based on fossil content.

Susuzdağ Formation (Tes)

The Susuzdağ Formation consists of medium-to-thick layered limestones rich in nummulites and alveolina. Weathered surfaces are gray to light gray, while fracture surfaces are beige, cream, or off-white. The unit is dated to the Eocene. Fossils and trace fossils of algae, corals, lamellibranchs, echinoids (sea urchins), pelecypods, and gastropods are frequently encountered (Figure 10).

The unit, which includes dolomite, dolomitic limestone, and recrystallized limestone layers in places, is characterized by terrestrial dissolution cavities. These cavities, known locally as “in” (caves/dens), have been used by humans from antiquity to the present (Figure 11). These caves formed naturally through karstification processes,

evidenced by stalactite and stalagmite formations (Figure 12). Humans likely modified these natural formations by expanding and shaping them in post-geological periods. Figure 11 shows a clayey horizon at the base of the caves. Rainfall percolating through fractured limestone throughout geological history reached this clay layer; unable to seep further down, the water dissolved the rock just above the clay, forming these caves.

In this unit, where karstification is widespread, small-scale structures such as poljes and dolines (sinkholes) developed. These types of structures are collapse formations created by the erosion of limestone by surface waters. A fairly large, polje-like structure (approximately 1 km in diameter) is also clearly visible in satellite imagery just north of the ancient city (Figure 13A-13B).

The ancient city and Ernez village are located on the Susuzdağ Formation, which consists of solid and easily workable limestone. These limestones were used as building stones in the fortification walls and architectural structures of the ancient city. Limestones from the same formation were used for the construction of rock tombs and sarcophagi.



Figure 10. Pelecypoda (A) and sea urchin (B) fossils in Susuzdağ Limestones.

Şekil 10. Susuzdağ Kireçtaşları içerisinde gözlenen pelecypoda (A) ve deniz kestanesi (B) fosilleri.

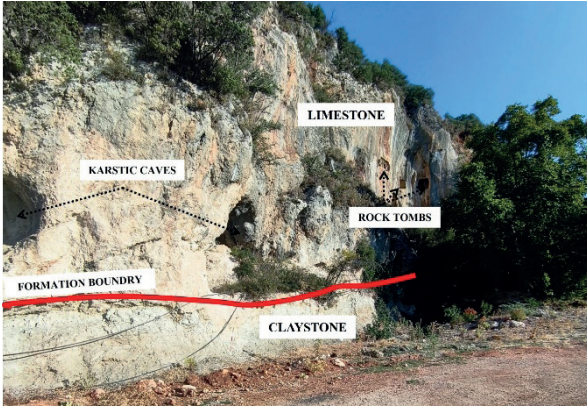


Figure 11. Karstic caves and rock tombs developed and carved in Susuzdağ Limestones.

Şekil 11. Susuzdağ Kireçtaşları'nda gelişmiş karstik mağaralar ve oyulmuş kaya mezarları.



Figure 12. Stalagmite and columnar forms observed in karst cavities.

Şekil 12. Karstik boşluklarda gözlenen dikit ve sütun formları.

Sinekçi Formation (Tms)

The Sinekçi Formation, consisting of algal limestone, clayey limestone, and claystone from bottom to top, comprises base algal limestones identified as the Gömüce Member (Tmsg); middle clayey limestones known as the Kıbrisdere Member (Tmsk); and uppermost claystones called the Çayboğazı Member (Tmsç). The age of the Sinekçi Formation and its subunits is given as Miocene (Şenel and Bölükbaşı, 2010).

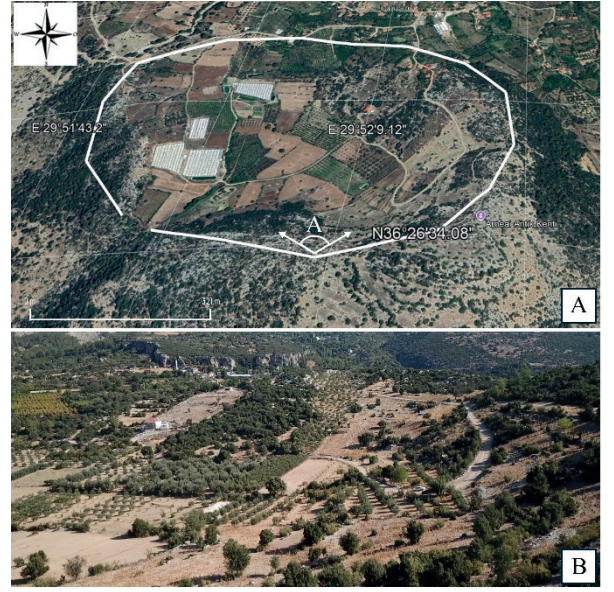


Figure 13. A) Possible polje observed north of the castle in Arneai ancient city. B) View of the polje from point A.

Şekil 13. A) Arneai antik kenti kalesinin kuzeyinde gözlenen olası polye. B) Polyenin A noktasından görüntüsü.

Kasaba Formation (Tmka)

The Kasaba Formation, which contains thin-to-medium-thick bedded, green, greenish-grey, dark grey, light grey, beige, cream, and light brown sandstone, siltstone, claystone, and conglomerate, is represented north of Katran Mountain by grain-supported, coarse-grained conglomerates and a small amount of sandstone. The age of the formation is given as Miocene, like the Sinekçi Formation (Şenel and Bölükbaşı, 2010).

In the ancient city area, pebbles of serpentine, basalt, radiolarite, and chert (e.g., opal) derived from the Kasaba Formation were observed (Figure 14). It is probable that these fragments were transported from the overlying Kasaba Formation via fluvial erosion over geological time.



Figure 14. Radiolarite-chert (A), serpentine (B) and basalt (C) pebbles observed around the ancient city.

Şekil 14. Antik kent çevresinde gözlenen radyolarit-çört (A), serpantin (B) ve bazalt (C) çakılları.

Quaternary alluvial units

In the study area, recent Quaternary deposits are observed as river valley and flood plain sediments (Figure 9).

Tectonics

The structural outlines of Ernez (Günçalı) and its surroundings were delineated by evaluating satellite imagery in conjunction with field studies (Figure 9). Fault lines are generally observed in three directions. The first and primary trend is NE-SW (approximately 45° azimuth). Fault lines oriented NW-SE intersect and, in some areas, displace this primary trend. The third set of lines is generally observed trending E-W. These faults may have originated from karstic movements, as they developed along the frontal sections of the karst caves in the cave region (İnler), leaving the caves at a higher elevation relative to their original position (Figure 15).

The main settlement area of Ernez (Günçalı) village acquired its present topography through ancient faulting events. Structural elements are clearly visible when the Beydağ Mountains are observed from the acropolis (Figure 15).

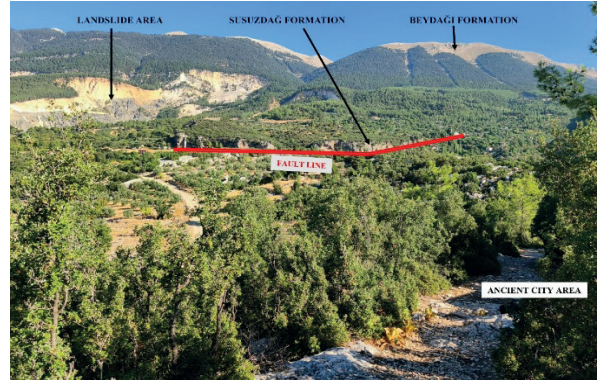


Figure 15. Ancient road leading to the acropolis, Ernez village and landslide-fault lines.

Şekil 15. Akropolise giden antik yol, Ernez köyü ve heyelan-fay hatları.

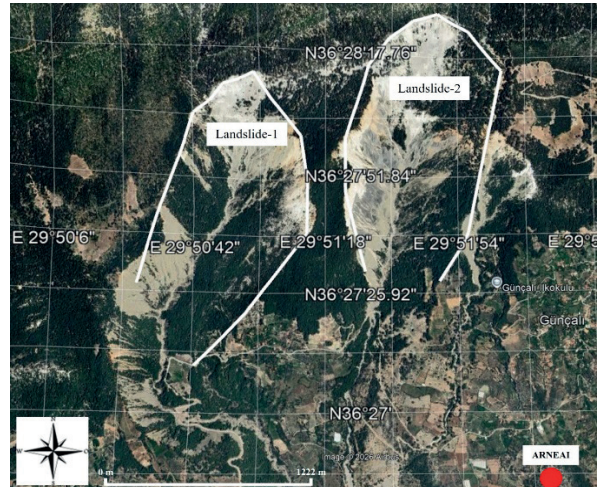


Figure 16. Landslide areas located NW of Ernez (Günçalı) village.

Şekil 16. Ernez (Günçalı)kuzeybatısındaki heyelan alanları.

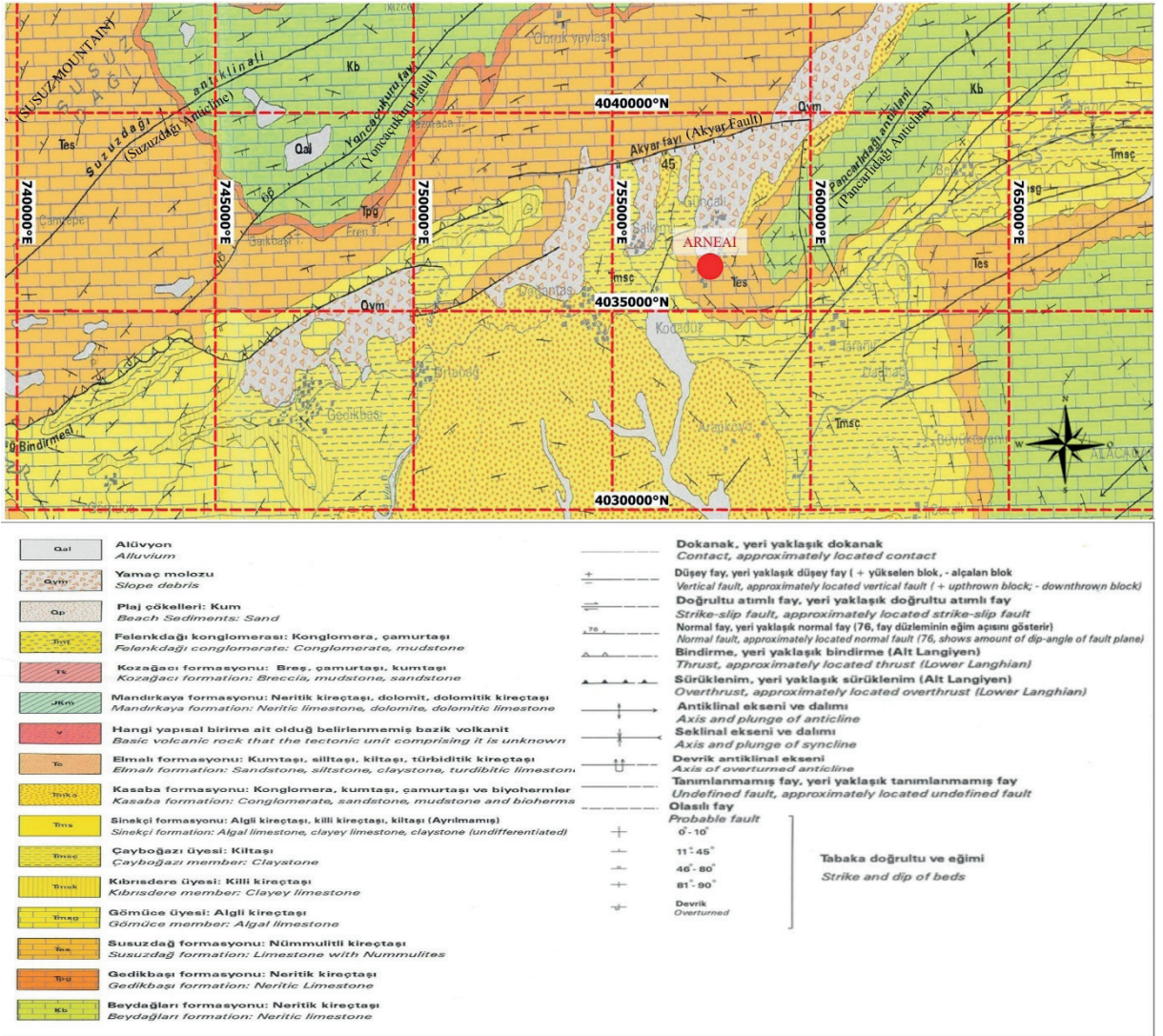


Figure 17. Geological map of Ernez (Günçalı) village and surroundings at a scale of 1:100,000 (Şenel and Bölükbaşı, 2010).

Şekil 17. Ernez (Günçalı) köyü ve çevresinin 1:100.000 ölçekli jeoloji haritası (Şenel ve Bölükbaşı, 2010).

To the north and northeast of Ernez village, landslide zones developed due to SW-NE trending dip-slip normal faults associated with the extension of the Beydağları Mountains (Figure 16). In the center of Ernez (Günçalı) village, no major landslide activity is observed, apart from minor movements. The Akyar Fault (Figure 17), a dip-slip normal fault identified by MTA (General Directorate of Mineral Research and Exploration)

(Şenel and Bölükbaşı, 2010) passing north of Ernez (Günçalı) village, shaped the current topography; the southward movement of its hanging wall caused subsidence of the southern section (Şenel and Bölükbaşı, 2010).

Faults exhibiting characteristics similar to the Akyar Fault played a significant role in the construction of the ancient city, particularly regarding the fortification walls surrounding

the acropolis. While fortification walls encircle the acropolis to the north, west, and south, construction terminates in the southeast, where a natural rock face formed by faulting serves as a defensive barrier.

BUILDING MATERIALS IN ARNEAI

Fortification Walls – Architectural Structures – Rock Tombs – Building Stone Quarries

The ancient city of Arneai was built from construction stones with similar characteristics. Studies show that limestone extracted from local (in-situ) rocks was used for both the fortification walls and the architectural structures (Figure 18).

The use of local materials in city construction is confirmed by the presence of five quarries identified in studies conducted throughout the city in 2025 (Figure 19). Once quarrying operations ceased, it is suggested that these areas may have been repurposed as residential spaces or workshops in later phases (Figure 19).

Preliminary assessments based on the DEM created as a result of the first season's work in 2025 reveal a logistical relationship between the identified quarries and the architectural sectors in the area. The resulting routes suggest that the quarries were strategically positioned along

corridors that minimized transport difficulty and energy expenditure. Preliminary findings indicate that large architectural concentrations closely coincide with these optimized access corridors, and that quarrying operations and urban development are integrated within a coordinated resource management system. This analysis highlights the role of topography in shaping construction logistics and urban planning in Arneai.

Furthermore, shallow marine limestones (Susuzdağ Formation) containing Eocene nummulite and other fossils were used for all rock tombs and building materials, including sarcophagi (Figure 20).

As observed in Figures 18 and 19, the building blocks are generally yellowish-beige and cream-colored, although some blocks appear whiter or light beige (Figure 21).

The presence of two distinct colors suggests that the building stones were sourced from different quarries or from two separate strata within the same quarry. Quarry locations identified during the 2025 archaeological surface survey of Arneai were mapped (Figure 19). While some ancient cities built on limestone formations, such as Phaselis, possess a central main quarry in addition to local extraction sites, no such main quarry has yet been identified for Arneai (Öner, 2020).

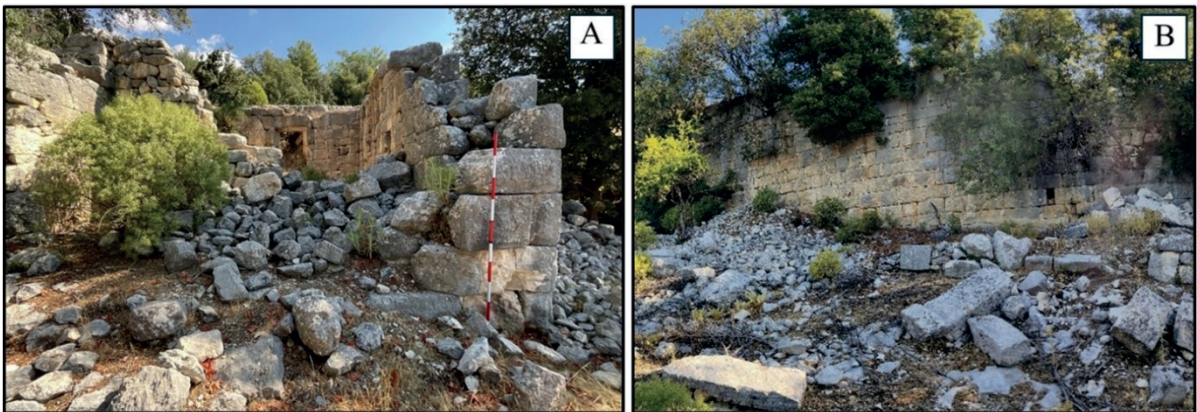


Figure 18. Structure S (A) and southern fortification wall (B).

Şekil 18. S yapısı (A) ve güney sur duvarı (B).

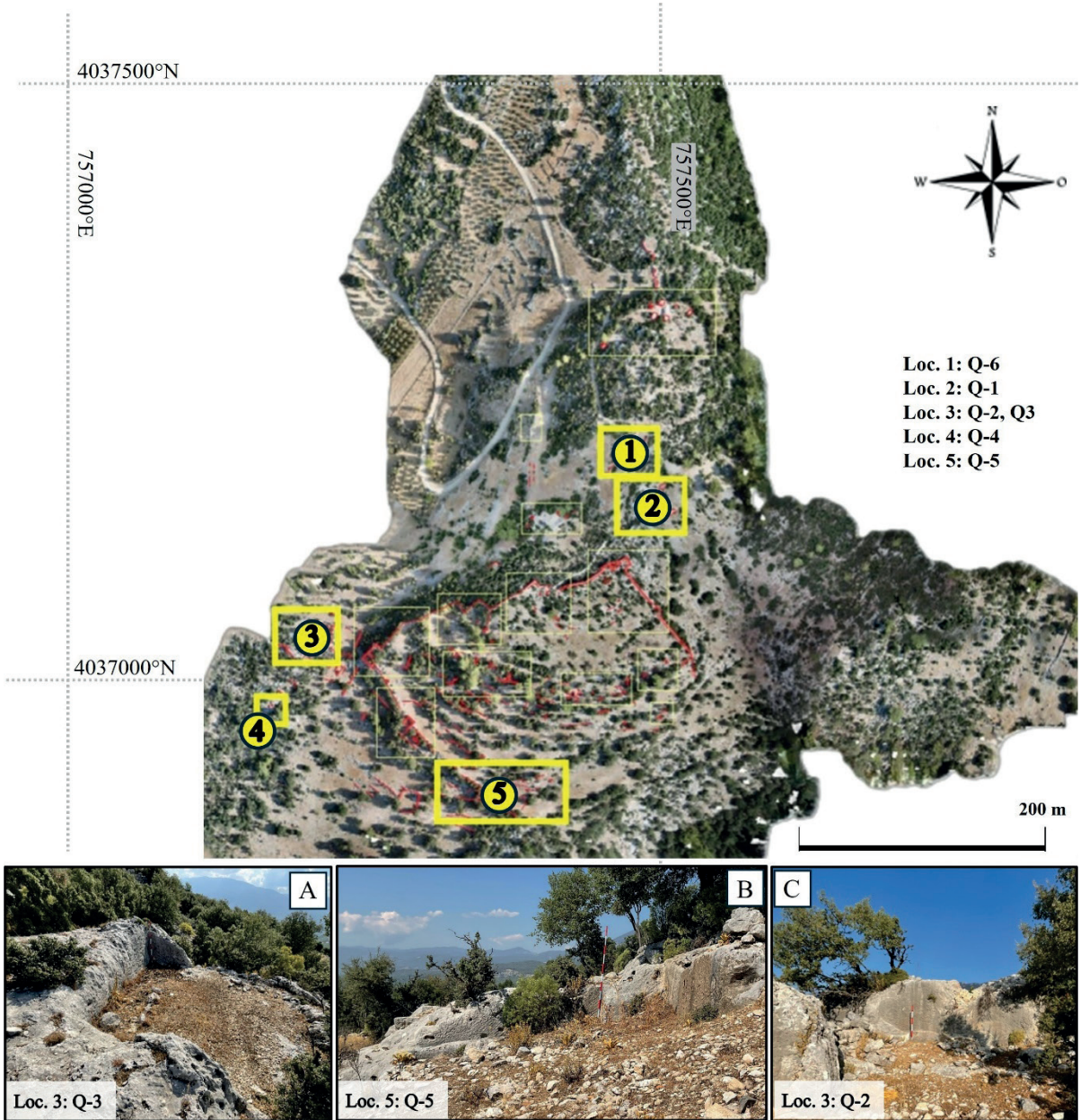


Figure 19. Building stone quarries in the ancient city of Arneai (ED-50, 6 degree). *A, B & C* Examples of building stone quarries.

Şekil 19. Arneai antik kentinin yapı taşı ocakları (ED-50, 6 derece). *A, B ve C* yapı taşı ocaklarından örnekler.

Fossils such as nummulites observed in the limestones of the Susuzdağ Formation characterize a shallow, nearshore marine environment. These limestones developed in warm, shallow waters bordering the Tethys Ocean during the Eocene (56 to 34 million years ago). Due to their partial

clay content, they are relatively soft and easily workable. Occurring in extensive zones spanning kilometers, particularly in the southern Taurus Mountains, these limestones remain highly valued in the modern marble trade.



Figure 20. Nummulites fossil in limestone (fossil is approximately 1 cm long).

Şekil 20. Kireçtaşı içerisinde nummulites fosili (fosil uzunluğu yaklaşık 1 cm'dir).



Figure 21. Whitish-beige block (with chisel marks).

Şekil 21. Beyazımsı-bej blok (murç izleri ile birlikte).

Slags

Some metal slag was observed during surface surveys of the ancient city of Arneai. It was generally found scattered in areas in the western and southern parts of the acropolis (Figure 22).

The slag fragments, approximately 3-4 cm in size, are iron-rich residues resulting from ore smelting.



Figure 22. Mining slags.

Şekil 22. Maden cürüfları.

Chemical analysis is necessary to determine which ore was extracted from these residues. However, it is possible to say that it is not copper. This is because copper slag, in its residual form, oxidizes over time, giving rise to green stains, commonly known as “copper rust.” This color was not observed in the material found in the area. Only iron oxide (limonitization) formations, resulting from the thermal decomposition of pyrite (FeS_2), an iron sulfide mineral found together with the metal minerals used, were observed. It is considered possible that these are residues of galena (PbS) ore used in lead production. The absence of dense slag deposits suggests that this was likely a small-scale trial furnace or experimental operation rather than a major production site.

Soil materials

Ceramic materials produced from clay, scattered throughout almost the entire ancient city of Arneai, were also examined. These were identified as fragments of tiles, bricks, amphora fragments, ceramic earthenware fragments, and pipe fragments. Further mineralogical (optical microscopy and XRD) and chemical analyses (major element and, if possible, isotope chemistry) are required to determine the provenance of these fragments and the location of the clay

sources. However, preliminary observations of color differences suggest that production utilized materials from at least two separate clay sources, or distinct strata within the same source. The yellow-to-light-green artifacts found in the area are composed of low-iron, carbonate-rich montmorillonite and illite clays. Due to their structure, these clays are unsuitable for fine ware production and were instead used for construction materials such as tiles and bricks. The distinctly brown and reddish finds identified during the survey are composed of iron-rich clay material (Figure 23).

The color variations in the finds identified during the Arneai surface survey may stem from the use of ferrous versus non-ferrous clay layers within the same pit, or materials extracted from entirely different quarries. In this case, the material could have been taken from the area surrounding the ancient city or from outside. The area from which the yellowish ceramic materials were taken is thought to be clay formations (clay formations under the caves) in the “caves” location north of the ancient city (Figure 11).



Figure 23. Soil material residues.

Şekil 23. Toprak materyali kalıntıları.

These interpretations should be considered preliminary geoarchaeological hypotheses pending future archaeometric analyses such as pXRF, XRD, petrographic thin-section studies, and isotopic characterization.

RESULTS

As the archaeological surface surveys of the ancient city of Arneai were conducted over a short period in September 2025, the findings presented here are preliminary. Despite the limited duration, the use of modern technology provided significant data to guide future research.

Drone photography enabled the creation of detailed orthophotos, and coordinates for all identified structures were mapped (ED50). The integration of high-resolution DEM and slope analyses revealed a deliberate urban planning strategy. The concentration of approximately 70% of the architectural remains on 10–15° slopes proves that the city was a highly organized urban center that utilized advanced terracing to adapt to the rugged Lycian terrain. This integration of aerial and field data facilitated the identification of quarries and watchtowers, where viewshed analyses confirmed a comprehensive visual command over the entire valley and the surrounding territorium.

During the archaeological surface survey in the ancient city, observations of building stones indicate that no material was brought from outside the city (eclectic). All building stones were produced from fossiliferous limestones belonging to the Susuzdağ Formation in the area where the ancient city is located. The spatial proximity of the five identified quarries to the primary construction zones suggests an optimized logistical strategy aiming to reduce transport costs, indicating a sustainable resource management system.

The presence of some remnants of mining slag on the surface also suggests that there may have been at least some small ore smelting furnaces in the ancient city.

Fieldwork revealed that the earthen materials (e.g., bricks, tiles, amphoras, pottery, etc.) found on the surface generally have two colors. This color variation can be attributed to the use of two different clay types as raw material sources.

Preliminary investigations of the caves in the İner locality of Ernez village, located outside the city's acropolis and foothills but within the territory boundaries, indicate that they naturally formed through karst processes. However, traces of human enlargement were also found in some caves. Furthermore, the positioning of cisterns and drainage networks demonstrates sophisticated hydrological adaptation to the terrain's morphology.

Beyond descriptive topographic visualization, the integration of spatial-statistical and landscape archaeological analyses enabled a more comprehensive interpretation of the relationship between geology, topography, and urban organization in Arneai. Kernel density estimation, viewshed analyses, and spatial comparisons between quarry zones, necropolis sectors, and architectural remains collectively suggest that the settlement developed through a highly adaptive spatial strategy shaped by geomorphological constraints, resource accessibility, and defensive requirements. These preliminary findings confirm that the urban fabric of Arneai was not randomly distributed throughout the landscape, but rather reflected a deliberate and environmentally dependent planning system.

Data obtained from archaeological surface surveys of the ancient city of Arneai, conducted over a short period, allow us to make a preliminary assessment of the city's geology. However, archaeological excavations and material analyses to be carried out in the coming years will provide much more detailed information about this city, which has not been extensively studied before.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Orta Likya Bölgesi'nde (GB Türkiye) yer alan Arneai antik kenti, Batı Toroslar'ın en az araştırılmış arkeolojik alanlarından biri olmaya devam etmektedir. 19. yüzyılda Texier ve Spratt

gibi gezginler tarafından bahsedilmiş olmasına rağmen, 2025 yılında başlayan çok disiplinli yüzey araştırmalarına kadar sahada sistematik bir kazı veya inceleme yapılmamıştır. Bu çalışma, antik kentin yerleşim stratejisini, litolojik tercihlerini ve tektonik konumunu anlamlandırmak amacıyla arkeolojik bulguları, jeoloji ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) verileriyle bütünleştirmeyi amaçlamaktadır.

Araştırmada yüksek çözünürlüklü bir CBS altyapısı kullanılmıştır. Havadan fotoğraf çekimleri, DJI Mavic Pro İHA (Drone) kullanılarak, 60-80 m irtifada ve %60 bindirmeli stereografik uçuş rotalarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, Agisoft Metashape Professional yazılımı ile işlenerek, standart uydu görüntülerinin çözünürlük sınırlarını aşan 3 boyutlu ortofotolar ve yoğun nokta bulutları oluşturulmuştur. Tüm mekânsal veriler, 1/25.000 ölçekli ulusal topoğrafik haritalarla uyum sağlaması amacıyla ED50 6 derecelik jeodezik datum sistemi kullanılarak koordinatlandırılmıştır. Yapılan yeniden sınıflandırılmış eğim analizleri, tespit edilen mimari kalıntıların %70'inin, alt yapı maliyetlerini optimize eden 10°-15° derecelik orta eğimli yamaçlarda yoğunlaştığını göstermiştir. Jeolojik değerlendirmeler, arazi gözlemlerine ve Beydağları otoktonu litostratigrafi adlamalarına dayandırılmıştır.

Arneai, Batı Toros tektonik kuşağı içerisinde yer alan Beydağları otoktonu üzerinde konumlanmaktadır. Stratigrafik istif, başta Susuzdağ Formasyon'u (Eosen) olmak üzere denizel karbonatların egemenliğindedir. Bu birim, yüksek dayanımı ve karstik potansiyeli ile karakterize edilen, nummulites ve alveolina fosillerince zengin neritik kireçtaşlarından oluşmaktadır (Şekil 9).

Bölge, tektonik olarak Susuzdağ Bindirme'si ve bunu izleyen Pliyosen faylanmalarıyla şekillenmiştir. Arazi çalışmaları sonucunda üç ana fay yönelimi belirlenmiştir: KD-GB, KB-

GD ve D-B. Özellikle Akyar Fayı ve ilişkili eğim atımlı normal faylar, kentin topoğrafyasını doğrudan belirlemiştir. Akropolis, fay kontrollü doğal kaya dikliklerinin güneydoğu sektöründe doğal bir savunma hattı oluşturduğu stratejik bir noktaya yerleştirilmiştir; bu durum insan yapısı sur duvarlarına olan ihtiyacı bu bölgede azaltmıştır. Akropolis ve gözetleme kulelerinden gerçekleştirilen Görünürlük (Viewshed) analizleri, yerleşimin tüm vadi ve hinterland üzerinde tam bir görsel hakimiyete sahip olduğunu ve stratejik bir savunma ağının kurulduğunu kanıtlamıştır.

Kentin kuzeyindeki “İnler” mevkii gelişmiş bir karstlaşma sergilemektedir. Geçirimli kireçtaşı ile geçirimsiz kil ara seviyelerinin temas yüzeylerinde, süzülen suların birikmesiyle doğal mağaralar oluşmuştur (Şekil 11). Bu mağaraların antik dönemden itibaren barınma veya depolama amacıyla insan eliyle genişletildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, CBS analizleriyle belirlenen yaklaşık 1 km çapındaki polye benzeri çöküntü alanı (Şekil 13A-13B), antik kentin tarımsal ve hidrolojik yönetimini etkileyen olgun bir karstik peyzaja işaret etmektedir.

Arazi gözlemleri, kentin tamamen yerel (in-situ) litolojiler kullanılarak inşa edildiğini doğrulamaktadır. Kent toprakları içinde beş adet antik taş ocağı tespit edilmiştir. En yaygın kullanılan malzeme, anıtsal yapılarda ve kaya mezarlarında işlenebilirliği ve estetik görünümü nedeniyle tercih edilen Susuzdağ Formasyonu'na ait krem-bej renkli kireçtaşlarıdır.

Belirlenen taş ocağı alanları ile nekropol sektörleri ve mimari kalıntıların dağılımı arasındaki mekânsal karşılaştırma, taş çıkarım bölgeleri ile mezar mimarisi arasında güçlü bir mekânsal ilişki olduğunu göstermektedir. Özellikle kaya mezarları ve nekropol alanlarının, işlenebilir Susuzdağ kireçtaşlarının doğal olarak yüzeylendiği kireçtaşı mostraları ve taş ocağı alanları çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu mekânsal örüntü, jeolojik uygunluğun ve taş

teminindeki kolaylığın, yerleşim içerisindeki mezar ve mimari alanların organizasyonunun belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını düşündürmektedir.

Akropolis yakınlarında bulunan 3-4 cm boyutundaki demir zengini cüruf parçaları, arkeometalurjik faaliyetlerin ön belirtisidir (Şekil 22). Cüruflarda “bakır pası” gözlenmemesi, bu malzemenin demir veya kurşun (galen) cevheri eritme işlemi sonucu oluştuğunu; yoğun yığınların olmayışı ise büyük bir üretim merkezinden ziyade deneme amaçlı küçük ölçekli ocakların varlığını düşündürmektedir. Ayrıca, iki farklı renkteki (sarımsı-yeşil ve kırmızımsı-kahverengi) seramik buluntuları, en az iki ayrı kil kaynağının kullanıldığını göstermektedir.

Arneai 2025 yılı yüzey araştırması, jeolojik miras ile antik kent planlaması arasındaki derin bağı ortaya koymaktadır. Kentte tespit edilmiş olan sarnıçların suyun yerçekimi ile dağıtımını kolaylaştıracak yüksek kotlara, drenaj kanallarının ise eş yükseklik eğrilerine paralel yerleştirildiği görülmektedir. Savunma için fay dikliklerinin stratejik kullanımı, yapı üretimi için fosilli kireçtaşlarının işletilmesi ve karstik yer şekillerinden faydalanılması, bu ön sonuçlar, gelecekte yapılacak sistematik kazılar ve detaylı arkeometrik analizler için sağlam bir bilimsel temel oluşturmaktadır.

ORCID

Ferda Öner  <https://orcid.org/0000-0002-9278-6164>

Yaşar Arlı  <https://orcid.org/0000-0001-7799-6764>

REFERENCES / KAYNAKLAR

- Arlı, Y. (2025). Arneai Antik Kenti Yüzey Araştırmaları Öncesinde Ön Rapor. KUBABA Arkeoloji-Sanat-Tarih Dergisi, 34, 21-26.
- Bean, G. E. (1962). Report on a journey in Lycia 1960. Vienna.

- Bean, G. E. (1978). *Lycian Turkey: An archaeological guide*. London.
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri. *MTA Dergisi*, 66, 20–37.
- Okay, A. I. & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In *The Mediterranean Basin: Tertiary extension within the Alpine orogen* (Geological Society, London, Special Publications, Vol. 156, pp. 475–515). Geological Society of London.
<https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.156.01.22>
- Öner, F. (2020). Phaselis Büyük Hamam, Hellenistik Tapınak ve Diğer Hamamlarda Kullanılan Yapı Taşları ve Phaselis Yapı Taşı Ocağı. *Phaselis*, VI, 13-28. <http://dx.doi.org/10.18367/Pha.20002>
- Rathur, A. Q. (1967). *Kale (Antalya) sahasının 1:25,000 ölçekli Fethiye P23-B2, P23-B3, P23-C2 paftalarının genel jeoloji raporu* (MTA Derleme No. 4088). Ankara: MTA. (Unpublished report)
- Rott, H. (1908). *Kleinasiatische Denkmäler aus Pisidien, Pamphylien, Kapodokien und Lykien*. Leipzig.
- Spratt, T. A. B. & Forbes, E. (1847). *Travels in Lycia, Milyas, and the Cibyratis* (Vol. I). London.
- Spratt, T. A. B. & Forbes, E. (2008). *Likya'da yolculuklar* (Vol. I). Antalya.
- Şenel, M. (1997). *Geological maps of Turkey (1:250,000), No. 2: Fethiye sheet*. Ankara: MTA Geological Department Publications.
- Şenel, M. & Bölükbaşı, A. S. (2010). *Geological maps of Turkey (1:100,000), No. 5: Fethiye P23 sheet*. Ankara: MTA Geological Department Publications.
- Şenel, M., Akdeniz, N., Öztürk, M. E., Özdemir, T., Metin, Y., Öcal, H. A., Orçen, S., Kadıncı, G. ve Serdaroğlu, M. (1994). *Fethiye (Muğla)–Kalkan (Antalya) ve kuzeyinin jeolojisi* (MTA Derleme No. 9761). Ankara: MTA. (Unpublished report)
- Texier, C. F. M. (1862). *Asie Mineure: Description géographique, historique et archéologique des provinces et des villes de la Chersonnèse d'Asie*. Paris.
- URL-1, (15.02.2026). Coğrafya Harita. <http://cografyaharita.com>
- Zhao, Z., Shao, L., Fengyuan, L., Zhang, X., & Li, S. (2020). Tectonic evolution of the Tethyan region created the Eurasian extratropical biodiversity hotspots: Tracing Pireneitega spiders' diversification history. *Ecography*, 43(9), 1400–1411. <https://doi.org/10.1111/ecog.05044>

VEFEYÂT / OBITUARY

Dr. Korhan Esat'ın Ardından (1979- 2026)
In Memory of Dr. Korhan Esat (1979-2026)

Anıl Ardahanlıoğlu^{1,2*} , Efe Demirci^{1,3} 

¹ Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tektonik Araştırma Grubu, Gölbaşı, Ankara, Türkiye

² Geolution Mühendislik, Çankaya, Ankara, Türkiye

³ ESAN Eczacıbaşı, Maltepe, İstanbul, Türkiye

• Geliş/Received: 08.05.2026

• Kabul/Accepted: 09.06.2026

• Baskı/Printed: 31.08.2026

Vefeyât /Obituary

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey



29 Nisan 2026 tarihi, yerbilimleri camiası ve bilhassa Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü için acı bir gün oldu. Hayatını Türkiye'nin aktif tektoniğini ve depremselliğini anlamaya adanmış, çalışmalarındaki titizliği ve mesleğine olan derin sevgisiyle tanınan kıymetli hocamız Dr. Korhan Esat ebediyete irtihal etti. Bu beklenmedik veda, başta ailesi olmak üzere, omuz omuza çalıştığı meslektaşlarını ve yetiştirdiği öğrencilerini derin bir yasa boğdu.

Dr. Esat, lisans eğitimini 1995-2001 yılları arasında Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Ardından aynı üniversitenin Fen

April 29, 2026, marked a day of profound and grievous loss for the geosciences community, and most notably for the Department of Geological Engineering at Ankara University. We mourn the passing of our highly esteemed professor, Dr. Korhan Esat, who dedicated his life to comprehending Türkiye's active tectonics and seismicity, and who was widely renowned for the meticulousness of his research and his profound love for his profession. This unexpected farewell has brought immense grief to his family, the colleagues he worked alongside, and the generations of students he mentored.

Dr. Esat completed his undergraduate education between 1995 and 2001 in the Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering, Ankara University. Subsequently, he earned his master's degree from the Graduate School of Natural and Applied Sciences at the same university in 2004 with his thesis titled "Stratigraphy and Tectonics of the area between Çankırı and Eldivan". In 2005, he embarked on his professional career as a Research Assistant in the same department.

Bilimleri Enstitüsü'nde "Çankırı-Eldivan arasının stratigrafisi ve tektoniği" başlıklı teziyle yüksek lisans derecesini 2004 yılında aldı. 2005 yılında ise aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak çalışma hayatını başladı.

Doktora çalışmalarını yine Ankara Üniversitesi'nde, Prof. Dr. Gürol Seyitoğlu'nun danışmanlığında yürüttü. 2011 yılında "Ankara çevresinde Orta Anadolu'nun neotektoniği ve depremselliği" başlıklı doktora tezi, Ankara çevresinde etkili olan neotektonik rejimi ve Balâ ile Orta gibi yörelerdeki sismik etkinlikleri aydınlatan temel bir referans kaynağı oldu. Bu kapsamlı çalışmasıyla, bilhassa ana doğrultu atımlı fay zonlarının etkisinde kalan KB Orta Anadolu Daralma Bölgesi'nin ayrı bir neotektonik alan olarak tanımlanmasını sağladı. Bu yeni tanımlanan neotektonik alan içindeki Kısırılmış Tektonik Kamaların (Pinched Crustal Wedges) varlığı ve daralma ile ilişkili normal fayların konumu Makran ve Himalayalarda da karşımıza çıkmaktadır.

2015 yılında ise Amerika'da, Kalifornia Üniversitesi Los Angeles'ta (UCLA) Prof. Dr. An Yin danışmanlığında doktora sonrası araştırmalarını yürüttü.

Genel Jeoloji anabilim dalı kapsamında yapısal jeoloji ve tektonik alanlarındaki uzmanlığıyla Dr. Esat, yalnızca teorik çerçevede kalmamış, aynı zamanda arazi çalışmalarını araştırmalarının merkezinde tutmuştur. Saygın uluslararası endekslerce taranan (SCI, Scopus vb.) prestijli dergilerde yayımlanan makaleleri, yapısal jeoloji ve tektonik konularına odaklı olarak 3B modellemeler, jeomorfoloji, uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri gibi çok geniş bir yelpazede çeşitlilik göstermekteydi. Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kolları, Anadolu Çaprazı (Anatolian Diagonal), Bepazarı Kör Bindirme Zonu, Bursa civarındaki diri fayların saptanması ve Datça Kale Ana Ayrılma Fayı'nın

He pursued his doctoral studies at Ankara University under the supervision of Prof. Dr. Gürol Seyitoğlu. His 2011 PhD dissertation, titled "Neotectonics and Seismicity of Central Anatolia Around Ankara", served as a fundamental reference work that illuminated the active neotectonic regime in the Ankara region and the seismic activities in areas such as Balâ and Orta. Through this comprehensive research, he was particularly instrumental in defining the NW Central Anatolian Contractional Area, which is predominantly influenced by major strike-slip fault zones, as a distinct neotectonic province.

In 2015, he advanced his postdoctoral research in the United States at the University of California, Los Angeles (UCLA) under the guidance of Prof. Dr. An Yin.

With his profound expertise in structural geology and tectonics within the Division of General Geology, Dr. Esat never confined himself solely to theoretical frameworks; rather, he consistently positioned fieldwork at the very heart of his research endeavors. His articles, published in prestigious international journals indexed in databases such as SCI and Scopus, span a remarkably diverse spectrum, ranging from 3D modelling and geomorphology to remote sensing and geographic information systems, while remaining fundamentally anchored in structural geology and tectonics. Furthermore, he served as a dedicated researcher in numerous pivotal projects focusing on the southern branches of the North Anatolian Fault Zone, the Anatolian Diagonal, the Bepazarı Blind Thrust Zone, the identification of active faults around Bursa, and the structural evolution of the Datça-Kale Main Detachment Fault.

The invaluable contributions and steadfast dedication of Dr. Esat during the founding phase and subsequent evolution of the Tectonics Research Group (TAG), which operates within the Department of Geological Engineering at Ankara



Uludağ zirvesine yakın arazi çalışmasında mola sırasında Dr. Korhan Esat.
Dr. Korhan Esat taking a break during fieldwork near the summit of Mount Uludağ.

yapısal gelişimine odaklanan birçok önemli projede de araştırmacı olarak görev aldı.

Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesinde çalışmalarını sürdüren Tektonik Araştırma Grubu'nun (TAG) kuruluş aşaması ve sonrasında Dr. Esat'ın katkıları ve emekleri yadsınamaz. TAG bünyesinde gerçekleştirilen yüksek lisans ve doktora çalışmalarının birçoğunda çeşitli katkılarda bulunarak genç araştırmacılara her zaman yardımcı oldu.

Bir akademisyen olmanın ötesinde, Dr. Esat her zaman ulaşılabilir bir hoca, arkadaş ve yol göstericiydi. Uzun yıllar boyunca doğrudan ve dolaylı olarak katkı sağladığı derslerle geleceğin jeoloji mühendislerinin harcını bizzat karmıştır.

Dr. Esat'ın verdiği dersler; Jeolojik Harita Alımı, Yapısal Jeoloji, Jeomorfoloji, Coğrafi Bilgi Sistemi, Jeoloji Mühendisliğinde Bilgisayar Uygulamaları ve Topoğrafya ve Harita Bilgisi idi.

Dr. Esat üniversite çalışmalarının yanı sıra, meslek odası olan TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası'nın bünyesindeki çalışma gruplarında ve

University, are truly undeniable. He consistently supported young researchers, offering his guidance and making significant contributions to many of the master's and doctoral studies conducted under the umbrella of TAG.

Beyond his identity as an academic, Dr. Esat was perpetually an accessible lecturer, a devoted friend, and a guiding mentor. Through the courses he directly and indirectly shaped over many years, he personally laid the intellectual foundations for the geological engineers of the future.

These courses included: Geological Mapping, Structural Geology, Geomorphology, Geographic Information Systems, Computer Applications in Geological Engineering, Topography and Surveying.

In addition to his academic commitments, Dr. Esat assumed active roles within the working groups of his professional chamber, the UCTEA Chamber of Geological Engineers, as well as in the Geological Congresses of Türkiye. In the aftermath of the February 6 earthquakes, he

Türkiye Jeoloji Kurultayları'nda da aktif görevler almıştır. 6 Şubat Depremi'nden sonra uzaktan algılama bilgisi ile Jeoloji Mühendisleri Odası ekibini sahada yönlendirmiş ve optik verilere dayalı ilk yüzey kırığı haritasını ResearchGate üzerinde kullanıma açtı.

Dr. Esat, meslek odası organizasyonlarında çeşitli yıllarda şu görevleri üstlendi; Türkiye Jeoloji Kurultayı: Düzenleme Kurulu Sekreter Yardımcısı (2012), Türkiye Jeoloji Kurultayı: Bilim Kurulu Üyesi ve Oturum Yürütücüsü (2019), Türkiye Jeoloji Kurultayı: Düzenleme Kurulu Sekreteri (2022), Türkiye Jeoloji Kurultayı: Neotektonik, Paleosismoloji ve Sismotektonik Oturumu Yürütücüsü ve Bilim Kurulu Üyesi (2024), Türkiye Jeoloji Kurultayı: "Geleceğin Yerbilimcileri" Oturumu Yürütücüsü ve Bilim Kurulu Üyesi (2026), Bölgesel Jeoloji ve Tektonik Oturum Yürütücüsü (2026).

Hocamızın seçilmiş bilimsel çalışmalarından bazıları ise şunlardır:

- a) The 2005-2007 Bala (Ankara, central Turkey) earthquakes: a case study for strike-slip fault terminations. 2014. *Geologica Acta*, 12(1), 71-85. <https://doi.org/10.1344/105.000002075>
- b) A missing-link in the tectonic configuration of the Almacık Block along the North Anatolian Fault Zone (NW Turkey): active faulting in the Bolu plain based on seismic reflection studies. 2015. *Geophysical Journal International*, 201(3), 1814-1833. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv065>
- c) Abdüsselam Kısıtılmış Tektonik Kaması: KB Orta Anadolu'da daralma rejimiyle ilişkili bir Geç Senozoyik yapısı. 2017. *Yerbilimleri*, 38(1), 33-56.
- d) Analogue Modeling of the Cenozoic Tectonic Development of the V-Shaped North Anatolian and East Anatolian Fault Zones in the Eastern Mediterranean Region. 2018. 9th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Antalya.

utilized his remote sensing expertise to guide the Chamber of Geological Engineers' team in the field and made the first surface rupture map based on optical data accessible to the scientific community via ResearchGate.

Dr. Esat held various roles in professional chamber activities over the years: Deputy Secretary of the Organizing Committee of the Geological Congress of Türkiye (2012); Scientific Committee Member and Session Chair at the Geological Congress of Türkiye (2019); Secretary of the Organizing Committee of the Geological Congress of Türkiye (2022); Session Chair for the Neotectonics, Paleoseismology, and Seismotectonics Session and Scientific Committee Member at the Geological Congress of Türkiye (2024); Session Chair for the "Geoscientists of the Future" Session and Scientific Committee Member at the Geological Congress of Türkiye (2026); and Regional Geology and Tectonics Session Chair (2026).

Selected scientific works of our highly esteemed professor are as follows:

- a) The 2005-2007 Bala (Ankara, central Turkey) earthquakes: a case study for strike-slip fault terminations. 2014. *Geologica Acta*, 12(1), 71-85. <https://doi.org/10.1344/105.000002075>
- b) A missing-link in the tectonic configuration of the Almacık Block along the North Anatolian Fault Zone (NW Turkey): active faulting in the Bolu plain based on seismic reflection studies. 2015. *Geophysical Journal International*, 201(3), 1814-1833. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv065>
- c) Abdüsselam Kısıtılmış Tektonik Kaması: KB Orta Anadolu'da daralma rejimiyle ilişkili bir Geç Senozoyik yapısı. 2017. *Yerbilimleri*, 38(1), 33-56.
- d) Analogue Modeling of the Cenozoic Tectonic Development of the V-Shaped North Anatolian and East Anatolian Fault Zones

- e) Tectonic significance of the thrust parallel-normal faulting in the northern Makran. 72nd Geological Congress of Turkey, 967-972.
- f) The Northwest Central Anatolian Contractional Area: A neotectonic deformation zone bounded by major strike-slip fault zones in the Anatolian Plate. 2021. Tectonophysics, 805 Article 228776. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228776>
- g) Neotectonics of Turkey (Türkiye) and surrounding regions: a new perspective with block modelling. 2022. Geologica Acta, 20(4), 1-21. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2022.20.4>

İleri Okumalar için Dr. Korhan Esat'a ait ResearchGate Profil adresi:
<https://www.researchgate.net/profile/Korhan-Esat>

Dr. Korhan Esat, çok sevdiği jeoloji disiplinini ardında bırakarak aramızdan ayrıldı. O hem öğrencilere hem de diğer araştırmacılara karşı yardımsever, paylaşımcı ve yol gösterici özellikleriyle birlikte, mütevazı ve olgun kişiliğiyle tüm Türkiye jeoloji camiasınca sevilen biriydi.

Bilim dünyasına kazandırdığı değerli yayınlar, yürüttüğü projeler ve jeoloji camiasına kazandırdığı öğrencileri, onun aziz hatırasını daima yaşatacaktır. Ruhu şad olsun.

ORCID

Aml Ardahanlıoğlu  <https://orcid.org/0000-0001-9309-3872>

Efe Demirci  <https://orcid.org/0000-0002-6290-1731>

in the Eastern Mediterranean Region. 2018. 9th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Antalya.

- e) Tectonic significance of the thrust parallel-normal faulting in the northern Makran. 72nd Geological Congress of Turkey, 967-972.
- f) The Northwest Central Anatolian Contractional Area: A neotectonic deformation zone bounded by major strike-slip fault zones in the Anatolian Plate. 2021. Tectonophysics, 805 Article 228776. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228776>
- g) Neotectonics of Turkey (Türkiye) and surrounding regions: a new perspective with block modelling. 2022. Geologica Acta, 20(4), 1-21. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2022.20.4>

For further reading, Dr. Korhan Esat's ResearchGate profile: <https://www.researchgate.net/profile/Korhan-Esat>

Dr. Korhan Esat has passed away, leaving behind a discipline he cherished with profound passion: geology. Through his unfailing generosity, his guidance of students and fellow researchers, and his modest yet mature character, he earned the deep affection and respect of the entire Turkish geological community.

The invaluable publications he endowed to the scientific world, the impactful projects he steered, and the outstanding students he brought into the geology community will ensure that his revered memory lives on eternally. May his soul rest in peace.



Erratum: Estimation of Basement Relief in the Isparta Basin by Applying Spectral Filtering and Local Optimisation-Based Inversion Techniques to Gravity Data

Düzeltilme: Gravite Verilerine Spektral Filtreleme ve Lokal Optimizasyon-Tabanlı Ters Çözüm Teknikleri Uygulayarak Isparta Baseninde Temel Kaya Topografyasının Tahmini

Rezzan Pekcan Ekinci^{1,2*} , Çağlayan Balkaya³ 

¹ Muş Alparslan University, Program of Emergency and Disaster Management, Muş, Türkiye

² Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysical Engineering, Isparta, Türkiye

³ Süleyman Demirel University, Department of Geophysical Engineering, Isparta, Türkiye

• Geliş/Received: 23.06.2026

• Kabul/Accepted: 30.06.2026

• Baskı/Printed: 31.08.2026

Düzeltilme/Erratum

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Erratum: Estimation of Basement Relief in the Isparta Basin by Applying Spectral Filtering and Local Optimisation-Based Inversion Techniques to Gravity Data. Geological Bulletin of Turkey, 69(1), 103-120.
<https://doi.org/10.25288/tjb.1767998>

In the article by Pekcan Ekinci and Balkaya (2026), the first author's affiliation was incorrectly presented. The corrected affiliations are provided in this erratum.

ORCID

Rezzan Pekcan Ekinci  <https://orcid.org/0000-0002-5367-8857>

Çağlayan Balkaya  <https://orcid.org/0000-0002-0191-8564>

Düzeltilme: Gravite Verilerine Spektral Filtreleme ve Lokal Optimizasyon-Tabanlı Ters Çözüm Teknikleri Uygulayarak Isparta Baseninde Temel Kaya Topografyasının Tahmini. Türkiye Jeoloji Bülteni, 69(1), 103-120.
<https://doi.org/10.25288/tjb.1767998>

Pekcan Ekinci ve Balkaya (2026) makalesinde, ilk yazarın adresi hatalı olarak sunulmuştur. Doğru adres bilgileri bu düzeltme yazısında verilmiştir.



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 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 örneklerle uygun olarak verilmelidir.

Ahmet Ahmetoğlu

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği
Bölümü, Tandoğan 06100 Ankara
e-posta: a_ahmetoglu@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 konusun 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. Yayında 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. Yayında 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

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 kütlesi 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 dikey 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) adresi üzerinden elektronik olarak sisteme yüklenmelidir.

TÜRKİYE JEOLJİ BÜLTENİ EDITÖRÜ

Prof. Dr. Erdinç YİĞİTBAŞ

Tel: 286 2180018-20088

e-posta: 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 olmadığının 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 TUBITAK - 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.*, yayınlanacak 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 kullanımı 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 gerekliyse 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 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 işlemini 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 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. Hüsnü Hüsnüoğlu

MTA Genel Müdürlüğü, Jeolojik Etüdler 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

Paranthetical 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.), *72nd 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

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 kütlesi 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_3^{2-} instead of Ca^{++} and CO_3^{--} . 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)

EDITOR IN-CHIEF

Prof. Dr. Erdinç YİĞİTBAŞ

Tel: 286 2180018-20088

e-mail: 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. 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

Ağustos 2026 Cilt 69 Sayı 3
August 2026 Volume 69 Issue 3

- Çağlar Özkaymak, Muammer Can Ünsal, Hasan Sözbilir, Doğukan Mert Özcan, İbrahim Tiryakioğlu, Halil İbrahim Solak**
Genişlemeli Tektonik Rejimde Yeniden Aktif Olmuş Atkuyruğu Faylarına Yönelik Kinematik Kanıtlar: Banaz Fayı ve Tektonik Anlamı, Batı Anadolu, Türkiye
Kinematic Evidence for Reactivated Horsetail Faults in an Extensional Tectonic Regime: The Banaz Fault and Its Tectonic Implications, Western Anatolia, Türkiye 279
- Seray Çınar Yıldız, Süha Özden, Savaş Topal**
Morphotectonic Segmentation and Uplift History of the Yalakdere Fault (NW Türkiye): Results from χ Analysis and River Profile Inversion
Yalakdere Fayının (KB Türkiye) Morfotektonik Segmentasyonu ve Yükselme Geçmişi: χ Analizi ve Akarsu Profili Ters Çözümleme Sonuçları 303
- Doğukan Mert Özcan, Çağlar Özkaymak, Volkan Karabacak**
Ökmen Sümer, Furkan Şahiner, Seray Çınar Yıldız
İzmir-Balıkesir Transfer Zonu İçerisinde Bir Yapı: Gelenbe Fay Zonu'nun Geometrik ve Kinematik Özellikleri
Geometric and Kinematic Characteristics of the Gelenbe Fault Zone within the İzmir-Balıkesir Transfer Zone 323
- Deniz Şanlıyüksel Yücel**
Çan İlçesinin (Çanakkale, KB Türkiye) Jeotermal Kaynakları ve Madencilik Potansiyelinin Sürdürülebilir Kaynak Yönetimi Perspektifinden Değerlendirilmesi
Geothermal Resources and Mining Potential of the Çan District (Çanakkale, NW Türkiye): A Sustainable Resource Management Perspective 351
- Ferda Öner, Yaşar Arlı**
Preliminary Results of Geological and GIS Studies from Surface Surveys at the Ancient City of Arneai (SW Türkiye)
Arneai Antik Kenti Yüzey Araştırmaları: Jeoloji ve CBS Çalışmalarının Ön Sonuçları (GB-Türkiye) 407
- Anıl Ardahanlıoğlu, Efe Demirci**
VEFEYÂT / OBITUARY
Dr. Korhan Esat'ın Ardından (1979- 2026) 429
- Rezzan Pekcan Ekinci, Çağlayan Balkaya**
Erratum: Estimation of Basement Relief in the Isparta Basin by Applying Spectral Filtering and Local Optimisation-Based Inversion Techniques to Gravity Data
Düzeltilme: Gravite Verilerine Spektral Filtreleme ve Lokal Optimizasyon-Tabanlı Ters Çözüm Teknikleri Uygulayarak Isparta Baseninde Temel Kaya Topografyasının Tahmini 435

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 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
URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tjb>