

# TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ

*Geological Bulletin of Turkey*

Temmuz 2024 Cilt 67 Özel Sayı  
July 2024 Volume 67 Special Issue

ISSN 1016-9164



*Özel Sayı / Special Issue*

*Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme / Quantitative Modeling in Earth Sciences*

*Misafir Editör / Guest Editor: Oğuz Hakan GÖĞÜŞ*

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

TMMOB  
JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI  
Chamber of Geological Engineers of Turkey

**YÖNETİM KURULU / EXECUTIVE BOARD**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Hüseyin ALAN          | Başkan / President  |
| M. Emre KIBRIS        | İkinci Başkan / Vice President                                |
| Buket YARARBAŞ ECEMİŞ | Yazman / Secretary  |
| Seçkin GÜLBUDAK       | Sayman / Treasurer  |
| Hüseyin AKKUŞ         | Mesleki Uygulamalar Üyesi / Member of Professional Activities |
| Özgür DEĞİRMENCİ      | Sosyal İlişkiler Üyesi / Member of Social Affairs             |
| İşık Şener AYDEMİR    | 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

**İngilizce Editörleri / English Editors**

Catherine YİĞİT

Graham Howard LEE

**Editör Kurulu / Editorial Board**

|   |   |
|---|---|
| AKSOY Ercan (Elazığ, Türkiye)             | PARLAK Osman (Adana, Türkiye)               |
| ALDANMAZ Ercan (Kocaeli, Türkiye)         | PAVLIDES Spyros (Selanik, Yunanistan)       |
| ALTUNEL Erhan (Eskişehir, Türkiye)        | PIPER John D.A. (Liverpool, İngiltere)      |
| BABA Alper (İzmir, Türkiye)               | PIPIK Radovan Kyska (B. Bystrica, Slovakya) |
| BATI Zühtü (Ankara, Türkiye)              | POLAT Ali (Windsor, Ontario, Kanada)        |
| BOZKURT Erdin (Ankara, Türkiye)           | ROBERTSON Alastair (Edinburgh, İngiltere)   |
| CAPUTO Ricardo (Ferrara, İtalya)          | ROJAY Bora (Ankara, Türkiye)                |
| EKİNCİ, Yunus Levent (Bitlis, Türkiye)    | SAN Bekir Taner (Antalya, Türkiye)          |
| EKMEKÇİ Mehmet (Ankara, Türkiye)          | SARI Erol (İstanbul, Türkiye)               |
| EYÜBOĞLU Yener (Trabzon, Türkiye)         | SEYİTOĞLU Gürol (Ankara, Türkiye)           |
| GENÇ Yurdal (Ankara, Türkiye)             | SÖZBİLİR Hasan (İzmir, Türkiye)             |
| GÜLER Cüneyt (Mersin, Türkiye)            | SPAHIÇ, Darko, (Belgrad, Sırbistan)         |
| GÜRSOY Halil (Sivas, Türkiye)             | ŞENGÜLER İlker (Ankara, Türkiye)            |
| HATİPOĞLU Murat (İzmir, Türkiye)          | TATAR, Orhan (Sivas, Türkiye)               |
| HELVACI Cahit (İzmir, Türkiye)            | TEKİN Uğur Kağan (Ankara, Türkiye)          |
| JOLIVET Laurent (Orleans, Fransa)         | TEMEL Abidin (Ankara, Türkiye)              |
| KARAYİĞİT Ali İhsan (Ankara, Türkiye)     | TOPUZ Gültekin (İstanbul, Türkiye)          |
| KAYSERİ-ÖZER Mine Sezgül (İzmir, Türkiye) | TÜYSÜZ Okan (İstanbul, Türkiye)             |
| KAZANCI Nizamettin (Ankara, Türkiye)      | UZEL, Bora (İzmir, Türkiye)                 |
| KUSKY Timothy (Wuhan, Çin)                | ÜNLÜ Taner (Ankara, Türkiye)                |
| KUŞÇU İlkay (Muğla, Türkiye)              | ÜNLÜGENÇ Ulvi Can (Adana, Türkiye)          |
| MAMEDOV, Musa (Bakü, Azerbaycan)          | VASELLI Orlando (Floransa, İtalya)          |
| MESCİ B. Levent (Sivas, Türkiye)          | YALÇIN Hüseyin (Sivas, Türkiye)             |
| NAZİK Atike (Adana, Türkiye)              | YALÇIN Gürhan (Antalya, Türkiye)            |
| ÖBERHANSLI Roland (Potsdam, Almanya)      | YALTIRAK Cenk (İstanbul)                    |
| ÖZDEMİR Yavuz (Van, Türkiye)              | YILMAZ İsmail Ömer (Ankara, Türkiye)        |
| ÖZDEN Süha (Çanakkale, Türkiye)           | YUSUFOĞLU Halil (Ankara, Türkiye)           |
| ÖZKUL Mehmet (Denizli, Türkiye)           | ZABÇI, Cengiz, (İstanbul, Türkiye)          |
| ÖZMEN Bülent (Ankara, Türkiye)            | ZAGORCHEV Ivan (Sofya, Bulgaristan)         |
| ÖZSAYIN, Erman (Ankara, Türkiye)          |   |

**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>

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 Tarihi : Temmuz 2024

Baskı Adedi : 500

**Corresponding Address**

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

# TÜRKİYE JEOLojİ BÜLTENİ

*Geological Bulletin of Turkey*

Temmuz 2024 Cilt 67 Özel Sayı  
July 2024 Volume 67 Special Issue

## İÇİNDEKİLER CONTENTS

**Ebru Şengül Uluocak**

**A Discussion on Geodynamic Modeling Methodology:**

**Inferences from Numerical Models in the Anatolian Plate**

*Jeodinamik Modelleme Metodolojisi Üzerine Bir Tartışma:*

*Anadolu Levhasındaki Sayısal Modellerden Çıkarımlar* ..... 1

**Ebru Şengül Uluocak, Emin Uğur Ulugergerli**

**Yer Bilimlerinde Modellemeye Genel Bir Bakış; Çevre Jeofiziği Uygulamalarından Çıkarımlar**

*An Overview of Modeling in Earth Sciences; Inferences from Environmental Geophysics Applications* ..... 13

**Semih Eski, Hasan Sözbilir**

**Gediz (Alaşehir) Grabeni'nde Gelişen A-Sismik Yüzey Deformasyonların Kökeni**

*Origin of a-Seismic Surface Deformations in the Gediz (Alaşehir) Graben* ..... 31

**Özgür Karaoğlu**

**Hasan Dağı Volkanı ve Çiftlik-Bozköy (Orta Anadolu) Gömülü Kalderasını Besleyen Aktif Magma**

**Odalarına İlişkin Isı Transferi Analizleri**

*Heat Transfer Analysis of Active Magma Chambers Feeding Hasan Dağı Volcano and Çiftlik-Bozköy*

*(Central Anatolia) Hidden Caldera* ..... 63

**Ömer F. Bodur**

**A Simple Model for Plate Motion and Topography**

*Tektonik Levha Hareketiyle Oluşan Topoğrafyanın Fiziksel Modeli* ..... 85

### **Türkiye Jeoloji Bülteni makale dizin ve özlery:**

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*

## ÖNSÖZ

### Yer Bilimlerinde sayısal modelleme

Günümüzde niceliksel analiz ve tekniklerin yer bilimleri ve ilgili alanlardaki disiplinler arası araştırma konularında yaygın olarak kullanıldığı iyi bilinmektedir. Üstelik, zamansal ve mekansal olarak değişen, tüm ölçek ve boyutlardaki (2B ve 3B) tahmine dayalı modeller aracılığıyla, küçük parçaların “büyük” bir resme nasıl sığabileceği konusunda daha iyi bir anlayış ortaya konmaktadır. Modelleme, dünya çapında trend olan araştırma konuları gibi Türkiye’deki yer bilimlerinde de yeni gelişen bir alan olarak bilinmektedir. Türkiye Jeoloji Bülteni kapsamında yayınlanan bu özel sayı, yer bilimlerinde modellemenin temel kavramlarını ele alan 5 makaleden oluşmaktadır.

**Şengül Uluocak**’ın çalışması, günümüzde jeodinamik modellemedeki algoritmaların veri toplama ve analizlerin önemli rolünü nasıl gözden kaçırabileceğine dair mini bir inceleme ve değerli bir tartışma sunuyor. Yazar, tektoniğe uygulanan modellemedeki belirsizlikleri azaltmaya yardımcı olabilecek çağdaş probleme dayalı çözümler önermektedir.

**Şengül Uluocak ve Emin Uluggerli**, sayısal modellemeyi jeofizikten elde edilen gözlemlerle, yani özdirenç yöntemiyle birleştiriyor. Yazarlara göre, bu yeni veri-modeli ilişkisi kavramı, yeni bir iş akışını tanımlayabilir ve atık sahasının boyutunun ortaya çıkarılması gibi mevcut kentsel çevre sorunları için kullanılabilir.

**Eski ve Sözbilir**, SAR interferometri verilerini Batı Anadolu’nun en aktif biçimde deforme olan (genişleyen) bölgelerinden birinde tektonik problemi çözmek için yorumlamaktadır. Özellikle yazarlar, sismik deprem döngüsü sırasında a-sismik hareketin, graben kenarındaki geçici yüzey yer değiştirmelerinin ana nedenlerinden biri olduğunu vurgulamaktadır.

**Karaoğlu**’nun sayısal modeli, Orta Anadolu’nun Kapadokya volkanik bölgesindeki magma odasının altındaki sıcaklık değişimine ilişkin bir tahmin sağlıyor. Bu hesaplamalar, manyetotellürik çalışmalardan elde edilen varsayımlarla desteklenerek, yer kabuğunun en üst birkaç km’indeki potansiyel jeotermal hedefleri konusunda yol göstermektedir.

Son olarak **Bodur**’un analitik hesaplamaları bize yeryüzündeki topografik geçişlerin manto akışına bağlı gerilimler tarafından nasıl kontrol edilebileceğini gösteriyor. Bu, izostasiye ek olarak vurguladığı dinamik topografya kavramına yeni bir boyut katıyor. Dahası, plakalara uygulanan bu tür bazal gerilimler, yalnızca topografik değişiklikleri yönlendirmekle kalmıyor, aynı zamanda kıtaların eğimini de kontrol ediyor.

Bu alanda gelecekteki yönelimleri göz önünde bulundurarak, test edilebilir niceliksel modellemenin jeoloji, jeofizik ve mühendisliğin yerini alması anlamına gelmediğini, bunun yerine farklı hipotezler arasında ayırım yapmak için anahtar rol üstlendiğini belirtmek gerekir. Söz konusu yer bilimleri çalışmalarında kullanılan sayısal modellemenin ana disiplinleri tamamlayan derin ve pratik bir yöntem olduğunu yinelemek isterim.

Misafir Editör

Oğuz Hakan GÖĞÜŞ

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6199-303X>

## **PREFACE**

### ***Quantitative modeling in Earth Sciences***

Nowadays, it is well established that quantitative analyses and techniques account for cross-disciplinary research topics in earth sciences and related fields. Moreover, through predictive earth models in all scales and dimensions (2D and 3D), varying temporally and spatially, we develop a better understanding about how small pieces can fit into a “big” picture. Akin to trending research topics around the globe, modeling is an emerging field in Türkiye’s earth sciences. This special issue published under the *Geological Bulletin of Türkiye*, consists of 5 papers in which each publication addresses the fundamental concepts of modeling in the broad field of earth sciences.

The work by **Şengül Uluocak** provides a mini review and valuable discussion on how algorithms in geodynamic modeling may overlook the important role of data acquisition and analyses. Author suggests that contemporary problem based solutions that may help to diminish the uncertainties in modeling applied to tectonics.

**Şengül Uluocak with Emin Ulugergerli** combines numerical modeling with observations derived from geophysics, namely the resistivity method. According to authors, this data-model feedback can describe a new workflow between the two and may be used for current urban environmental problems, such as revealing the extent of the waste disposal site.

**Eski and Sözbilir** interprets the SAR interferometry data to one of the most actively deforming (extending) regions in western Anatolia. Specifically, authors emphasize that a-seismic (probably creep) motion during interseismic earthquake cycle is one of the main reasons for transient surface displacements in the graben margin.

Numerical model by **Karaoğlu** provides an estimate for the temperature variation beneath the magma chamber in the central Anatolia’s Cappadocia volcanic province. These calculations can delineate the potential geothermal targets in the top few kms of the earth’s crust, supported by postulations from magnetotelluric studies.

Finally, the analytical calculations of **Bodur** shows us how topographic transients on earth can be controlled by mantle flow related stresses. This adds a new dimension into the concept of dynamic topography where recent discoveries highlight this in addition to isostasy. Furthermore, such basal stresses exerted to the plates not only drive topographic changes but also control tilting of the continents.

Considering future directions in this field, I would like to reiterate that testable quantitative modeling is NOT meant to be a replacement for geology, geophysics and engineering rather it is a profound and practical method for complementing these major disciplines while providing key control for distinguishing among competing hypotheses.

Guest Editor

Oğuz Hakan GÖĞÜŞ

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6199-303X>



**A Discussion on Geodynamic Modeling Methodology:  
Inferences from Numerical Models in the Anatolian Plate**  
*Jeodinamik Modelleme Metodolojisi Üzerine Bir Tartışma:  
Anadolu Levhasındaki Sayısal Modellerden Çıkarımlar*

**Ebru Şengül Uluocak**

*Department of Geophysical Engineering, Faculty of Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University,  
Çanakkale, Turkey*

• Geliş/Received: 21.06.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 10.08.2023 • Kabul/Accepted: 14.08.2023  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 14.09.2023 • Baskı/Printed: 31.07.2024

*Araştırma Makalesi/Research Article*

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

**Abstract:** Numerical models have found widespread use in geosciences, mainly due to high-resolution datasets and the development of supercomputing facilities with powerful data processing and storage capabilities during the past two decades. Instantaneous and time-dependent geodynamic modeling studies were carried out in many regions of the Alpine-Himalayan orogenic belt, including the Anatolian Plate, to investigate mantle dynamics such as lower lithosphere deformation, upper mantle flow, and their surface implications.

This study focuses on the instantaneous numerical modeling technique by considering multidimensional thermomechanical models in the Central and East Anatolian plateaus. To this end, conventional geodynamic modeling processes are explained with a conceptual flow chart that shows a feed-forward backpropagation modeling architecture which is nonlinearly fed by a large parameter space. While addressing a complex natural phenomenon controlled by variables on a wide range of space-time scales, the limitations as well as advantages of numerical models are analyzed.

In addition to conventional techniques, systematic data improvement is discussed as a new strategy in data/parameter-dependent numerical model design through an iterative process based on the Grounded Theory method for the construction of an explanatory theory from the model. This involves not refinement but (re)construction of the data (i.e., measurement/analysis/scaling) as an effective way to reveal theory/information grounded in data.

It is speculated that this procedure, which includes problem-oriented data reconstruction accompanying the numerical modeling process, may provide an integrated perspective for instantaneous numerical modelling.

**Keywords:** Anatolian Plate, geodynamic modeling, geophysics, Grounded Theory, numerical model.

**Öz:** Sayısal modeller, son yirmi yılda yüksek çözünürlüklü veri setleri ve güçlü veri işleme ve depolama kapasiteleri olan süper bilgisayar olanakları sayesinde yer bilimlerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Alt litosfer deformasyonu, üst manto akışı ve bunların yüzey etkileri gibi manto dinamiklerini araştırmak için Anadolu Levhası da dahil olmak üzere Alp-Himalaya orojenik kuşağının birçok bölgesinde anlık ve zamana bağlı jeodinamik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma, Orta ve Doğu Anadolu platolarında çok boyutlu termomekanik modelleri dikkate alarak, anlık sayısal modelleme tekniğine odaklanmaktadır. Bu amaçla, geleneksel jeodinamik modelleme süreçleri, geniş bir parametre uzayı tarafından doğrusal olmayan bir şekilde beslenen ileri beslemeli geri yayılım modelleme mimarisini gösteren kavramsal bir akış şeması ile açıklanmaktadır. Çok çeşitli uzay-zaman ölçeklerindeki değişkenler tarafından kontrol edilen karmaşık bir doğa olayını ele alırken, sayısal modellerin

*üstünlüklerinin yanı sıra sınırlamaları da burada analiz edilmektedir. Geleneksel tekniklere ek olarak, sistematik veri iyileştirme, modelden açıklayıcı kuramın oluşturulmasında Temellendirilmiş Kuram yönteminin yinelemeli bir süreci aracılığıyla veri/parametre bağımlı sayısal model tasarımında yeni bir strateji olarak tartışılmaktadır. Bu, verilere dayanan teoriyi/bilgiyi ortaya çıkarmanın etkili bir yolu olarak sadece veri iyileştirmeyi değil, verilerin (yeniden) inşasını (yani ölçüm/analiz/ölçeklendirme gibi) içerir. Sayısal modelleme sürecine eşlik eden problem odaklı veri yeniden yapılandırmasını gösteren bu prosedürün, anlık sayısal modellemeye bütünlük bir bakış açısı sağlayabileceği düşünülmektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** Anadolu Levhası, jeodinamik modelleme, jeofizik, Temellendirilmiş Kuram, sayısal model.

## INTRODUCTION

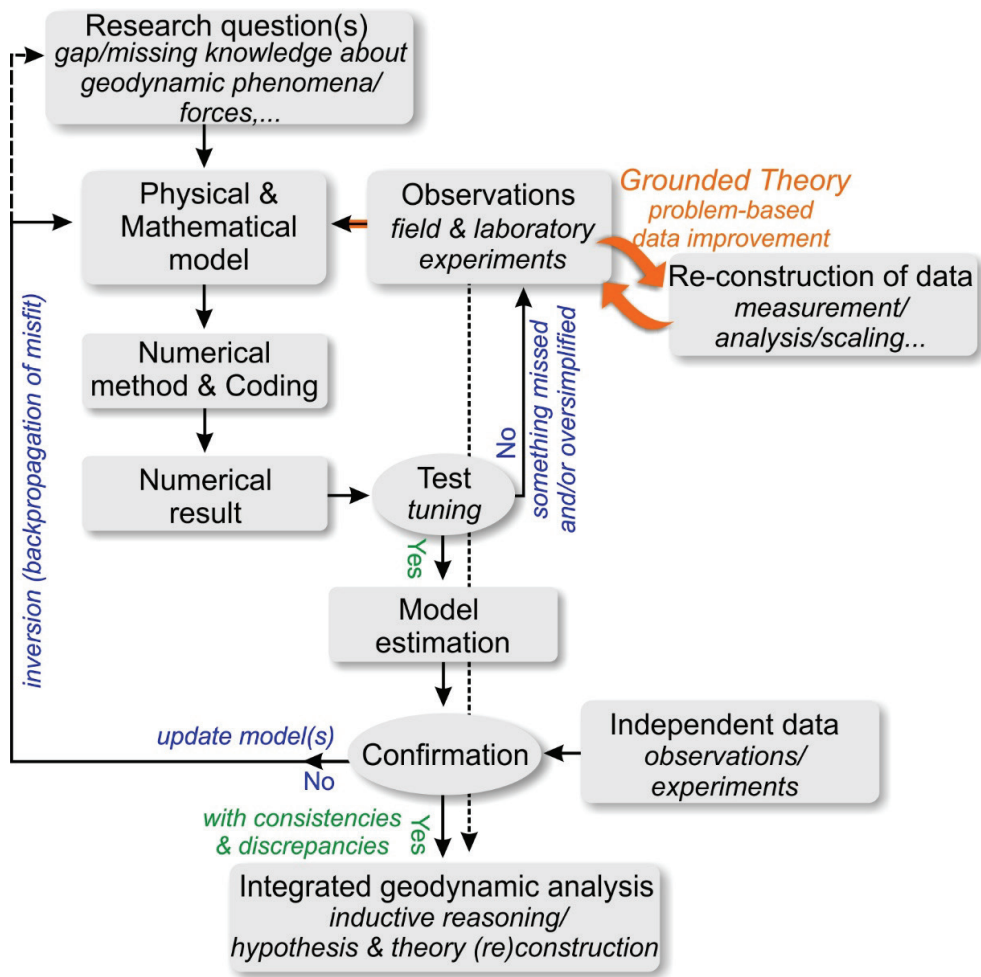
Multidimensional instantaneous (time-independent/present-day) and time-dependent (evolution) numerical models are a complex form of scientific hypotheses (Oreskes et al., 1994) that are used to investigate internal planetary forces that consistently affect the Earth's topography, plate boundaries, crustal and lithospheric deformation processes (e.g., Pysklywec et al., 2000; 2002; Pysklywec and Beaumont, 2004; Ismail-Zadeh and Tackley, 2010; Flament et al., 2013; Faccenna and Becker, 2010; 2020; Gerya, 2022; Davies et al., 2023; Lanari et al., 2023). Numerical models, therefore, help to better understand complex natural processes that can be controlled, for example, by the rheology of materials (and/or viscosity, King, 2016) such as temperature, density, and petrographic properties at a wide range of spatiotemporal scales. Rheology is used here to refer to the flow of materials in liquid and/or solid-state, which indicates viscous behavior rather than elastic deformation in response to applied forces (Ranalli & Murphy, 1987) by analogy with the motto “everything flows (πάντα ῥεῖ)” of Simplicius of Cilicia, an Anatolian philosopher and mathematician (1st century BC, Beris and Giacomini, 2014).

In this paper, the focus is on instantaneous geodynamic models involving a process of theory construction from data to investigate time-independent variations originating in the upper mantle. To this aim, numerical models in the Anatolian Plate are considered (Şengül Uluocak et al., 2016; 2021) with a discussion about the heuristic nature of numerical modeling

in geosciences. First, the numerical modeling strategy was analyzed through the conventional modeling approach and then a systematic problem-oriented data reconstruction procedure is discussed as an improvement to the numerical geodynamic modeling design.

## INSTANTANEOUS GEODYNAMIC MODELING ARCHITECTURE

Multidimensional thermomechanical models of the Central and East Anatolian plateaus (Şengül Uluocak et al., 2016; 2021), which are discussed here specifically, were conducted following the conceptual flow chart in Figure 1, partly presented for conventional numerical modeling (e.g., Ismail-Zadeh and Tackley, 2010). That is, the model inherently begins with a research problem and continues in turn with the definition of physical and mathematical models, numerical methods and coding, and subsequent construction of explanatory theories. The systematic research process in Figure 1 refers to a feedforward (forward modeling) backpropagation (inversion) modeling architecture where the geodynamic concept determines what type of data will be used in the model and the data (observations and/or laboratory experiments) feeds the model nonlinearly. This approach involves evaluating the results and tuning/adjusting parameters and boundary conditions to avoid oversimplification and/or missing inputs, although some simplifications (e.g., 3-layered earth model, Figure 2a) are inevitable when modeling spatially-temporally constrained 3-dimensional (3D) natural processes.



**Figure 1.** Conceptual flow chart showing feed-forward backpropagation modeling architecture for the instantaneous numerical geodynamic model. Orange arrows indicate the data reconstruction procedure following the Grounded Theory (GT) method.

**Şekil 1.** Anlık sayısal jeodinamik model için ileri beslemeli geri yayımlı modelleme mimarisini gösteren kavramsal akış şeması. Turuncu oklar Temellendirilmiş Teori yöntemini izleyen veri yeniden yapılandırılması sürecine işaret etmektedir.

Possible mismatches between estimations and multidisciplinary independent datasets are optimized systematically during the inversion procedure using empirical approaches, as well as statistical and probabilistic inversion methods (e.g., Van Zelst et al., 2022 and references therein). This is shown as confirmation in Figure 1, implying the legitimacy of the estimation (e.g., Oreskes et al., 1994). In practice, following visual inspection including pattern recognition and qualitative comparison, the independent variables

are iteratively renewed to achieve the most possible unique result (viz. empirically adequate result, e.g., Oreskes et al., 1994 and references therein) that addresses the research problem. For instance, comparing spatial patterns and amplitudes is a common way to analyze the agreement between model results and observations (e.g., Şengül Uluocak et al., 2019; Faccenna and Becker, 2020). Thus, finally, the model provides an ultimate result with insight that enables the modeler to (re)produce and/or to (re)interpret independent



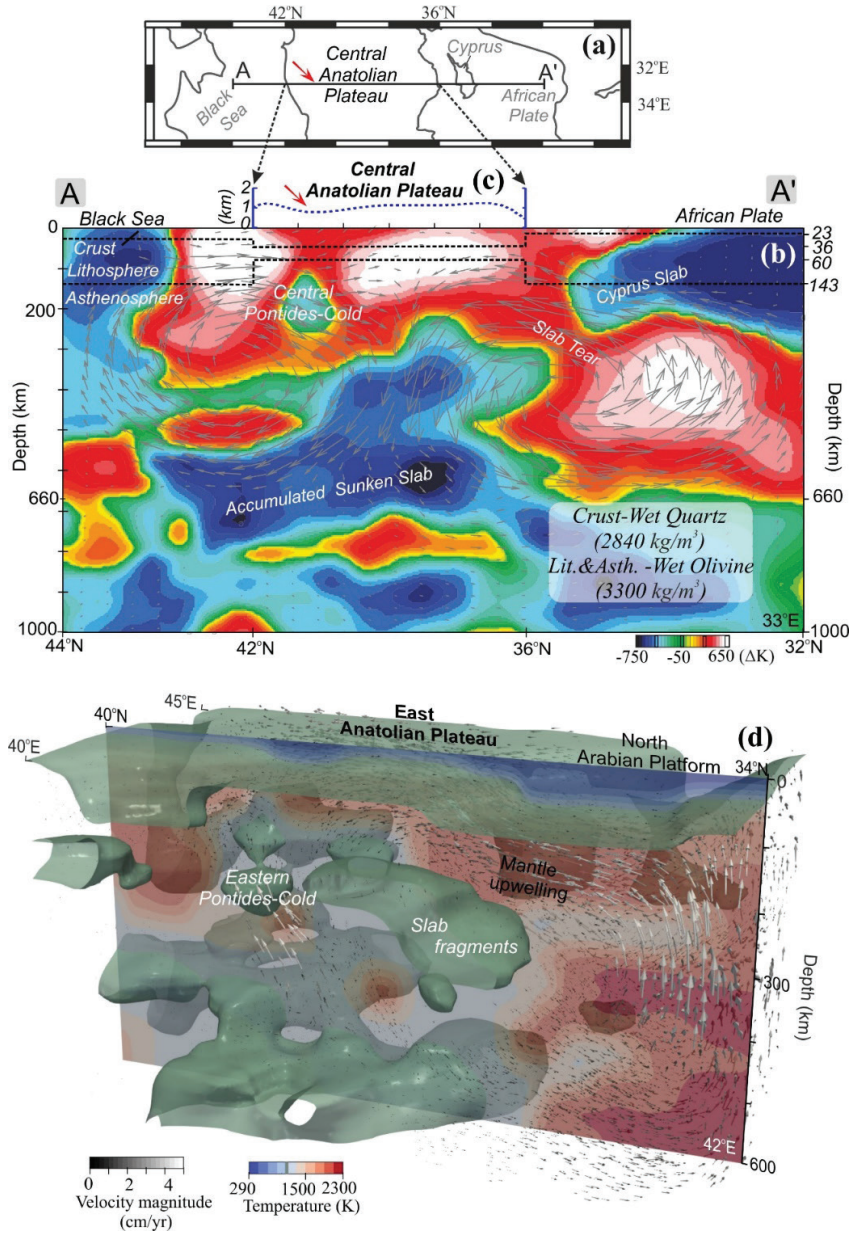
observations (e.g., surface heat flow, magmatism, density, crustal and lithospheric boundaries) and relate them to the natural phenomena (e.g., lithospheric removal, crustal extension).

In Central and Eastern Anatolia (Figure 2), numerical models were designed based on material properties derived from numerous observations and laboratory experiments (e.g., Ranalli, 1995; Hirth and Kohlstedt, 1996; 2003; Naliboff and Buitert, 2015; references in Şengül Uluocak et al., 2021) with three compositional layers (i.e. crust, lithospheric mantle, and asthenosphere) extending from the surface to depths of 1000 km (Figure 2b) and 600 km (Figure 2d). Average thicknesses for crustal and lithosphere-asthenosphere (LAB) boundaries (ranging from ~30-43 km for the Moho, ~60-140 km for the LAB, e.g., Şeber et al., 2001; Starostenko et al., 2004; Pamukçu et al., 2007; Zor, 2008; Molinari and Morelli 2011; Priestley et al., 2012; Priestley and McKenzie, 2013; Laske et al., 2013; Kheirkhah et al., 2013; Yegorova et al., 2013; Karabulut et al., 2019) were used (e.g., 36 km and 60 km in Central Anatolia, Figure 2b). Densities were obtained from seismic data (Piomallo and Morelli, 2003) and have good agreement with the latest high-resolution seismic tomography models, especially in terms of large-scale variations of upper mantle structures beneath the Anatolian Plate (e.g., Portner et al., 2018; a compilation of seismic tomography models in Şengül Uluocak et al., 2021). Thermal fields were obtained based on the thermal expansion rule;  $\rho(T) = \rho_0 (1 - \alpha \Delta T)$ , where  $\rho_0$  is the reference density (e.g., Figure 2b) and  $\alpha$  is the coefficient of thermal expansivity ( $K^{-1}$ ). The temperature gradient ( $\Delta T$ , Figure 2b) with normal geotherms was used to obtain the temperature field (cross-section in Figure 2d, Karato, 1993; Demetrescu and Andreescu, 1994; Shaw and Pysklywec, 2007; Komut et al., 2012; Şengül Uluocak et al., 2016).

In the mathematical model (Figure 1), thermal convection and deformation were calculated for an incompressible medium by using the Boussinesq approximation for the conservation equations of

mass ( $\rho$ ), momentum ( $\sigma$ ), and energy ( $E$ ), where  $v$  is the velocity -m/s;  $\sigma$  is the stress tensor;  $\rho$  is density;  $g$  is the gravitational acceleration-  $m/s^2$ ;  $C_p$  is specific heat capacity-  $J/kg/K$ ;  $T$  is the temperature-K;  $t$  is time-s and  $k$  is thermal conductivity-W/m/K) (e.g., Fullsack, 1995; Bangerth et al., 2019). The stress tensor ( $\sigma$ ) changes depending on the plastic yield stress and viscous stress in the calculations ( $\sigma$ ) (e.g., Pysklywec et al., 2000; Glerum et al., 2018; Bangerth et al., 2019; Van Zelst et al., 2022 and references therein). The effective viscosity ( $\eta$ ) is a function of the second invariant of the deviatoric strain rate tensor ( $\dot{\epsilon}$ ) and temperature  $T$ , where  $B$  is the viscosity parameter ( $Pa \cdot s^{-1}$ ),  $n$  is non-Newtonian viscosity exponent,  $Q$  is activation energy ( $Jmol^{-1}$ ) and  $R$  is the universal gas constant ( $Jmol^{-1}K^{-1}$ ). The transition zone was defined by considering viscosity variation between the upper and lower mantle in the 2D model (i.e., a 100-fold increase in viscosity at 660 km depth) along the profile A-A' (Figure 2a and 2b). Boundary conditions were set as a free surface on the top allowing for dynamic topography caused by normal fluid stresses in the underlying mantle, and free slip for the rest of the boundaries.

Since the process requires the analysis and calculation of large volumes of data, all models were run on supercomputing clusters using different open-source libraries and numerical modeling codes based on the finite element method (SOPALE and ASPECT, Fullsack, 1995; Pysklywec et al., 2002; Kronbichler et al., 2012; Heister et al., 2017; Bangerth et al., 2019). Time-dependent changes, such as erosion, internal heating and sedimentation, were neglected in the instantaneous models. Estimations were obtained from a series of numerical results testing different parameters (test/tuning) such as densities, thicknesses, strain rates/viscosity, and temperature configurations in the investigated regions. The reader is referred to Şengül Uluocak et al. (2016; 2021) for further details of the initial parameters used in the numerical models.



**Figure 2.** **a)** Location of Profile A-A' (33°E) in Central Anatolia. **b)** 2D temperature variations with Moho and LAB interfaces (black lines, see text for references). **c)** Dynamic topography along the profile in Central Anatolia. Gray arrows in (b) show the upper mantle-induced convection pattern (modified from Şengül Uluocak et al., 2016). **d)** 3D variation of cold upper mantle structures with mantle flow vectors from the surface to a depth of 600 km. Cross-section of the temperature field (42°E) beneath Eastern Anatolian Plateau (modified from Şengül Uluocak et al., 2021).

**Şekil 2.** **a)** Orta Anadolu, A-A' Profilinin konumu (33°E). **b)** Moho ve LAB ara yüzleri (siyah çizgiler) ile 2B sıcaklık değişimi (kaynaklar metinde sunulmuştur). **c)** Orta Anadolu'yu kesen profil boyunca dinamik topografya. (b)'deki gri oklar üst manto tarafından indüklenen konveksiyon modelini/dokusunu göstermektedir (Şengül Uluocak vd., 2016'dan düzenlenmiştir). **d)** Soğuk üst manto yapıları ve manto akış vektörlerinin yüzeyden 600 km derinliğe değin 3B değişimi. Doğu Anadolu Platosu altındaki sıcaklığın kesiti (42°E) (Şengül Uluocak vd., 2016'dan düzenlenmiştir).

## RESULTS and DISCUSSION

2D and 3D mantle flows are presented with temperature models mainly based on seismically inferred mantle structures beneath the Anatolian Plate (Figure 2). The purpose here is to show variations with a discussion of overall findings and introduce an iterative process of the Grounded Theory method to obtain the most unbiased/unique modeling results. Accordingly, thermomechanical model estimations (Figure 2b-d) indicate long-wavelength ( $> \sim 150$  km) dynamic support of the observed topography ( $\sim 1$  km in Central Anatolia, Figure 2c) in response to the upwelling mantle beneath the plateaus. Along the cross-section (A-A', Figure 2a) cutting across Central Anatolia, the result shows the upper mantle support imaged as northward flows through the Cyprus slab tear in the south of the study area (Figure 2b). Towards the north of the profile, return flows that are bounded by the dense/cold material of the Black Sea region and the northward subducted ruptured-Cyprus slab accumulating in the mantle transition zone are observed (Figure 2b). The 3D model, on the other hand, reveals a significant SW-NE directional mantle flow at long wavelengths with a westward regional flow pattern in the East Anatolian Plateau (Figure 2d). These general findings are in good agreement with numerous observations (e.g., Biryol et al., 2011; Legendre et al., 2021; Şengül Uluocak et al., 2016; 2021 and references therein) and lithospheric removal hypotheses proposed for these parts of the Anatolian Plate. For instance, a lithospheric drip under the Central Anatolian arc/Kırşehir arc (Göğüş et al., 2017) and lithospheric delamination or progressive lithospheric peeling under the East Anatolian crust (Göğüş and Pysklywec, 2008; Memiş et al., 2020) support the idea that the study regions are isostatically uncompensated and significantly affected by an upwelling mantle in concordance with slow upper mantle seismic tomography anomalies (e.g., Portner et al., 2018; Kounoudis et al., 2020; Şengül Uluocak et al., 2016; 2021).

As a result, it can be concluded from the modeling estimations here that multidimensional instantaneous thermomechanical models obtained by the conventional modeling approach provide useful information about the upper mantle-induced forces and their surface effects in the study regions. Yet it should be noted that relative quantitative results may involve some uncertainties/inconsistencies mainly due to the limited knowledge of subsurface structures and poorly constrained data used in the numerical models (e.g., Şengül Uluocak et al., 2019; Petrescu et al., 2023). In this case, a high-resolution physical model with data (such as density, temperature, etc.) sensitive to relatively small-scale structures (e.g., crustal heterogeneities), for instance, could be used to improve numerical results and interpretations. The crust-based model with a viscously strong lithospheric layer beneath the Central Anatolian Plateau, the T-2 model based on the latest regional tomography data in Eastern Anatolia, and the combined temperature model (Model-2) in the Southeast Carpathians are some examples of model improvement applications (Şengül Uluocak et al., 2016; 2019; 2021). Refinements of parameters and thus of results (i.e. inversion in conventional modeling) will not be further elaborated here. From a critical point of view, however, it can be argued that the estimations are often data (and/or parameter)-dependent and that sometimes problem-oriented refinements to the data may be necessary to exploit the heuristic results of the numerical model.

Overall, given that the results of geodynamic models are not unique and their accuracy may not be fully tested, ultimate outcomes exclusively provide an approximation to nature with an argument that needs to be falsified. Unlike the standalone mathematical models and numerical coding of the principals driving the flow in the upper mantle, verification and/or validation of the estimations might be impossible mainly due to geodynamic models with empirically-based input

parameters not being closed systems in which all components are correct and founded independently (Oreskes et al., 1994; Chandra et al., 2019). Namely, there is no ultimate model that satisfies all observations and solves the whole conundrum with a complete 3D view of mantle deformation. It should also be noted that a more complex model does not necessarily mean a more reliable/accurate result (e.g., Van Zelst et al., 2022). Contrarily in fact, I suggest that a simple model, with a heuristic nature derived from a wide parameter space, often says more. This is the case especially with the results obtained from the conventional modeling approach that also includes empirical inversion processes as discussed here. The implication is that while addressing a complex research phenomenon by using instantaneous numerical geodynamic models, it is worth considering the discrepancies as well as consistencies between results and independent observations, and/or previous hypotheses. For example, the relationship of the modeling results with relatively small-scale Pontides-cold anomalies and uppermost mantle structures beneath Eastern Anatolia (i.e., slab fragments, Figure 2) does not appear to be consistent with previous hypotheses and/or with some of the regional seismic tomography models (e.g., Şengül Uluocak et al., 2021 and references therein). That is, an active drip-like deformation and/or a piecemeal Tethyan slab foundering are not generally accepted hypotheses to explain the lithospheric removal beneath Central and Eastern Anatolia, respectively. However, model results may lead the interpretation of upper mantle-induced forces, as well as the emergence of new research questions for the detailed study on related anomalies.

Unlike the hypothesis-dependent evolution models (theory-first), instantaneous numerical models (facts-before-theory) are substantially dependent on the resolution and sensitivity of the chosen primary data sets, even if optimization has been made during the inversion stage to achieve

possible unique/adequate results. Leaving aside a methodological discussion on what counts as data and the fundamental so-called secure knowledge used to measure/collect it, the *a priori theory* only considered in thermomechanical models is that nature with observable properties can be known using scientific methods without requiring pre-formulated postulates. In other words, the numerical models shown here were designed based on data (observations and laboratory experiments) without any previous theoretical input (e.g., slab tear, lithospheric drip, and delamination, etc.), therefore, information that is embedded in data plays an important role in the results. To extract this information (a theory according to the context here) from data, performing data analysis and also measurements iteratively during the modeling procedure may be suggested as a way to improve data quality/sensitivity and/or problem-oriented data acquisition at scales chosen in the numerical models. These processes shown as orange arrows in Figure 1 indicate not adjustment and/or refinement but the substantial reconstruction of data. Namely, orange arrows imply a relationship between the modeling problematic and the process of data construction (i.e., measurement/analysis/scaling) and show a practical way to improve numerical models using problem-oriented data. Hence, the question of “observations: what for?” (e.g., Şengör, 2019) involves a dynamic process in numerical modeling and is iteratively re-answered by reconstructing the data in each problem.

In this manner, the proposed modeling procedure follows orthodox Grounded Theory (GT), which was first introduced by Glaser and Strauss (1967) for qualitative research in social science as a strategy to construct a theory inductively derived from data. Since then, the GT method has been elaborated further and extended for different quantitative and qualitative research areas (e.g., Strauss & Corbin, 1990; Glaser 1992; Diaz et al., 2023). All in all, as can be inferred from the conventional GT perspective, which shares a

'bottom-up' conception of scientific inquiry with the abductive theory of method (e.g., Magnani et al., 2018 and references therein; Danermark et al., 2019), data used in the instantaneous numerical model should be approached in the most unbiased way possible, with a strategy that involves iteratively reconstructing data (with or without data collection) that should be followed to understand what the data implies. Together, my analyses lead to the conclusion that the modeling approach introduced here could be highly functional for modelers/geoscientists in terms of avoiding data waste for the sake of theory and by eliciting theory grounded in data.

### **GENİŞLETİLMİŞ ÖZET**

*Bu çalışmada, yer bilimlerinde karmaşık bir araştırma olgusu ele alınırken kullanılan jeodinamik sayısal modellerin metodolojisi üzerinde bir tartışma yürütülmüştür. Bu amaçla öncelikle, geleneksel sayısal jeodinamik modelleme yöntemi, Anadolu Levhasındaki (Orta ve Doğu Anadolu platoları) güncel (zaman-bağımsız) 2 ve 3-boyutlu termomekanik modellerden (Şengül Uluocak vd., 2016; 2021) yararlanılarak ve Şekil 1'de sunulan kavramsal akış şemasındaki adımlar izlenerek açıklanmıştır. Çalışmada örneklendirilen modellerin sonuçları (Şekil 2) genel olarak değerlendirilmiş, güncel-çok boyutlu sayısal modellerin kısıtlıkları ve üstünlüklerine değinilmiştir. Bu aşamada modellerin doğası gereği elde edilen göreceli değişimler ve dolayısıyla jeodinamik model tasarımı bir iyileştirme stratejisi olarak sayısal modellemede sistematik veri yapılandırması üzerinde durulmuştur. Önerilen bu yaklaşım burada da örneklendirilen ve zaten yapılagelen veri düzeltme/iyileştirme süreçleri yanısıra, sayısal modelleme çalışmalarında kullanılan verinin önemli ölçüde probleme dayalı olarak (yeniden) inşasını içermektedir. Böylelikle, sosyal bilimlerde*

*yaygın olarak kullanılan Temellendirilmiş Kuram yaklaşımının yer bilimlerinde sayısal modelleme stratejisi kapsamındaki kullanımına dikkat çekilerek, hipotez (buradaki kavramsallaştırma doğrultusunda; kuram) uğruna veriyi göz ardı etmekten kaçınmada ve veriye dayalı kuramın ortaya çıkarılmasında Yer Bilimciler/ Modelciler için son derece işlevsel olabileceği değerlendirilmiştir.*

### **ACKNOWLEDGMENTS**

This paper was written for the Special Issue on Quantitative Modeling in Earth Sciences, and I would like to thank the editors of the Geological Bulletin of Turkey. Three reviewers, Russell N. Pysklywec, Emin Ulugergerli and Ömer F. Bodur, carefully read my manuscript, and I appreciate all their valuable comments and suggestions, although none of them can be held responsible for my statements. I acknowledge the Computational Infrastructure for Geodynamics (geodynamics.org), which is funded by the National Science Foundation under awards EAR-0949446 and EAR-1550901 for supporting the development of ASPECT. I sincerely thank Russell N. Pysklywec for kindly assisting with numerical modeling codes and access to computational systems. The SOPALE modeling code was originally developed by Phillip Fullsack at Dalhousie University, Canada with Chris Beaumont and his Geodynamics group. 3D computations were performed on the GPC supercomputer at the Niagara HPC Consortium, with support provided by the Department of Earth Sciences, University of Toronto (www.es.utoronto.ca) and Compute Canada (www.computecanada.ca).

### **ORCID**

Ebru Şengül Uluocak  <https://orcid.org/0000-0002-6701-463X>

## REFERENCES / KAYNAKLAR

- Bangerth, W., Dannberg, J., Gassmoeller, R. & Heister, T. (2019). April 29. *ASPECT* v2.1.0. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2653531>
- Beris, A. N. & Giacomin, A. J. (2014). πάντα ρει̃: Everything flows. *Applied Rheology*, 24(5):11-23.
- Biryol, B. C., Beck, S. L., Zandt, G. & Özacar, A. A. (2011). Segmented African lithosphere beneath the Anatolian region inferred from teleseismic P-wave tomography. *Geophysical Journal International*, 184(3), 1037-1057.
- Chandra, R., Azam, D., Müller, R. D., Salles, T. & Cripps, S. (2019). BayesLands: A Bayesian inference approach for parameter uncertainty quantification in Badlands. *Computers & Geosciences*, 131, 89-101.
- Danermark, B., Ekstrom, M. & Jakobsen, L. (2019). *Explaining society: An introduction to critical realism in the social sciences*. 2<sup>nd</sup> Edition. Routledge. ISBN: 978-1-351-01783-1
- Davies, D. R., Ghelichkhan, S., Hoggard, M., Valentine, A. & Richards, F. D. (2023). Observations and models of dynamic topography: Current status and future directions. In J.C. (Ed.) *Duarte Dynamics of Plate Tectonics and Mantle Convection* (pp: 223-269). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85733-8.00017-2>
- Demetrescu, C. & Andreescu, M. (1994). On the thermal regime of some tectonic units in a continental collision environment in Romania. *Tectonophysics*, 230, 265–276. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90140-6)
- Diaz, J., Pérez, J., Gallardo, C. & González-Prieto, Á. (2023). Applying Inter-Rater Reliability and Agreement in collaborative Grounded Theory studies in software engineering. *Journal of Systems and Software*, 195, Article 111520.
- Faccenna, C., & Becker, T.W. (2010). Shaping mobile belts by small-scale convection. *Nature*, 465(7298), 602–605.
- Faccenna, C. & Becker, T.W. (2020). Topographic expressions of mantle dynamics in the Mediterranean. *Earth-Science Reviews*, 209, Article 103327. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103327>
- Flament, N., Gurnis, M. & Muller, R. D. (2013). A review of observations and models of dynamic topography, *Lithosphere*, 5, 189–210.
- Fullsack, P. (1995). An arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation for creeping flows and its application in tectonic models. *Geophysical Journal International*, 120(1), 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb05908.x>
- Gerya, T. (2022). Numerical modeling of subduction: State of the art and future directions. *Geosphere*, 18(2), 503-561. <https://doi.org/10.1130/GES02416.1>
- Göğüş, O. H. & Pysklywec, R. N. (2008). Mantle lithosphere delamination driving plateau uplift and synconvergent extension in eastern Anatolia. *Geology*, 36(9), 723–726.
- Göğüş, O. H., Pysklywec, R. N., Şengör, A. M. C. & Gün, E. (2017). Drip tectonics and the enigmatic uplift of the Central Anatolian Plateau. *Nature communications*, 8(1), Article 1538. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01611-3>
- Glaser, B., & Strauss, A. (1967). *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. New York: Adline Pub. Co.
- Glaser, B.G. (1992). *Emergence vs. Forcing: Basics of Grounded Theory Analysis*. Mill Valley, CA: Sociology Press.
- Glerum, A., Thieulot, C., Fraters, M., Constantijn, B. & Spakman, W. (2018). Nonlinear viscoplasticity in ASPECT: Benchmarking and applications to subduction. *Solid Earth*, 9(2), 267–294. <https://doi.org/10.5194/se-9-267-2018>
- Heister, T., Dannberg, J., Gassmüller, R. & Bangerth, W. (2017). High accuracy mantle convection simulation through modern numerical methods–II: realistic models and problems. *Geophysical Journal International*, 210(2):833-51.
- Hirth, G. & Kohlstedt, D. L. (1996). Water in the oceanic upper mantle: implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 144, 93–108.
- Hirth, G. & Kohlstedt, D. L. (2003). Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: a view from the experimentalists. In *Eiler, J. (Ed.)*,

- Inside the Subduction Factory*, 138, (pp: 83-105), *Geophysical Monograph Series*. <https://doi.org/10.1029/138GM06>
- Ismail-Zadeh, A. & Tackley, P. (2010). *Computational methods for geodynamics*. Cambridge University Press.
- Karabulut, H., Paul, A., Özbakır, A.D., Ergün, T. & Şentürk, S. (2019). A new crustal model of the Anatolia–Aegean domain: evidence for the dominant role of isostasy in the support of the Anatolian plateau. *Geophysical Journal International*, 218(1), 57-73.
- Karato, S. I. (1993). Importance of anelasticity in the interpretation of seismic tomography. *Geophysical Research Letters*, 20(15), 1623-1626.
- Kheirkhah, M., Neill, I., Allen, M. B. & Ajdari, K. (2013). Small-volume melts of lithospheric mantle during continental collision: Late Cenozoic lavas of Mahabad, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74, 37–49.
- King, S. D. (2016). Reconciling laboratory and observational models of mantle rheology in geodynamic modelling. *Journal of Geodynamics*, 100, 33-50.
- Komut, T., Gray, R., Pysklywec, R.N. & Göğüş, O. H. (2012). Mantle flow uplift of western Anatolia and the Aegean: Interpretations from geophysical analyses and geodynamic modeling. *Journal of Geophysical Research*, 117(B11). <https://doi.org/10.1029/2012jb009306>
- Kounoudis, R., Bastow, I. D., Ogden, C. S., Goes, S., Jenkins, J., Grant, B. & Braham, C. (2020). Seismic tomographic imaging of the Eastern Mediterranean mantle: Implications for terminal-stage subduction, the uplift of Anatolia, and the development of the North Anatolian Fault. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(7), e2020GC009009. <https://doi.org/10.1029/2020gc009009>
- Kronbichler, M., Heister, T. & Bangerth, W. (2012). High accuracy mantle convection simulation through modern numerical methods. *Geophysical Journal International*, 191(1), 12-29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05609.x>
- Lanari, R., Faccenna, C., Natali, C., Şengül Uluocak, E., Fellin, M. G., Becker, T. W., Göğüş, O., Youbi, N., Clementucci, R. & Conticelli, S. (2023). The Atlas of Morocco: A Plume-Assisted Orogeny. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(6), e2022GC010843 <https://doi.org/10.1029/2022GC010843>
- Laske, G., Masters, G., Ma, Z. & Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0- A 1-degree Global Model of Earth's Crust. *Geophys. Res.*, 15, Abstract EGU 2013-2658.
- Legendre, C. P., Zhao, L. & Tseng, T. L. (2021). Large-scale variation in seismic anisotropy in the crust and upper mantle beneath Anatolia, Turkey. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-7, Article 73. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00142-6>
- Magnani, L., Aliseda, A., Longo, G., Sinha, C., Street, K. H. I., Thagard, P. & Woods, J. (2018). Studies in Applied Philosophy. *Epistemology and Rational Ethics*. 45. pp. 207.
- Memiş, C., Göğüş, O. H., Uluocak, E. Ş., Pysklywec, R., Keskin, M., Şengör, A. M. C. & Topuz, G. (2020). Long wavelength progressive plateau uplift in Eastern Anatolia since 20 Ma: Implications for the role of slab peel-back and break-off. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(2), e2019GC008726. <https://doi.org/10.1029/2019GC008726>
- Molinari, I. & Morelli, A. (2011). EPcrust: a reference crustal model for the European plate. *Geophysical Journal International*, 185(1), 352–364.
- Naliboff, J. & Buiter, S. J. H. (2015). Rift reactivation and migration during multiphase extension. *Earth and Planetary Science Letters*, 421, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.03.050>
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 1263(5147):641-646.
- Pamukçu, O. A., Akçığ, Z., Demirbaş, Ş. & Zor, E. (2007). Investigation of crustal thickness in eastern Anatolia using gravity, magnetic and topographic data. *Pure Applied Geophysics*, 164, 2345–2358.
- Petrescu, L., Mihai, A. & Borleanu, F. (2023). Slab tear and rotation imaged with core-refracted shear wave anisotropy. *Journal of Geodynamics*, 157, Article 101985. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.101985>

- Piromallo, C. & Morelli, A. (2003). *P* wave tomography of the mantle under the Alpine–Mediterranean area. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2). <https://doi.org/10.1029/2002JB001757>
- Portner, D. E., Delph, J. R., Biryol, C. B., Beck, S. L., Zandt, G., Özacar, A. A., Sandvol, E., Türkelli, N. (2018). Subduction termination through progressive slab deformation across Eastern Mediterranean subduction zones from updated P-wave tomography beneath Anatolia. *Geosphere*, 14(3):907-25.
- Priestley, K., McKenzie, D., Barron, J., Tatar, M. & Debayle, E. (2012). The Zagros core: Deformation of the continental lithospheric mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(11), Q11014. <https://doi.org/10.1029/2012GC004435>
- Priestley, K. & McKenzie, D. (2013). The relationship between shear wave velocity, temperature, attenuation and viscosity in the shallow part of the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 381, 78-91.
- Pysklywec, R. N., Beaumont, C. & Fullsack, P. (2000). Modeling the behavior of the continental mantle lithosphere during plate convergence. *Geology*, 28(7), 655-658. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<655:MTBOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<655:MTBOTC>2.0.CO;2)
- Pysklywec, R. N., Beaumont, C. & Fullsack, P. (2002). Lithospheric deformation during the early stages of continental collision: numerical experiments and comparison with South Island, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 107(B7), 2133. <https://doi.org/10.1029/2001JB000252>
- Pysklywec, R. N. & Beaumont, C. (2004). Interpolate tectonics: feedback between radioactive thermal weakening and crustal deformation driven by mantle lithosphere instabilities. *Earth and Planetary Science Letters*, 221, 275–292.
- Ranalli, G. & Murphy, D. C. (1987). Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, 132(4):281-95.
- Ranalli, G. (1995). *Rheology of the Earth* (p. 413). Chapman and Hall.
- Shaw, M. & Pysklywec, R. N. (2007). Anomalous uplift of the Apennines and subsidence of the Adriatic: The result of active mantle flow? *Geophysical Research Letters*, 34(4), L04311. <https://doi.org/10.1029/2006GL028337>
- Starostenko, V., Buryanov, V., Makarenko, I., Rusakov, O., Stephenson, R., Nikishin, A., et al. (2004). Topography of the crust–mantle boundary beneath the Black Sea Basin. *Tectonophysics*, 381(1–4), 211-233. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2002.08.001>
- Strauss, A. & Corbin, J. (1990). *Basics of Qualitative Research: Grounded Theory Procedures and Techniques*. SAGE Publication, London.
- Şeber, D., Sandvol, E., Sandvol, C., Brindisi, C. & Barazangi, M. (2001). Crustal model for the Middle East and North Africa region: Implications for the isostatic compensation mechanism. *Geophysical Journal International*, 147(3), 630-638. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01572.x>
- Şengör, A. M. C. (2019). Observations: What for? *Canadian Journal of Earth Sciences*, 56(11): xi-v. <https://doi.org/10.1139/cjes-2019-0114>
- Şengül Uluocak, E., Pysklywec, R. & Göğüş, O. H. (2016). Present-day dynamic and residual topography in Central Anatolia. *Geophysical Journal International*, 206(3), 1515-1525. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw225>
- Şengül Uluocak, E., Pysklywec, R. N., Göğüş, O. H. & Ulugergerli, E. U. (2019). Multidimensional geodynamic modeling in the Southeast Carpathians: Upper mantle flow-induced surface topography anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(7), 3134-3149. <https://doi.org/10.1029/2019GC008277>
- Şengül Uluocak, E., Göğüş, O. H., Pysklywec, R. N. & Chen, B. (2021). Geodynamics of East Anatolia-Caucasus Domain: Inferences From 3D Thermo-Mechanical Models, Residual Topography, and Admittance Function Analyses. *Tectonics*, 40(12), e2021TC007031. <https://doi.org/10.1029/2021TC007031>
- Van Zelst, I., Cramer, F., Pusok, A. E., Glerum, A., Dannberg, J. & Thieulot, C. (2022). 101 geodynamic modelling: how to design, interpret, and communicate numerical studies of the solid Earth. *Solid Earth*, 13(3):583-637.



- Yegorova, T., Gobarenko, V. & Yanovskaya, T. (2013). Lithosphere structure of the Black Sea from 3-D gravity analysis and seismic tomography. *Geophysical Journal International*, 193(1), 287–303. <https://doi.org/10.1093/gji/ggs098>
- Zor, E. (2008). Tomographic evidence of slab detachment beneath eastern Turkey and the Caucasus. *Geophysical Journal International*, 175, 1273–1282.



**Yer Bilimlerinde Modellemeye Genel Bir Bakış;  
Çevre Jeofiziği Uygulamalarından Çıkarımlar**

*An Overview of Modeling in Earth Sciences; Inferences from Environmental Geophysics Applications*

**Ebru Şengül Uluocak<sup>1\*</sup>** , **Emin Uğur Ulugergerli<sup>1</sup>** 

<sup>1</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

• Geliş/Received: 11.07.2023 • Düzeltmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 08.08.2023 • Kabul/Accepted: 31.08.2023  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 04.10.2023 • Baskı/Printed: 31.07.2024

*Araştırma Makalesi/Research Article*

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

**Öz:** Yer bilimleri ile ilgili bir araştırmada, jeolojik veya mühendislik problemlerini incelerken, modelleme çalışmaları iki aşamalı olarak işlev görmektedir; i) arazi çalışmasından önce ölçüm parametrelerinin elde edilmesi (kavramsal model) ve ii) arazi çalışmasından sonra, kavramsal model yardımıyla tahmini yeraltı modelinin doğruluğunun kontrol edilmesi. Sayısal modelleme süreci her iki aşamada da tek başına yeterli olmamakla birlikte, disiplinler arası çalışmalardan elde edilen ek bilgilerle sayısal modellerin gerçekçi bir yeraltı yapısına yakınsaması mümkündür.

Bu makalede yerbilimlerinde kullanılan modelleme çalışmaları ile ilgili bir iş akışı tanımlanmıştır ve Çanakkale (Türkiye) eski düzensiz katı atık depolama alanında gerçekleştirilen bir çevre kirliliği araştırması bu iş akışı takip edilerek sunulmuştur. Buna göre, kavramsal bir modele göre belirlenen doğrultularda elektrik özdirenç yöntemi ile tomografi ölçüleri alınmış, çalışma alanının yeraltı özdirenç yapısından gözeneklilik kesiti elde edilerek, varsayımsal iki boyutlu (2B) sayısal birleşik kirlilik iletim modeli üretilmiştir. Sonuçlar, jeofizik ölçümlerin yapıldığı yıllar (2004, 2008 ve 2009) ve sayısal modelleme zamanı (13,6 yıl) boyunca depolama sahasından kaynaklanan kirliliğin mekânsal ve zamansal değişimini göstermektedir. Ayrıca, sayısal modelleme sonuçları, olası araştırma profilinin uzunluğu ve derinliği ile (sırasıyla, ~40-250m ve 0-25 m), ileride bu bölgede yapılabilecek kirlilik çalışmaları için kavramsal bir model sunmaktadır. Sonuçlar, açık atık depolama alanı gibi kirlenici bir kaynaktan yayılan kirlilik bulutunun uzamsal ve zamansal yayılımına duyarlı sayısal modeller ve jeofizik çalışmaların birlikte değerlendirilmesinin önemini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çevre kirliliği, kavramsal model, sayısal modelleme.

**Abstract:** In an earth science-related research study, while investigating geological or engineering problems, numerical modeling functions in two stages; i) prior to the fieldwork, obtaining the survey parameters (conceptual model), and ii) subsequent to the fieldwork, confirming the accuracy of the estimated subsurface structures with the help of the conceptual model. Although the numerical modeling process alone is not sufficient in both stages, it is possible to converge the numerical models into a realistic subsurface structure with additional information obtained from interdisciplinary studies.

In this article, a workflow is proposed employing modeling studies used in earth sciences. Environmental pollution studies carried out on a now-unused open waste disposal site in Çanakkale (Turkey) are presented following this workflow. Accordingly, tomography measurements were made by using the electrical resistivity method along the profiles determined based on a conceptual model, and then a hypothetical two-dimensional (2D) combined solute transport model was produced by obtaining the porosity cross-section from the subsurface resistivity structure of the study area. The results show the spatial and temporal variation of pollution in the landfill during the years

*that geophysical measurements (i.e., 2004, 2008, and 2009) were taken, and the numerical modeling time (13,6 yrs). Besides, the numerical modeling results provide a conceptual model for future pollution studies in this area, with the length and depth of the possible survey profile (~40-250 m and 0-25 m, respectively). The results emphasize the importance of evaluating geophysical studies together with numerical models sensitive to the spatial and temporal spread of the pollution cloud emitted from a polluting source, such as an open dumpsite.*

**Keywords:** *Conceptual model, environmental pollution, numerical modeling.*

## GİRİŞ

“Tüm modeller yanlıştır” istatistikte yaygın olarak kullanılan bir özdeyiş (aphorism) ve kesinsizlik (anapodoton) ifadesidir. Box (1976); “Bütün modeller yanlıştır, bazıları faydalıdır” ünlü satırını yazdığı makalesinde, modelden elde edilecek bir bulgunun her durumda doğru olup olmadığını tartışmanın sonsuza dek sürecek bir kısır döngü olacağını, bunun yerine model sonuçlarının günlük hayatta yararlı bir şekilde uygulanıp uygulanamayacağına daha fazla odaklanılması gerektiğini belirtmiştir. Benzer bir anlayışla parametre, bağıntı ve yaklaşımlardaki kısıtlamalar nedeniyle gerek istatistiksel gerekse de sayısal modellerin her zaman gerçek yapıyı açıklamada yetersiz kalacağı, ancak dinamik dünyayı anlamada oldukça kullanışlı olabilecekleri söylenebilir. Bu nedenle, disiplinler arası araştırmalarda genellikle yeni ve hatta buluşsal denebilecek sonuçlar, modelleme süreci ve model varsayımları hakkındaki tartışmalardan ve soyutlamalardan türetilir. Böylelikle modeller aslında, gözlemlenen bilgilere neden olan karmaşık sistemler ve mekanizmalar hakkında bir düşünme biçimi sağlarlar.

Son yıllardaki bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelerin de etkisiyle, sayısal modeller kullanarak üretilen bilginin, yer bilimlerinde hızlı bir gelişmeye ve yorum gücünde artışa yol açtığı söylenebilir. Bu çalışmada sayısal modellemenin yer bilimlerindeki kullanımı genel olarak tanımlanmış, özgün bir çevre jeofiziği araştırması ile de örneklendirilmiştir. Örnek çalışmada 1989-2009 yılları arasında etkin olarak kullanılan Çanakkale düzensiz katı atık alanından kaynaklanan çevre kirliliği doğru akım

elektrik öz direnç yöntemi ile araştırılmıştır. Ayrıca kirliliğin zaman bağımlı yayılma örüntüsü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Jeofizik ölçü sonuçları ile birlikte basitleştirilmiş yer yapısı modeli, atıktan kaynaklanan kirleticinin (sızıntı suyu) yer içindeki yayılım sürecine bir yaklaşım sağlamaktadır. Buna göre izleyen bölümlerde öncelikle modelleme tanımı ele alınarak yeraltının görüntülenmesi çalışmalarında nasıl kullanıldığı özetlenecek, ardından örnek uygulama değerlendirilecektir.

## MODELLEMEDE GENEL TANIM ve YAKLAŞIMLAR

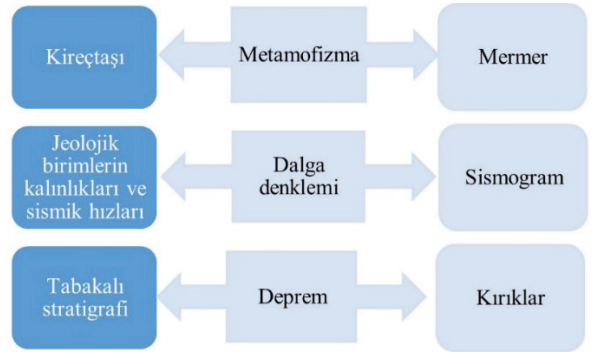
Yer bilimlerinde sayısal modellemede kullanılan terminoloji, makale içeriğine uygun biçimde genel bir çerçevede açıklanacaktır. Değinilen tanımların amaca bağlı olarak genişletilebileceği ve istatistikte önemli bir çalışma alanı olan rastgeleliğin burada göz önüne alınmadığı unutulmamalıdır. Buna göre; **i)** veri, tekrarlanabilir gözlem veya deney süreçleri ile elde edilebilen, aynı koşullar altında (yani, sabit zaman aralığı, alet ve konum gibi) tekrarlanabilir (yeniden-üretilir) özelliği olan, nicel veya anlam kaybı olmadan nicele çevrilebilen bilgiler bütünü olarak tanımlanabilir. **ii)** Parametre, modelde kullanılan ve verinin üretilmesinde etkili olan nicel veya anlam kaybı olmadan nicele çevrilebilen değiştirgenlerdir. **iii)** Deney veya gözlem, bir veya daha fazla bağıntı ile tanımlanabilen ve tekrarlanabilir nicel bilgi üreten süreçlerdir. **iv)** Modelleme, bağıntı ve/veya işlem dizileri kullanılarak, deney ve/veya gözlem sürecinin matematiksel olarak tanımlanması ve veri hacmi de dikkate alındığında bilgisayar ortamında

canlandırılması (simülasyon) çalışmasıdır. Modelleme bir veya daha fazla ardışık süreç içerebilir ve burada tüm bu süreç “dönüşüm işlemi” olarak tanımlanmıştır (Şekil 1). v) Kavramsal veya düşünsel model, çalışma alanında araştırılan soruna yönelik olarak beklentiler doğrultusunda oluşturulan yer/yapı tanımıdır. Kavramsal modelin matematik bağıntı ile tanımlanma zorunluluğu yoktur. Örneğin litolojik bilgilerden veya jeolojik birimleri temsil eden nicel değerlerden oluşabilir. vi) Bu çalışma çerçevesinde belirti, en sade tanımı ile, çevresine göre farklılık gösteren nicel veri olarak tanımlanmıştır. Gözlemden beklenen, ortalamadan farklılıkların, yani belirtilerin ortaya konmasıdır. Genelleştirilmiş bir modelleme süreci Şekil 1’de sunulmuştur. Şekilde parametre girdiyi tanımlarken, veri çıktı veya olası gözlem değerleridir. Kuramsal olarak modelleme süreci tersine döndürülebilir ve veriyi oluşturan parametre araştırılabilir. Şekil 1’de gri ve siyah oklar amaca göre farklı işlem süreçlerini tanımlamaktadır. Şekil 2’de ise parametre, dönüşüm işlemi ve veri tanımları için nicel ve nitel modelleme örnekleri yer almaktadır. Şekil 1 ile ilişkilendirildiğinde girdi bir işlem sonucunda çıktıya dönüşmektedir. Yukarıda değinildiği gibi kuramsal olarak bu işlem tersine işleyebilir. Yani Şekil 1 ve 2, parametreden verinin, veriden de parametrenin eldesinde (diğer bir ifadeyle düz ve ters çözüm işlemlerinde) sayısal modellemenin kullanımını tanımlar. Girdi ve çıktının yer değiştirebileceğini göstermek şekillerde için çift yönlü ok işaretleri kullanılmıştır.



**Şekil 1.** Bir modelleme süreci şematik gösterimi. Gri ve siyah oklar amaca göre seçilecek süreçleri tanımlamaktadır.

**Figure 1.** Schematic representation of modeling process. Gray and black arrows define selected processes according to the aim of the research.

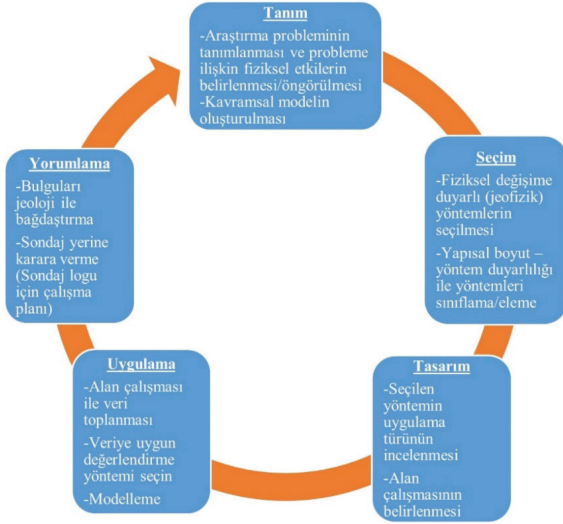


**Şekil 2.** Sayısal ve sayısal olmayan modelleme örnekleri.

**Figure 2.** Examples of numerical and non-numerical modeling.

Genelleştirilmiş bir araştırma döngüsü göz önüne alındığında, modelleme çalışmalarının yeri, diğer jeofizik aramalara da kolayca uyarlanabilir biçimde, jeotermal araştırma örneği dikkate alınarak iki evrede (düz ve ters çözüm) açıklanmıştır. Şekil 3’te sunulan süreç, araştırma probleminin ve buna bağlı olarak da kavramsal jeolojik modelin tanımlanması ile başlar. Kavramsal model olmadan araştırmanın yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi sistematik bir yaklaşım olmayıp, kısır bir döngüye yol açabilir. İncelenen bölgeye ilişkin doğrudan nicel bilgiye mekanik sondaj olmadan ulaşılamayacağından, önceki çalışmalardan, laboratuvar ve/veya arazi ölçümlerinden elde edilen veri ve parametreler ile (örneğin özdirenç değerleri), yani alanı tanımlayabilecek fiziksel etkilere bir yaklaşım ile kavramsal model oluşturulur (örn., Cumming, 2009). Örnek olarak bir jeotermal alandan beklenen litoloji ve özdirenç değer aralığı kavramsal model olarak Şekil 4’te sunulmuştur (Johnston vd., 1992). Uygulanacak jeofizik yöntemlerin seçimi, önerilen jeofizik ölçümlere fiziksel değişimlerin etkisi incelenerek yapılır. Bu seçimde aranan yapının olası boyutu, içeriği (örn., gözenekliliği, sıvı içeriği, mineral bileşimi vb.) gibi bilgilerin tanımlanacağı kavramsal model ile yöntem ilişkisi, yöntemin duyarlılığı ve uygulanabilirliği

de dikkate alınarak (lojistik vb. ile) analiz edilir. Diğer bir ifadeyle, kavramsal modelin sayısal ifadesi olan matematiksel model ile farklı jeofizik yöntemlerin vereceği belirti hesaplanır; yani kuramsal veri elde edilir (Şekil 1, gri oklar). Kavramsal modelden elde edilen kuramsal veriye bağlı olarak, yapısal boyut beklentileri ile yöntemin duyarlılığı karşılaştırılır ve yetersiz kalan yöntem(ler) elenir. Jeofizik yöntemler içinde yerin elektriksel özelliklerine duyarlı olan birçok yöntem olmasına karşın, Manyetotelürik (MT) ve Doğru Akım Elektrik Öz direnç (DAÖ) yöntemleri jeotermal aramacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır ve hangi yöntemin kullanılacağına ve birden fazla yöntem gerekip gerekmediğine bu aşamayla karar verilir.

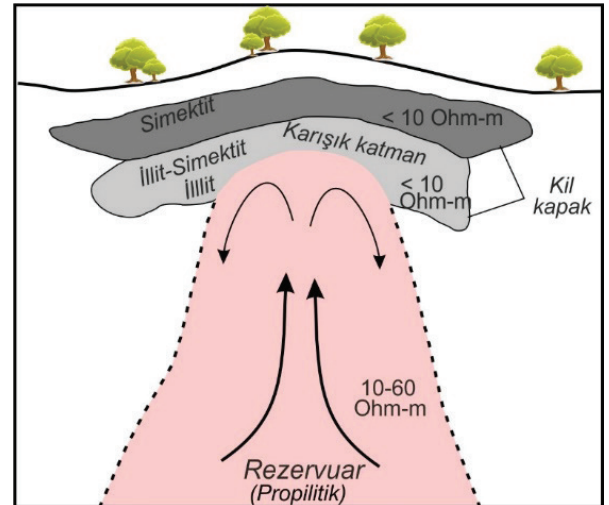


Şekil 3. Araştırma döngüsü.

Figure 3. Research cycle.

Araştırmanın izleyen aşamasında kavramsal model ve seçilen yöntemin dayandığı farklı fiziksel parametreler (gözlem süreci değişkenleri) ile elde edilebilecek en uygun veri türü (Şekil 1, gri oklar) ve bu veriden kestirilebilecek en ayrıntılı yapısal bilgi tanımlanmaya çalışılır (yapıya ilişkin

uzanım ve derinlik gibi değişkenlerin belirlendiği ters çözüm evresi, Şekil 1, siyah oklar). Veriden parametrelerin kestirimlerinde bilgi kaybı en az düzeyde olmalıdır. Yani Şekil 4 örneğindeki kil kapak model sonuçlarından elde edilemiyorsa kavramsal model değil, seçilen arazi uygulama parametreleri düzeltilmelidir (örn., MT frekans aralığı, istasyon aralığı seçimi gibi). Arazi parametreleri olarak adlandırılan bu değişkenlerin belirlenmesi ile birinci modelleme evresi tamamlanmış olur. Kavramsal modelin içerdiği ayrıntılara bağlı olarak tüm yapısal değişimlerin/ birimlerin/katmanların temsil edildiği bir kuramsal veri elde edilemeyebilir. Bu durum, ya yöntemin veya kavramsal modeldeki geniş bir aralıkta değişen parametrelerin neden olduğu kısıt olarak değerlendirilir. Jeofizik yöntemden kaynaklı alan bağımlı kısıtlamalar, daha sonraki aşamalarda göz önüne alınması gereken bir bilgi notu olarak dikkate alınır ve çalışmanın yöntemi ve/veya hedefi yeniden tanımlanır. Örneğin Şekil 4'te sunulan modelde “rezervuar” yerine kil türevlerinden oluşan kapak hedef alınır. Bu aşamaya kadar arazi çalışması yapılmamaktadır.



Şekil 4. Jeotermal alan için kavramsal model (Johnston vd., 1992'den değiştirilerek).

Figure 4. Conceptual model for a geothermal field (modified from Johnston et al., 1992).

Modelleme yapılarak belirlenen alanda uygulama parametreleri (saha/arazi/alan parametreleri) ile ölçümler gerçekleştirilir. Alan uygulama parametreleri ölçüm türü kadar ölçüm noktalarının (istasyonlarının) dağılımını da (örnekleme aralığı) belirlemektedir. Ardından ölçüm tekniği ve ölçüm istasyonlarına (ayrık ölçü durumunda, örn., düşey elektrik sondaj-DES) ve/veya ölçüm dağılımına göre (sürekli ölçü durumu-örneğin elektrik öz direnç tomografi-EÖT) veriye uygun değerlendirme yöntemi seçilir (Şekil 1, siyah oklar). İkinci evre modelleme çalışması ise arazi ölçümlerinden kavramsal modelin bileşenlerinin kestirilmesi için gerçekleştirilir (ters çözüm). Bu evrenin başarısı kavramsal modelle karşılaştırma ve “Tasarım” aşamasında (Şekil 3) ortaya çıkan kısıtlılıklar çerçevesinde değerlendirilir. Model kestirimleri (bulgular) gerçek jeoloji/yapı ile benzeştirilerek/ilişkilendirilerek sondaj yerine karar verilir. Tasarım aşamasındaki beklentilere (yapısal bilgilere) ulaşamaması durumunda “Tanım” aşamasına geri dönülür. Farklı bir yöntem veya yöntemler dizisi ile döngü tekrarlanır. Kuramsal model parametrelerinin yinelemeli olarak kestirimi ve kuramsal ile arazi verisi uyumsuzluğunun en küçüklenmesini içeren ters çözüm yöntemleri (Şekil 1, siyah oklar) hakkında literatürde oldukça fazla yayın bulunmaktadır (örn., Meju, 1994; 2009; Canitez, 2003; Zhdanov 2002; Menke, 2018) ve çalışmada bu konuya ayrıntılı değinilmeyecektir.

### Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar

Modelleme konusunda genellikle, i) boyut kavramının anlaşılması; ii) ölçüm ile yer/yapı arasındaki ilişkinin bilinmemesi; iii) değerlendirmede kullanılan farklı yazılımların (bilgisayar kodlarının/programların) aynı işlevde olduğunun varsayılması (son kullanıcı hataları); iv) yöntem ve dolayısıyla elde edilecek veri kısıtlarının alan bağımlı olduğunun anlaşılması gibi nedenlerle hatalar yapılmaktadır.

### Boyutluluk

Modelleme aşamasında kullanılan boyut basitleştirilmiş jeolojiyi tanımlamaktadır. Tektonizma etkisinde kalmamış ve görece yatay konumda tortul birimlerden oluşan jeolojik yapılar jeofizik çalışmalarda bir boyutlu (1B) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5a). Burada istifteki her bir birimin kendi içinde tek düze (homojen) ve yön bağımsız (izotrop) yapıda olduğu varsayıldığından, sayısal modellerde istifteki bir birim veya birimler topluluğu tabaka olarak tanımlanır ve kalınlığı ile fiziksel özelliği (öz direnci, sismik hızı, yoğunluğu vb.) modelde sabit kabul edilir. Jeolojik yapı her yerde aynı olduğu için tek bir ölçüm noktasında toplanan jeofizik veri (DES, MT, sismik, gravite, manyetik vb.) ortamı tanımlamaya yeterli olduğu varsayılır.

Tektonizmaya maruz kalmış ve birbirinden açılacak olarak ayrılmış birimlerden oluşan jeolojik yapılar ise jeofizik çalışmalarda iki boyutlu (2B) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5b). Kartezyen koordinatlarda ifade edildiğinde, yapısal görüntünün y eksenini boyunca araştırma derinliği eşdeğeri yatay uzaklığa kadar değişmediği varsayılır. 1B varsayımının aksine x yönünde yapısal süreklilik olmadığından sayısal modellerde istifteki bir birim veya birimler topluluğu y eksenini boyunca sonsuza uzanan hücreler ile tanımlanır. 2B durumunda her bir hücrenin en, boy ve fiziksel özelliği (öz direnci, sismik hızı, yoğunluğu vb.) sabit kabul edilmektedir. x eksenini boyunca alınacak bir dizi ölçüm ile yer yapısı bilgisine ulaşılabilir. Bu tür ortamlarda arazi parametreleri önem kazanır. Hatalı seçilen arazi parametreleri 2B modelleme kullanılsa bile 1B benzeri sonuç üretir.

Üç boyutlu (3B) yapılar ise, farklı yönlerde tektonizma etkisinde kalmış, sokulumlar ile litolojisi değişmiş birimlerden oluşan jeolojik yapılara karşılık gelmektedir (Şekil 5c). 3B durumunda sayısal modellerde istifteki bir birim veya birimler topluluğu sonlu boyutta hücreler ile tanımlanır. Her bir 3B hücrenin eni, boyu,

derinliği ve fiziksel özelliği (özdirenci, sismik hızı, yoğunluğu vb.) sabit kabul edilir. Fiziksel parametrelerin farklılığının (kontrast) ölçülen veriye tam olarak yansıtılabilmesi için ölçümlerde örnekleme aralığı sık aralıklı ve dağılmış olarak toplanmalıdır. Hatalı seçilen arazi parametreleri toplanan verilerin değerlendirilmesinde 3B modelleme kullanılsa bile elde edilen yer modeli birçok yapısal ayrıntıyı içermeyecektir. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 4'te sunulan bir jeotermal alanın kavramsal modeli ele alındığında, sayısal modelin 1B olamayacağı, 2B yaklaşımının ise sınırlı olarak geçerli olabileceği kolaylıkla belirlenebilir.

Uzamsal boyut kavramına ek olarak zaman bağımlı model değişimleri çalışmalara konu olmaktadır. Yani, bir istasyondaki jeofizik ölçümün farklı zaman aralıkları ile tekrarında farklı değerler elde edilebilir ve bütün değişimler dört boyutlu (4B) olarak tanımlanıp, modellenenilmektedir (örn., Dimech vd., 2022). Kıyı akiferlerine deniz suyu girişi, atık alanından kaynaklı sızıntının yer içindeki dağılımı gibi çevre kirliliği araştırılmalarında ve heyelan, deprem gibi dinamik kuvvetler altındaki yapı/zemin davranışlarının araştırılmasında ve hidrokarbon üretim sahalarında

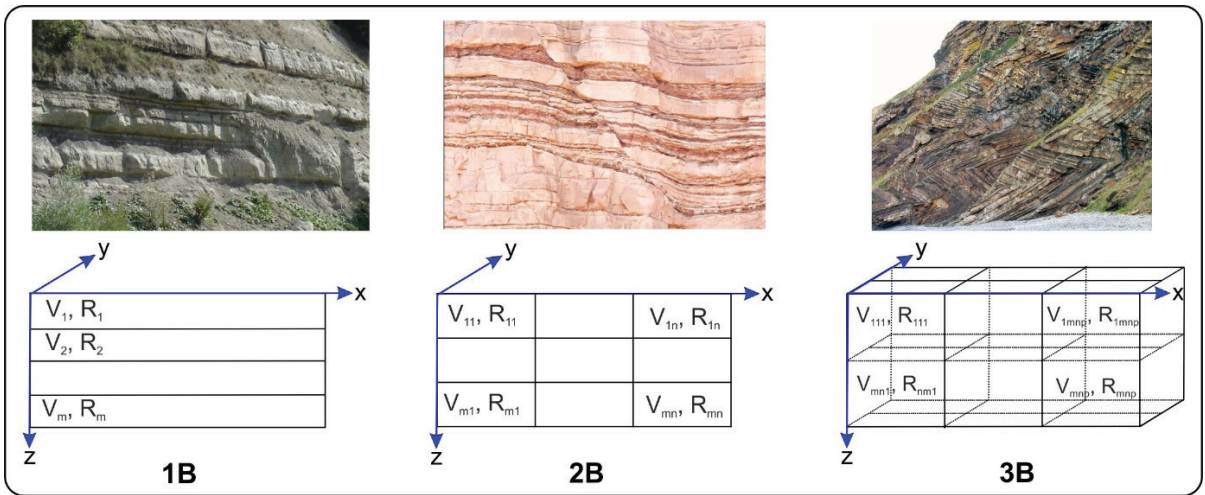
yapılan üretim izleme çalışmalarında zaman 4. değişken olarak modellerde dikkate alınmaktadır (örn., Wilkinson vd., 2016).

### Ölçüm ile yer yapısı arası ilişki

Ölçümlerden elde edilen veriler kavramsal model boyutundan bağımsızdır. Tek istasyonda ölçülmüş bile olsa verilerin her zaman karmaşık 3B yapılardan etkilendiği ve tüm jeolojik yapılara ait bilgiyi de içerdiği unutulmamalıdır. Bu nedenle modelin boyutu ölçüm istasyonu sayısına göre değil, kavramsal modele göre seçilmelidir, kavramsal modele bağlı olarak ölçüm sayısı ve ölçüm istasyonu konumları belirlenmelidir. Çalışmaların ekonomik boyutu nedeniyle ölçüm sayısının azaltılması uzak durulması gereken bir yaklaşımdır.

### Programların aynı işlevde olduğunun varsayılması

Ölçüm sayısına veya ölçüm istasyonu dağılımına göre program seçimi, uygulamada karşılaşılan yaygın diğer bir hatadır. 2B jeolojik yapı varsayılarak yapılan ölçümlerin 1B model varsayımı ile değerlendirilmesine örnek Şekil 6'da sunulmuştur.



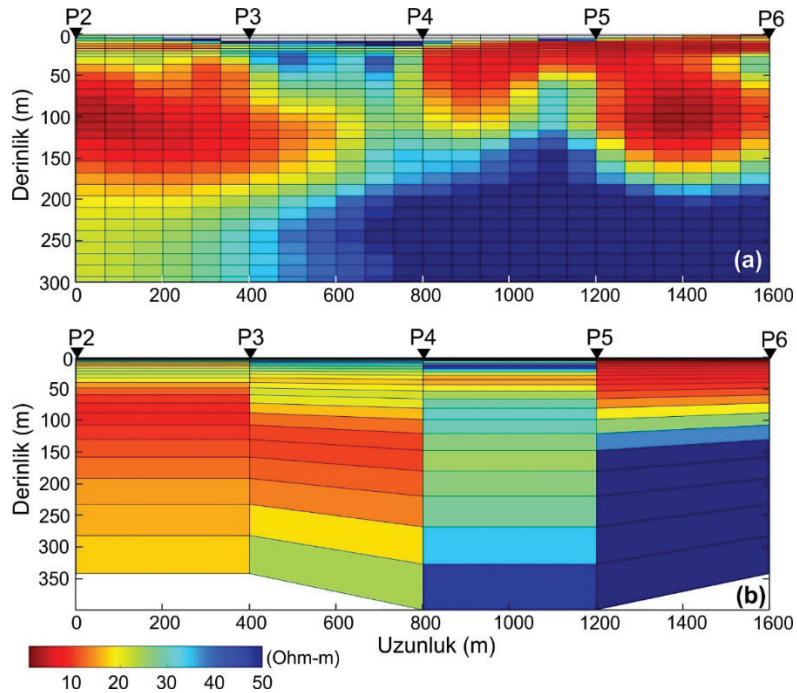
Şekil 5. Jeolojik yapı ve boyut ilişkisi (URL1, 2 ve 3).

Figure 5. Geological structure and dimension relationship (URL1, 2 and 3).

Bu örnekte yeraltı suyu aranması amacıyla DAÖ yöntemiyle ölçümler yapılmıştır (ayrıntılar için Ertekin ve Ulugergerli, 2023). Kavramsal modele uygun olarak seçilen beş istasyonda toplanan veriler 2B modelleme (Şekil 6a) ve 1B modelleme (Şekil 6b) varsayımları ile değerlendirilmiş ve görünür öz dirence bağlı yer elektrik kesitleri elde edilmiştir (Şekil 1, siyah oklar). Buna göre, 1B yapı yaklaşımı her istasyon arasında yalancı faylar (süreksizlikler) oluşmasına neden olmuştur (Şekil 6b). Uygulamada yaygın olarak kullanılan 1B sayısal modelleme yapan programların tamamında bu kuramsal sorun görülmekte ve oluşan yalancı faylar yorumlanabilir yapılar gibi algılanıp değerlendirilmektedir. Burada hatalı boyut tanımı, sayısal modelleme yapan bazı ticari ve açık kaynak kodlu programların, uygulamacılar tarafından yanlış kullanımında da sorun olmaktadır.

### Yöntemlerin kısıtlarının anlaşılabilmesi

Önceki bölümlerde değinildiği gibi arama yöntemlerinin uygulanmasında yöntemlerin doğası gereği karşılaşılan kuramsal kısıtlıkların (çözünürlük, araştırma derinliği vb.) yanı sıra arazide kullanılan ölçüm parametrelerine ve jeolojik birimlerin veya bu birimleri temsil edebilecek fiziksel değişimlerin dağılımlarına bağlı olarak ek kısıtlamalar ortaya çıkabilmektedir. Bu iki kısıt birbirine karıştırılmakta ve hatalı uygulamalar sonucu elde edilen sonuçlar yöntemin zayıflığı veya eksikliği olarak yorumlanmaktadır. Unutulmaması gereken, bu sorunlar arazi koşullarına göre değişiklik gösterebilir ve ancak kavramsal modele bağlı yapılacak hem ölçüm tasarımı (ölçüm noktası aralığı ile dağılımı, kayıt frekans veya zamanlarının belirlenmesi vb.) hem de modelleme türünün seçimi ile en aza indirilebilir.



Şekil 6. a) 2B modelleme ve b) 1B modelleme varsayımları ile düşey elektrik sondaj- DES verilerinden kestirilen yer elektrik kesitleri (Pi: ölçü istasyonu numarası,  $i=2-6$ , Ertekin ve Ulugergerli, 2023).

**Figure 6.** Electrical cross sections estimated from vertical electrical sounding-VES data based on the a) 2D and b) 1D modeling assumptions (Pi: station numbers,  $i=2-6$ , Ertekin ve Ulugergerli, 2023).



## UYGULAMA ÖRNEĞİ; ÇANAKKALE DÜZENSİZ KATI ATIK ALANI ÇEVRE KİRLİLİĞİ ARAŞTIRMASI

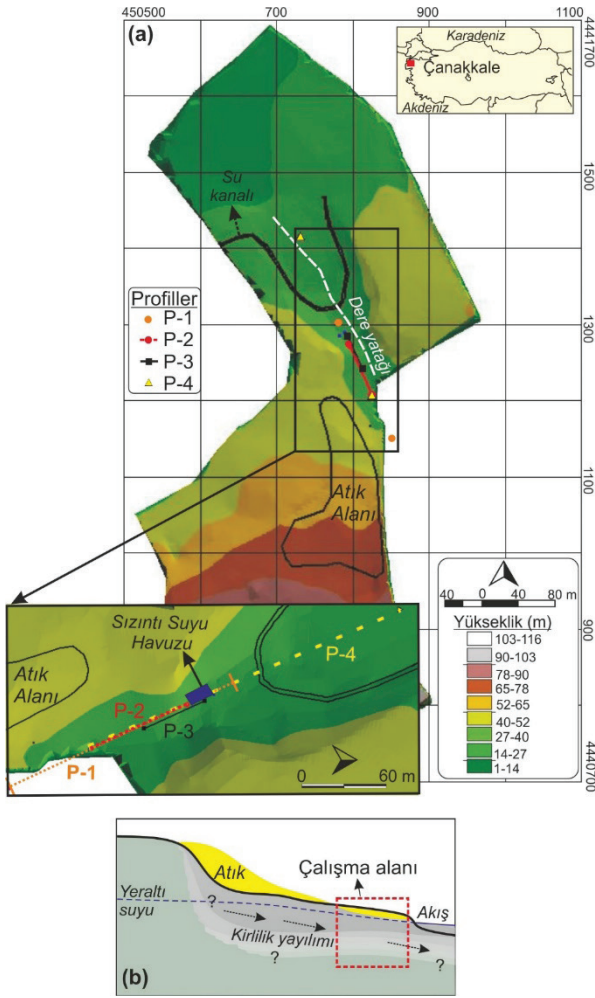
Jeofizik arama yöntemleri ve sayısal modelleme çalışmalarının birlikte kullanımı dünyada oldukça yaygındır, ancak özellikle çevre kirliliği araştırmaları kapsamında ülkemizdeki uygulamaları sınırlı sayıdadır (Barker, 1990; McNeill, 1990; Zheng ve Bennett, 1995; Ogilvy vd., 2009; Karlık ve Kaya, 2001; Olofsson vd., 2006; Witter ve Phillips, 2012; Uyanık, 2019; Oyeyemi vd., 2021; Boonsakul vd., 2022). Bu örnek çalışmada Çanakkale eski düzensiz katı atık alanında 4 araştırma doğrultusu (profili) üzerinde gerçekleştirilen öz direnç tomografi uygulamaları özetlenecektir. Örnek çalışma, önceki bölümlerde vurgulanan kavramlar dikkate alınarak ve Şekil 3'te sunulan basitleştirilmiş genel araştırma döngüsü izlenerek; i) Tanım ve Seçim, ii) Tasarım ve Uygulama ile iii) Yorumlama alt başlıkları ile analiz edilecektir.

### Tanım ve Seçim

İnceleme alanı (Çanakkale Kuruçeşme Atık alanı), şehir havaalanının yaklaşık 1,5 km güneyinde, Fıstıklı vadisi içinde yer almaktadır (Şekil 7a). Atık alanı 1989-2009 yılları arasında vahşi depolama yapılarak kullanılmış olup, yüzey alanı 61.000 m<sup>2</sup>, alandaki toplam atık miktarı ise ~850.000 m<sup>3</sup>'tür (Seyfert, 2009). Bölgede stratigrafik olarak alttan üste doğru Çanakkale Formasyonu, Kuvaterner yaşlı alüvyal seki ve alüvyon sıralanırken, az pekleşmiş tortullardan meydana gelen Çanakkale formasyonu Üst Miyosen-Pliyosen yaşlıdır (Aktimur vd., 1993; Deniz, 2005). Düzensiz katı atık alanı bu Neojen yaşlı geçirgen (~10<sup>-4</sup>-10<sup>-5</sup> cm/s) tortullar üzerinde yer almaktadır ve bölgede temelde kumtaşı seviyeleri olmak üzere, siltli ve killi seviyeler de gözlenmektedir (Şengül, 2004;

Deniz, 2005; Kaya vd., 2007). Çalışma alanının ana akiferini oluşturan alüvyon birim, taneli ve serbest akifer niteliğindedir ve akiferden tarımsal sulama amaçlı yararlanılmıştır (Şengül, 2004; Aksakal, 2008). Yeraltı su seviyesi mevsimsel olarak değişmekle birlikte oldukça sığdır (~2 m, Şengül, 2004; Kaya vd., 2007).

Düzensiz atık alanlarından kaynaklı kirlilik, depo gazlarının sıkışması, yanması ve atmosfere doğrudan yayılması ile koku ve görüntü kirliliği gibi farklı başlıklar altında değerlendirilmektedir (örn., Şengül, 2004). Ancak rezidans (ikamet) süresi ve çevresel etkileri dikkate alındığında, atık kaynaklı kirliliğin en önemli unsurlarından birisi sızıntı suyudur. Yüzey ve meteorik suların da etkisiyle, atıklardaki çözünebilir ve çözünemeyen bileşikler, atıkta gelişen kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sonucu oluşan kirleticiler ile birlikte sızıntı suyu olarak taşınır (örn., Özkıdık, 1995; Öztürk vd., 2009). Özellikle sığ derinliklerde öz direnç zıtlıkları ile -çözünmüş iyon derişimine bağlı olarak- tanımlanabilen çöplük sızıntı suyunun, jeolojik birimler ve yeraltı suyu ile etkileşimi ve dolayısıyla sızıntı suyu kaynaklı kirlilik bulutunun mekânsal ve zamansal dağılımı jeofizik araştırmanın odağını oluşturur (genelleştirilmiş kuramsal model Şekil 7b). Diğer bir ifadeyle, kavramsal model ile basitleştirilerek sunulduğu gibi, bu uygulama izleyen kuramsal değerlendirmelere dayanmaktadır; **1**) sığ derinliklerde vadinin boyuna kesiti boyunca elektriksel olarak yanıl değişim sunan (2B) karmaşık yapı beklentisi; **2**) zamana bağlı akışkan örüntüsünü tanımlamak için yanıl geçirgenliği yüksek olan tortulardan oluşan bir ortam. Burada vadi yapısının her iki tarafı geçirimsiz birimler içerdiğinden ve uzun süreli kullanım nedeniyle tortul birimlerin kirleticiye doyumluğu nedeniyle 3B değişim öngörülemediği.



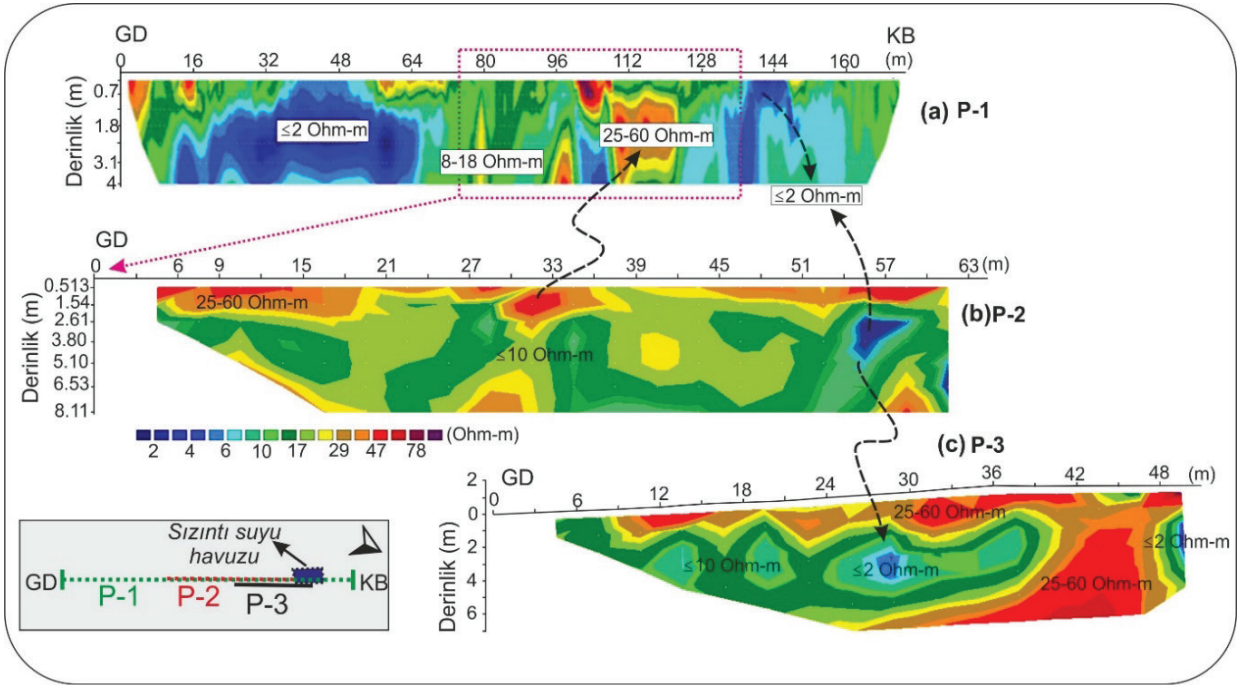
**Şekil 7. a)** Çanakkale eski düzensiz katı atık alanı ve çevresinin sayısal yükseklik modeli ve jeofizik ölçü profilleri (Aksakal, 2008'den değiştirilerek). P-1 P-2 ve P-4 ölçüleri sırasıyla 2004, 2008 ve 2009 yıllarında, aynı profil doğrultusunda (ölçümler birbirleri ile çakışacak biçimde), P-1'den P-4'e artan derinlik çözünürlüğü ile elde edilmiştir. **b)** Çalışma alanının kavramsal modeli (Şengül, 2004'ten değiştirilerek).

**Figure 7. a)** Digital elevation model of the Çanakkale old open waste disposal site and its surroundings and geophysical survey lines (modified from Aksakal, 2008). P-1, P-2 and P-4 were obtained in 2004, 2008 and 2009, respectively, in the same profile direction (overlapping measurements), with increasing depth resolution from P-1 to P-4. **b)** Conceptual model of the study area (modified from Şengül, 2004).

## Tasarım ve Uygulama

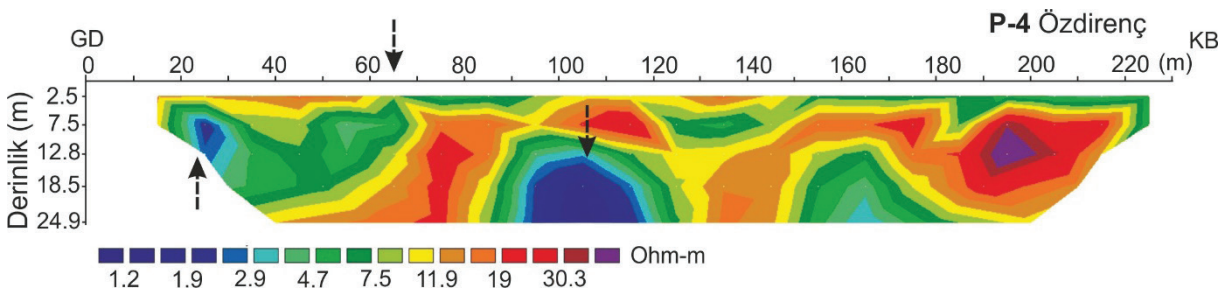
Özdirenç verileri hedeflenen en küçük yapısal değişim ve fiziksel özellikler (elektriksel iletkenlik değişimi) dikkate alınarak, farklı derinlik seviyelerine duyarlı örnekleme aralıkları 1, 3 m ve 10 m olacak şekilde tomografi tekniği ile ölçülmüştür. Jeofizik çalışmalar sırasında atık alanın kullanıma açık olması ve bölgede yürütülen iyileştirme (rehabilitasyon) çalışmaları, ölçü profillerinin seçimi ile sistematik uzamsal-zamansal örnekleme gibi süreçleri zorlaştırmıştır. Buna göre bölgede Şekil 7a ve Şekil 8a'da sunulan P-1 araştırma profili üzerinde (1 m örnekleme aralığı ile 10 derinlik seviyesi için 2004 yılı ölçüsü, Şengül, 2004; Kaya vd., 2007) aynı KB-GD doğrultulu, 3 metre örnekleme aralığı ile P-2 profili öz direnç ölçüsü alınmıştır (Aksakal, 2008). Şekil 8b'de sunulan P-2'ye paralel ve bu profilin ~1,5 metre doğusunda bulunan P-3'te ise 3 m elektrot aralıkları ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 8c, Aksakal, 2008). P-4 profilinde (Şekil 9), diğer ölçü profillerine paralel olacak biçimde, alandaki kirliliğinin göreceli olarak bölgesel yayılımı hakkında bilgi edinmek için 10 metre örnekleme aralığı ile öz direnç ölçüsü kaydedilmiştir (Beşkardeş, 2009). Tüm ölçü profilleri eğime bağlı olarak yeraltı suyu akış yönündedir (Şekil 7). Ölçüler RES2DINV programında (Loke, 2004) değerlendirilmiştir (Şekil 1, siyah oklar). Bu programda yer elektrik iletkenlik değişimleri yinelemeli Gauss Newton yöntemi ile kestirilmiştir ( $RMS \leq \% \sim 10$ ) ve Şekil 8 ve 9'da 2B kesitler olarak sunulmuştur.

Sayısal kirlilik iletim modelinde, doymuş ortam dengeli hal kabulü ile toplam kirletici taşınımı kısmı türev denklemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Beşkardeş, 2009). Modelleme aşamasında toplam kirletici taşınımının, hem adveksiyon (sadece yeraltı suyu ile kütle taşınımı) hem de dispersiyon ile gerçekleştiği, taşınan kirleticinin kimyasal tepkimeye girmediği ve sönümlenmediği varsayılmıştır. Buna göre düzenli bir yeraltı suyu akışı için kartezyen koordinatlarda x-yönündeki 3-boyutlu kirlilik iletim eşitliği (Istok, 1989),



**Şekil 8.** 2B yer elektrik kesitleri, **a)** P-1 2, **b)** P-2 ve **c)** P3 (küçük şekil profil konumlarını gösterir). Siyah oklar atık alanı kaynaklı kirlenmiş bölgeleri gösterir (ayrıntı için metne bakınız). 2004 (P-1) ve 2008 (P-2 ve P-3) yılı elektrik öz direnç tomografi ölçüleri sırasıyla 1m ve 3 m örnekleme aralıkları ile, Wenner-Schlumberger (Şengül, 2004, Kaya vd., 2007) ve dipol-dipol (Aksakal, 2008) elektrot dizgeleri kullanılarak elde edilmiştir.

**Figure 8.** 2D electrical resistivity cross sections, **a)** P-1, **b)** P-2 and **c)** P3 (inset figure shows the profile locations). Black arrows indicate contaminated areas from landfill (see text for details). 2004 (P-1) and 2008 (P-2 and P-3) electrical resistivity tomography measurements were obtained by using Wenner-Schlumberger (Şengül, 2004, Kaya et al., 2007) and dipole-dipole (Aksakal, 2008) electrode arrays with 1 m and 3 m sampling intervals, respectively.



**Şekil 9.** P-4 (2009) ölçü profili, yer elektrik kesiti. Wenner-Schlumberger ölçü dizgesi ve 10 m elektrot aralığı kullanılmıştır (Beşkardeş, 2009).

**Figure 9.** Profile P-4 (2009), electrical resistivity cross section. Wenner-Schlumberger array and 10 m electrode spacing were used (Beşkardeş, 2009).

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\theta C) + D_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\theta C) + D_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\theta C) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_b K_d C) - \lambda(\theta C + \rho_b K_d C) \quad (1)$$

dir. Burada,  $\theta$ : gözeneklilik, C: kirletici madde yoğunluğu (mg/l),  $v_x$ : x yönündeki görünür yeraltı suyu hızı (m/gün),  $\rho_b$ : Bulk yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),  $\lambda$ : denge dağılım katsayısı,  $K_d$ : kirletici kaynağın sönümlenme sabiti, sırasıyla x, y, z yönlerindeki saçılım katsayısıdır (m<sup>2</sup>/gün). Çalışmada,  $\theta = 0$  olarak alınmakta ve iki boyutlu çalışıldığından kabul edilmektedir. Dengeli rejim yeraltı suyu akışı için kirlilik iletim eşitliğinin düzey ifadesi sonlu elemanlar tekniği ile çözülmüştür (Istok, 1989);

$$([A] + \Delta t[D])\{C\}_{t+\Delta t} = [A]\{C\}_t + \Delta t\{K\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

A: global soğrulma düzeyi, D: global yeraltı suyu ile taşınım (adveksiyon- dispersiyon) düzeyi, K: belirlenmiş kirlilik bileşenleri düzeyi, C: kirlilik yoğunluğu, t: zaman, zaman aralığıdır. Model parametreleri için P-4 ölçüsünden elde edilen gerçek özdirenç değerleri kullanılarak (Şekil 9) Archie bağıntısı yardımı ile bölgeye ilişkin gözeneklilik hesaplanmıştır (Archie 1942),  $F$ : formasyon faktörü,  $R_o$ : kayalık özdirenç,  $R_w$ : formasyon suyu özdirençidir. Kirlilik iletim modelleme çalışmasında, bölgenin jeolojisi göz önüne alınarak gevşek zeminler için formasyon faktörü;  $F=0,81$ / temel alınmıştır. Ortam hem düşey hem de yatay yönde geçirimsiz kabul edilmiştir. Alüvyon birimlerin eğimin etkisi göz önüne alınarak yatay yönde daha fazla geçirimsiz olduğu varsayılmıştır (yani çözümde su akış yönü dikkate alınmıştır). Geçirimsizlik ve yoğunluk değerleri, alüvyon ve kil için literatürde önerilen değerlerdir (Istok, 1989). Buna göre alüvyon için yatay yönde geçirimsizlik 0,035 m/gün, düşey yönde 0,001 m/gün alınmıştır. Kil için ise her iki yönde 10<sup>-5</sup> m/gün başlangıç değeri tanımlanmıştır. Alüvyon birimler için bulk yoğunluğu 1,5 g/cm<sup>3</sup>, killi birimler için ise 1,2 g/cm<sup>3</sup> kabul edilmiştir. Literatürde önerilen

abaklar yardımıyla enine saçılım katsayısı (0,03 m, Gelhar vd., 1992) ve boyuna saçılım katsayısı (8,26 m, Xu ve Eckstein, 1995) değerleri çalışma alanının boyuna bağlı olarak elde edilmiştir. Yapılan 2B kirlilik iletim modellemesinde kaynak, sonlu elemanlar ağında derinliği ve genişliği olan bir alan olarak belirlenmiştir (Şekil 10a). Yani kirletici kaynak, atık alanından süzülmuş ve ölçüm alanına yanal yönde giriş yapan kirletici madde yoğunluğu oldukça yüksek olan sızıntı suyu olarak tanımlanmaktadır. Modelde kaynağın başlangıç yoğunluğu 900 mg/l olarak öngörülmüştür ve bu kirliliğin kaynaktan taşınımı için geçen süre hesaplanarak Şekil 10'da sunulmuştur. P-4 profili (Şekil 9) ile ilişkilendirilerek oluşturulan sayısal model sonucu basitleştirilmiş kavramsal modelle uyumludur ve göreceli lokal değişimlere de duyarlıdır (Şekil 8).

## Yorumlama

Çanakkale düzensiz katı atık alanından kaynaklı kirliliğin 2004-2008-2009 yıllarındaki değişimini incelemek için yapılan jeofizik araştırmanın sonuçlarına göre Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulan 2B kesitlerde, sızıntı suyundan kaynaklanan kirletici madde yoğunlaşmasına bağlı olarak düşük özdirenç ( $\leq 10$  Ohm-m) değerleri elde edilmiştir. P-1 (2004 yılı) 2B yer elektrik kesitinin (Şekil 8a) atık alanına en yakın GD bölgesinde, atıktan sızan kirleticilerin yer içine girişimi  $\leq 2$  Ohm-m gibi oldukça düşük özdirenç değerleri ile tanımlanmıştır. Aynı kesitin GD'sindeki düşük değerlikli ( $\leq 2$  Ohm-m) değişimler, alanın o bölgesinde yer alan sızıntı suyu toplama havuzundan (Şekil 11a) kaynaklanan ve ölçü sırasında yüzeyden gözlenmeyen kirliliğe işaret etmektedir. Bu kirlilik yayılımını izleyen 4 yıl boyunca devam etmiş, P-2, P-3 ve P-4 profillerinde (2008 ve 2009 yıllarında) yapılan ölçülerde de sızıntı suyu toplama havuzu

etrafında kirlilik etkileri olarak gözlenmiştir (örn., KB yönündeki  $\leq 2$  Ohm-m değerlikli doymun bölgeler, Şekil 8b ve 8c). Ayrıca özellikle Şekil 8a ve 8b profillerinde plastik içerikli tıbbi atık çukuruyla ilişkili olarak (Şekil 11b) ~25-60 Ohm-m değerlikli (okla gösterilen) yüksek özdirençli bölgeler görüntülenmiştir.

P-4 profili yer elektrik kesitinde özdirenç farklılığı gösteren yanal geçişler özellikle yer içinde kirliliğin atıktan uzağa taşınmasını tanımlamak bakımından önemlidir (okla işaret edilen bölgeler, Şekil 9). Bu kesitte sarı ve kahverengi bölgelerin (11,4-18,5 Ohm-m) kirlilik yayılımına olanak veren alüvyon birimler, yeşilin tonlarıyla ifade edilen (4,3-6,9 Ohm-m) bölgelerin ise sızıntı suyu ile karışmış yeraltı suyuna doymun killi birimler olabileceği yorumlanmıştır (Beşkardeş, 2009). Yatay eksende 60-70 metre arasındaki yanal özdirenç değişiminin diğer profillerle de uyumlu olduğu (Şekil 8), atık alanına yakın sızıntı suyuna doymun bölgeleri işaret ettiği değerlendirilmektedir. 90-120 metreler arasındaki ölçüler, sızıntı suyunun yüzey suyuyla taşındığı bölgeye karşılık geldiğinden oldukça düşük özdirenç değerleri P-4 ölçü profilinde gözlenmektedir (Şekil 9). P-4 ölçüm sonuçları doğrultusunda sonlu elemanlar tekniği ile üretilen 2B sayısal birleşik kirlilik iletim modelinde kirlilik yoğunlaşma değerleri 500 gün (1,3 yıl) aralıklarla toplam 5000 gün (atık alanının en yoğun olarak kullanıldığı 13,6 yıl için) için hesaplanmıştır. Kirlilik yayılımı eş-kirlilik kesitleri oluşturularak Şekil 10'da sunulmuştur. Sayısal model bölgenin yeraltı jeolojisine, atığın özelliklerine (atığın içeriği, yaşı, kullanım süresi gibi) ve çevresel etkilere bağlı olarak (meteorik sularla etkileşim gibi), kirletici bir kaynaktan (atıktaki çürüme, kimyasal reaksiyonlar ve çevresel etkilerle oluşan çözünmüş kirleticilerin yoğun olarak bulunduğu sıvı, Şekil 11a) yer içine yayılan kirlilik bulutunu göstermektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, uzaklık ve derinlik değişimleri dikkate alındığında, alanda yapılacak geniş ölçekli çalışmalar için kullanılabilir bir

tasarım modeli olarak oldukça işlevseldir. Diğer bir ifade ile sayısal model, kirliliğin uzamsal değişimini araştırılmasında yerel değişimler için kısa (~40 m) bölgesel değişimler için ise uzun (~250 m) ölçü profilleri seçilmesi gerektiğini ve ayrıca araştırma derinliğinin (0-25 m) öngörülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

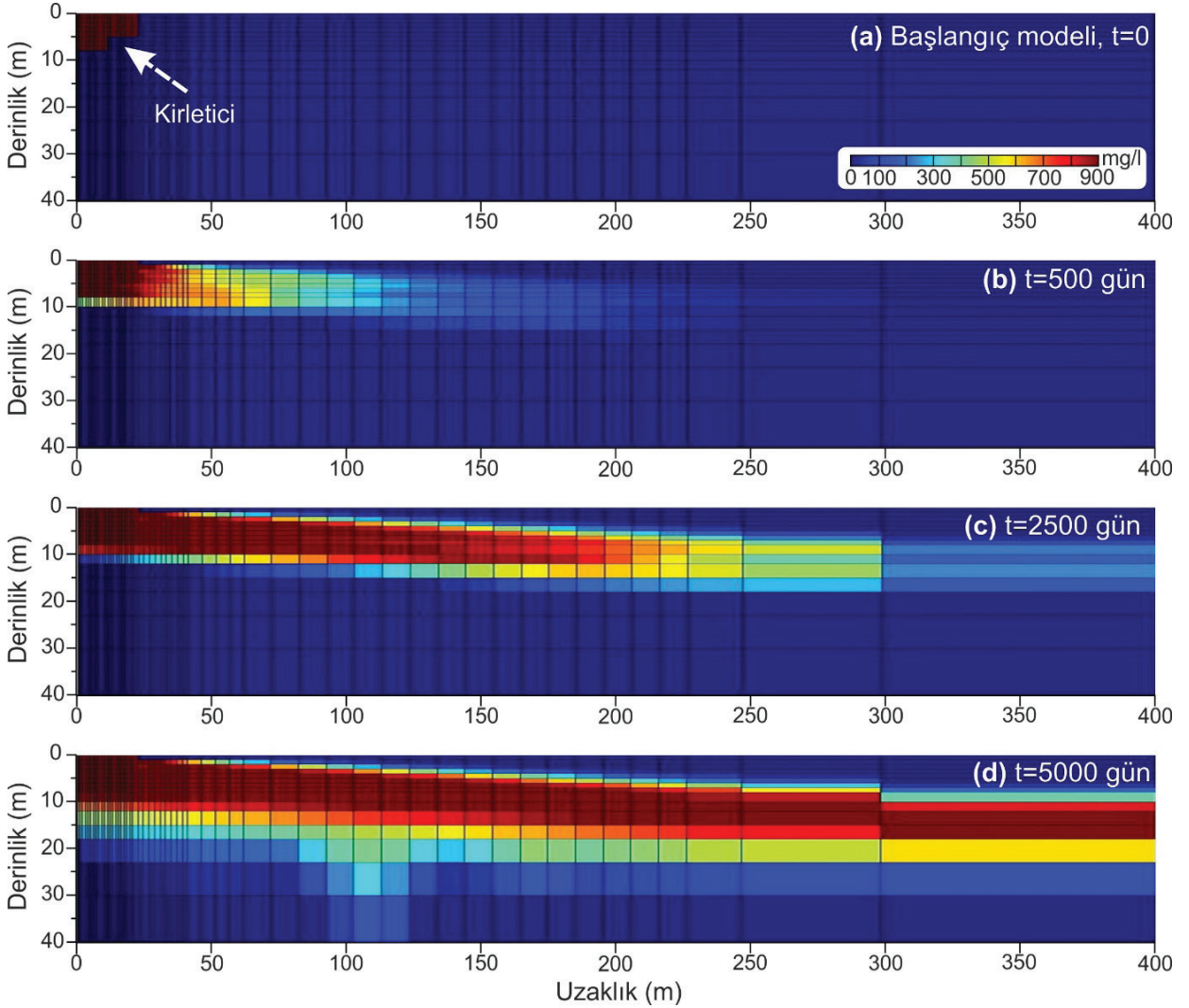
## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Çanakkale kenti eski düzensiz katı atık alanında gerçekleştirilen jeofizik uygulama ve sayısal model sonuçları atık alanından kaynaklı kirliliğin yer içindeki uzamsal ve zamansal etkilerini göstermektedir. Buna göre yer elektrik kesitlerindeki düşük özdirençli bölgelerle ilişkili olarak, ölçümlerin yapıldığı 2004-2008-2009 yılları süresince sızıntı suyu kaynaklı kirliliğin devam ettiği gözlenmiştir (Şekil 8 ve 9). Ayrıca 2003 yıllarında depolanan plastik içerikli atıkların (Şekil 11b), aradan geçen 6 yıl sonra bile doğada korunduğu ve yer elektrik kesitlerinde yüksek özdirençli belirti grubu olarak görüntülenen çevre kirliliğine neden olduğu belirlenmiştir. Kirliliğin etkilerinin, atıktan yayılan kirleticinin yeraltı jeolojisi ile zaman içinde etkileşimini de dikkate alan birleşik kirlilik iletim modelleri (Şekil 10) ile analiz edilebileceği, bu çalışmanın bir diğer önemli bulgusudur. Bölgede yapılacak olası kirlilik çalışmalarında sayısal model sonuçları, araştırma profillerinin öngörülen uzunluk (~40-25 m) ve derinliğini (~0-25 m) tanımlaması bakımından kavramsal bir model olarak da değerlendirilebilir.

Elde edilen bulgular ve yapılan değerlendirmeler, atıkların doğal ortama gelişini güzel bırakılması ile oluşturulan düzensiz katı atık alanlarının- rehabilitasyon çalışmaları sonrası bile- çevreye olan olumsuz etkilerine dikkat çekmesi açısından oldukça önemlidir. Ayrıca burada bir örneği sunulan sayısal modelin, özellikle eski deponilerdeki potansiyel kirliliğin belirlenmesi, kirlilik iyileştirme sistemlerinin tasarımı, en etkili deşarj kuyu yer seçimi ve

pompaj oranlarının belirlenmesi gibi amaçlar için kullanılması önerilebilir. Dahası, bir atık depolama alanı tasarımında jeofizik ölçülerle desteklenecek sayısal model kullanımının, daha sonra oluşabilecek çevre kirliliğinin önlenmesi için oldukça etkili olduğu söylenebilir. Böylelikle

kirlilik bulutunun gelecekteki ve/veya güncel durumunun kestirimi yapılabilir ve sürdürülebilir çevre yönetimi için kirlenici taşınımının belirlenmesi amacı ile geliştirilecek sayısal modeller karar vericiler olarak kullanılabilir.



**Şekil 10.** Sayısal model, 2B eş-kirlilik kesitleri, **a)** başlangıç koşulu,  $t=0$ , **b)**  $t=500$  gün, **c)**  $t=2500$  gün, **d)**  $t=5000$  gün (Beşkardeş, 2009'dan değiştirilerek).

**Figure 10.** Numerical model, 2D iso-contamination sections, **a)** initial condition,  $t=0$ , **b)**  $t=500$  days, **c)**  $t=2500$  days, **d)**  $t=5000$  days (modified from Beşkardeş, 2009).



**Şekil 11.** Araştırma alanı. **a)** P-1 elektrik öz direnç ölçü profili, vahşi (dere yatağı) ve kontrollü (havuz) sızıntı suyu toplanma alanları (fotoğrafların çekildiği yıl 2004) ve **b)** plastik içerikli hastane atık alanı (fotoğrafın çekildiği yıl 2003, bakış yönü KB'den GD'ye doğrudur, Şengül, 2004).

**Figure 11.** Survey area. **a)** P-1 electrical resistivity measurement profile, wild (stream bed) and controlled (pool) leachate gathering areas (in 2004), and **b)** hospital waste site containing plastic content (in 2003, viewed from NW to SE, Şengül, 2004).

Sonuç olarak, yer bilimleri problemlerinin çözümünde, özellikle disiplinler arası ortak çalışmalarda, katılımcılar bilinçli veya bilinçsiz olarak modelleri Box (1976)'ın başa bela mottosu ile sorgulamaktadırlar. Oysaki "Bütün modeller yanlıştır, bazıları faydalıdır" ifadesi bir modelin yararlılığının, temsilin doğruluğu ile ölçülmediğini, ancak hipotezlerin oluşturulması, test edilmesini ve iyileştirilmesindeki önemli rolünü vurgulamak içindir. Turing (1952) matematiksel bir modelin amacını açıklarken, modellemenin seçilen parametreler ve bağıntılar özelinde bir basitleştirme ve idealleştirme ve sonuç olarak bir yanlış yönlendirme süreci olacağını belirtmiştir. Dolayısıyla kullanılan yöntemin ve veri değerlendirme tekniklerini kısıtları bilindiği sürece, arazi parametrelerinin uygun seçimi ile kavramsal modeli destekleyen veya eksiklerini ortaya koyan bilgilerin elde edilmesi olasıdır. Ayrıca güncel bilgi birikimi çerçevesinde, araştırmaya konu olarak kullanılan parametrelerin ve yaklaşımların diğer ayrıntılara göre çok daha önemli olduğu düşüncesi, modellemenin gerekliliğini desteklemektedir.

Modellemenin iki ayrı evrede de kullanılması ve ölçüme kavramsal modele göre karar verilmesi hatalı bir işlem olarak algılanabilir. Ancak unutulmaması gerekir ki, tasarım aşamasında kullanılan kavramsal model, araştırılan alana ait tüm bilgileri içermeyecektir. Eğer böyle olsaydı elbette ki gerçek yeraltı modeli olarak ele alınacak ve araştırmaya gerek kalmayacaktı. Kavramsal model bölgeye ait yüzeyden gözlemlenmiş veya önceki çalışmalardan elde edilmiş bölgesel ölçekteki birimleri içeren çoğunlukla düşünsel bir tasarımdır. Bu genel bilgi arazide kullanılacak ölçüm parametrelerini belirlemek için yeterli olacaktır. İkinci evrede sayısal modeller ile ölçülen verilerden elde edilecek sonuç ise renklerden veya sayılardan ibaret görseldir. Yerel yapı/jeoloji ile olan ilişki kavramsal model yardımıyla sağlanabilir. Örneğin temel kayanın,

yüzeyde gözlenmiş bir fayın ve diğer bilinen yapıların kesitle ilişkilendirilmesinden sonra araştırmaya konu olan ayrıntılar tanımlanmaya başlanabilir. Özetle, modele bir sonuç olarak odaklanmak yerine, modelleme süreci ve nicel olarak elde edilmiş model tahminleri, karmaşık doğrusal olmayan süreçler hakkında "düşünme yolları" (örn., Apweiler vd., 2018) olarak değerlendirilmelidir.

### **EXTENDED SUMMARY**

*In this study of a site in Çanakkale province, the use of numerical modeling in Earth Sciences is reviewed in general and is exemplified by geophysics research targeting an environmental problem. In the study, the environmental pollution caused by the open waste disposal site, which was used effectively between 1989 and 2009, was investigated by using the direct current electrical resistivity method. The research steps, as given as the simplified general research cycle presented in Figure 3, are i) definition and selection, ii) design and implementation, and iii) interpretation.*

*In the first phase, as a result of the modeling work done with the conceptual model, 1) there is an expectation of a complex structure (2D) that presents an electrical lateral variation along the longitudinal section of the valley at shallow depths; and 2) a medium consisting of sediments with high lateral permeability is envisaged to describe the time-dependent fluid pattern.*

*In the design phase, studies with the conceptual model reveal that short (~40 m) and long (~250 m) profiles should be selected for local and regional changes, respectively, and also the depth of the research (0 -25m) should be predicted while investigating the spatial variation of pollution.*

*In the application of the numerical modeling phase, resistivity data were measured by the*



tomography technique with electrode spacings of 1 m, 3 m, and 10 m in order to investigate different depth levels, considering the smallest changes in the geologic structure and physical properties (electrical conductivity change). All gauge profiles are swaged in the groundwater flow direction, depending on the slope (Figure 7). Measures were evaluated in the RES2DINV program (Loke, 2004). The solute transport in the saturated porous geologic medium was modeled by using the finite element method.

For the model parameters, the porosity of the region was calculated with the help of Archie's equation (Archie, 1942) by using the recovered resistivity values obtained from the P-4 measure (Figure 9). The source is defined as leachate, with high pollutant condensation that has drained from the waste area and enters the measurement area laterally. Both the simulated solute concentrations and the subsurface electrical resistivity structure are compatible with the simplified conceptual model, and are sensitive to relative local changes. In addition, the results obtained are quite functional as a design model for future large-scale studies to be carried out in the field, considering the changes in distance and depth.

In the interpretation phase, according to the results of the geophysical research carried out to examine the change in the pollution originating from the old Çanakkale dumpsite between 2004-2008-2009, the 2D sections presented in Figure 8 and Figure 9 show low resistivity ( $\leq 10$  Ohm-m). This is due to the concentration of pollutants originating from the leachate. In the P-1 (2004) 2D ground electrical section (Figure 8a) of the SE area closest to the waste area, the penetration of pollutants leaking from the waste into the ground is defined by very low resistivity values, such as  $\leq 2$  Ohm-m. Low-value ( $\leq 2$  Ohm-m) changes in the SE of the same section indicate pollution originating from the leachate collection pool (Figure 11a) located in that part of the area and not observed

from the surface at the time of measurement. This pollution continued to spread for the following years, and pollution effects were observed around the leachate collection pool at the measurements made in the P-2, P-3 and P-4 profiles (in 2008 and 2009). In addition, high resistivity regions of  $\sim 25$ -60 Ohm-m (arrowed) are visualized in relation to the plastic-containing medical waste pit (Figure 11b), especially in Figure 8a and 8b profiles.

In conclusion, it can be suggested that the use of a numerical model together with geophysical measurements in environmental geophysical studies is highly effective in determining both ongoing environmental pollution and predicting potential pollution. Also, rather than focusing on the numerical model as an ultimate outcome, the modeling process and quantitatively-derived model estimations can be considered as ways of thinking about complex nonlinear processes (e. g., Apweiler et al., 2018).

## TEŞEKKÜR

Bu makale Türkiye Jeoloji Bülteni Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı için hazırlanmıştır. Özel sayıya davetleri için Editörler Erdiç YİĞİTBAŞ ve Oğuz GÖĞÜŞ'e, değerli eleştirileri ve katkılarından dolayı Coşkun SARI başta olmak üzere anonim hakeme, ölçüm aygıtlarını sağlayan ÇOMU MF Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne ve başta Jeofizik Mühendisi Sevgi AKSAKAL ve Didem BEŞKARDEŞ olmak üzere çalışmaya katkı sağlayan 2004-2009 öğretim yıllarındaki lisans öğrencilerimize teşekkür ederiz. Çalışmanın teknik altyapısını oluşturma aşamasında keyifli tartışmalar ile bizi aydınlatan merhum Cemal KAYA'ya teşekkürü borç biliriz

## ORCID

Ebru Şengül Uluocak  <https://orcid.org/0000-0002-6701-463X>

Emin Uğur Ulugergerli  <https://orcid.org/0000-0001-5639-1109>

## KAYNAKLAR / REFERENCES

- Aksakal, S. (2008). *Katı atık depolama sahalarından toprak ve yeraltı suyuna olan sızıntıların elektrik öz direnç ve yapay uçlaşma yöntemleri ile araştırılması* [Yayımlanmamış Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Bölümü.
- Aktimur, H. T., Uysal, Ş., Tamgaç, Ö.F., Aktimur, S., Sarıaslan, M. ve Emre, Ö. (1993). *Çanakkale İli'nin arazi kullanım potansiyeli raporu* (Rapor no: 159). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Apweiler, R., Beissbarth, T., Berthold, M., ... & Wolkenhauer, O. (2018). Whither systems medicine? *Experimental & Molecular Medicine*, 50, Article e453. <https://doi.org/10.1038/emmm.2017.290>
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146, 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Barker, R. D. (1990). Investigation of groundwater salinity by geophysical method. In S. H. Ward, (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, vol.2: Environmental and Groundwater*, (pp. 201-212). Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- Beşkardeş, G. D. (2009). Çanakkale katı atık depolama sahası için yeraltı suyu kirliliğinin modellenmesi. *Uluslararası Deprem Sempozyumu* (özet bildiri-poster, s. 89), 17-19 Ağustos, 2009, Kocaeli.
- Boonsakul, P., Buddhawong, S. & Wangyao, K. (2022). Optimization of multi-frequency electromagnetic surveying for investigating waste characteristics in an open dumpsite. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 72(11), 1290-1306.
- Box, G. (1976). Science and statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 71(356), 791-799.
- Camtez, N. (2003). *Jeofizikte modelleme*. Literatür Yayıncılık.
- Cumming, W. (2009). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. In: *Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Deniz, O. (2005). *Çanakkale yerleşim alanının yeraltı suyu kalitesinin incelenmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dimech, A., Cheng, L., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., ... & Isabelle, A. (2022). A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years: Perspectives for mining waste monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699-1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
- Ertekin, C. & Ulugergerli, E. U. (2022). Geoelectrical survey over perched aquifers in the northern part of Upper Sakarya River Basin, Türkiye. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(4), 335-352. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.04.003>
- Gelhar, L. W., Welty, C. & Rehfeldt, K. W. (1992) A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers. *Water Resource Research*, 28, 1955-1974. <https://doi.org/10.1029/92WR00607>
- Istok, J. (1989). *Groundwater Modelling By The Finite Element Method*. American Geophysical Union.
- Johnston, J.M., Pellerin, L. & Hohmann, G. W. (1992). Evaluation of Electromagnetic Methods for Geothermal Reservoir Detection. *Geothermal Resources Council Transactions*, 16, 241 – 245.
- Kaya, M. A., Özürlan, G. & Şengül, E. (2007). Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site in Çanakkale, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135, 441-446. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9662-x>
- Karlık, G. & Kaya, M. A. (2001). The investigation of soil and groundwater pollution using geophysical methods in Isparta landfill. *Environmental Geology*, 40, 725-731.
- Loke, M. H. (2004) *User's manual for RES2DINV software*. Geotomo Software.
- McNeill, J. D. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In S. H. Ward (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, (pp. 191-218), vol. 1. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- Meju, M. A. (1994). *Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and*

- practice*. In: S. N. Domenico (Ed.), Society of Exploration Geophysicists. Course Notes Series, No. 6.
- Meju, M. A. (2009). Regularized extremal bounds analysis (REBA): An approach to quantifying uncertainty in nonlinear geophysical inverse problems. *Geophysical Research Letters*, 36(3), Article L03304. <https://doi.org/10.1029/2008GL036407>
- Menke, W. (2018). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Academic press.
- Ogilvy, R. D., Meldrum, P. I., Kuras, O., Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., Sen, M., ... & Tsourlos, P. (2009). Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), 367-376.
- Olofsson, B., Jernberg, H. & Rosenqvist, H. (2006). Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling. *Environ Geol.*, 49, 720–732.
- Oyeyemi, K. D., Aizebeokhai, A. P., Metwaly, M., Oladunjoye, M. A., Bayo-Solarin, B. A., Sanuade, O. A., Thompson C. E., Ajayi, F. S. & Ekhaguere, O. A. (2021). Evaluating the groundwater potential of coastal aquifer using geoelectrical resistivity survey and porosity estimation: A case in Ota, SW Nigeria. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, Article 100488. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100488>
- Özkıdık, H. (1995) *Katı Atık Yönetiminde Belediyeler İçin Yöntem ve Maliyet Analizi*, [Uzmanlık Tezi]. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Öztürk, İ., Onay, T. T., Çallı, B., Mertoğlu, B. & Yıldız, Ş. (2009). *Sızıntı Suyu Yönetimi İhtisas Komisyonu Taslak Çalışma Raporu*. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Seyfert, A. (2009). *Katı atık sahası, Çanakkale – Kuruçeşme, Katı Atık Sahası Gaz Pompalama Çalışması*, SEF Energietechnik GmbH, Rapor, 26.
- Şengül, E. (2004). *Çanakkale düzensiz katı atık depolama sahası yüzey ve yeraltı sularına etkisinin uygulamalı jeofizik yöntemlerle araştırılması* [Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Turing A, (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 237(641), 37-72.
- URL1 (2023, 01 Temmuz). <https://www.geologieportal.ch/en/themes/fundamentals-of-geology/stratigraphy.html>
- URL2 (2023, 01 Temmuz). <https://cdn.britannica.com/91/172891-050-2093FD16/Fault-sandstone-strata.jpg>
- URL3 (2023, 01 Temmuz). [https://en.wikipedia.org/wiki/Chevron\\_%28geology%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Chevron_%28geology%29)
- Uyanık, O. (2019). Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 170, Article 103832. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103832>
- Wilkinson, P., Chambers, J., Uhlemann, S., Meldrum, P., Smith, A., Dixon, N. & Loke, M. H. (2016). Reconstruction of landslide movements by inversion of 4-D electrical resistivity tomography monitoring data. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1166-1174.
- Witter, J. D. & Phillips, N. (2012). Integrated 3D geophysical inversion and geological modelling for improved geothermal exploration and drillhole targeting. *GRC Transactions*, 36, 831-834. <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1030325.pdf>
- Xu, M. & Eckstein, Y. (1995). Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale. *Groundwater*, 33(6), 905-908.
- Zhdanov, M. S. (2002). *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Vol. 36, Elsevier.
- Zheng, C. & Bennett, G. (1995). *Applied Contaminant Transport Modelling: Theory and Practice*. Wiley, pp. 464.



**Gediz (Alaşehir) Grabeni'nde Gelişen A-Sismik Yüzeysel Deformasyonların Kökeni**  
*Origin of a-Seismic Surface Deformations in the Gediz (Alaşehir) Graben*

**Semih Eski<sup>1,2\*</sup> , Hasan Sözbilir<sup>2,3</sup> **

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Jeoloji, Tınaztepe Kampüsü, 35390 İzmir

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Kampüsü, 35390 İzmir

<sup>3</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, Tınaztepe Kampüsü, 35390 İzmir

• Geliş/Received: 14.08.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 09.11.2023 • Kabul/Accepted: 16.11.2023  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: • Baskı/Printed: 31.07.2024

*Araştırma Makalesi/Research Article*

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

**Öz:** Gediz (Alaşehir) Grabeni'nde 1969 Alaşehir depreminden sonra yüzeysel kırığı oluşturacak büyüklükte bir deprem olmamasına rağmen, Alaşehir-Sarıgöl arasında ciddi yüzeysel çatlakları ve çöküntüler meydana gelmektedir. Bölgede yapılan çalışmalarda, bu deformasyonların tektonik etkilerden mi yoksa yeraltı su seviyesi (YAS) değişimlerinden mi kaynaklandığı konusunda henüz bir fikir birliğine varılamamıştır.

Bu araştırma, PS-InSAR tekniği kullanılarak elde edilen 2B'li düşey ve yatay hız oranlarının jeolojik bilgiler ışığında değerlendirilmesini ve deformasyona neden olan tektonik modelin ortaya konmasını hedeflemiştir. Bunun için 2015-2023 yılları arasındaki Sentinel-1 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Buna göre Sarıgöl Fayı'nın tavan bloğunda deformasyon hızı -26 mm/yıl, taban bloğunda +3 mm/yıl'dır. Bu da aktif tektonik rejim altında Bozdağ Horstu'nun yükselirken, grabenin sürekli çöktüğünü göstermektedir. Alınan Şerit profiller, graben kenar faylarının havzanın çöküntü geometrisini doğrudan kontrol ettiğini göstermektedir. Bulgularımıza göre 11 mm/yıl (batıya) ile 7 mm/yıl (doğuya) zıt yönlü yatay hareketlerin maksimum düşey deformasyon alanında gözlenmesi, çökmenin yatay düzlemde radyal yayılımla, düşeyde ise senformal geometride gerçekleştiğini gösterir. Yani, yatay hareket bölgedeki KB-GD yönlü sıkışmadan ziyade, havzanın çökme rejimini kontrol eden güney kenar faylarının geometrisi ve türüyle ilişkilidir. Güney kenara doğru artan, havzanın içine doğru azalan düşey deformasyonlar, listrik geometrili ana graben fayının tavan bloğundaki domino tarzı geri dönüşe işaret eder. Deformasyonların Alaşehir'in batısından itibaren gözükmemesi, literatürde bahsedildiği gibi Alaşehir ve Salihli alt havzalarının örtülü yarı düşey bir fayla sınırlanmış olmasından kaynaklanır. Bazı noktalarda düşey hız ve YAS değişimlerine ait tutarsızlıkların gözlenmesi ve bu noktaların Alaşehir depremi ile oluşmuş yüzeysel kırıklarına yakın olması, deformasyonların önemli bir bölümünün tektonik etkiler altında meydana geldiğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak deformasyonlar, 1969 Alaşehir depreminin kosismik evresinde gelişen sismik atımlara ek olarak, intersismik dönemde meydana gelen a-sismik kaymalarla oluşmuştur. Bu nedenle mevcut deformasyonları tek başına yeraltı su seviyesi değişimlerine bağlamak hatalı modellemelere neden olabilir. YAS'taki ani değişimler, intersismik dönemde meydana gelecek a-sismik deformasyonun, tektonik kontrol altında gelişen sediman konsolidasyonu hızlandırmasına ve deformasyonların hızlı bir şekilde gerçekleşmesine neden olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif tektonik, Gediz Grabeni, PS-InSAR, radar interferometri, Sarıgöl-Alaşehir/Manisa, StaMPS.

**Abstract:** Although there has been no earthquake in the Gediz (Alaşehir) Graben since the 1969 Alaşehir earthquake to cause a surface rupture, serious surface cracks and depressions occur between the Alaşehir and Sarıgöl area. Studies performed in the region have not reached a consensus on whether these deformations are due to tectonic effects or groundwater level changes.

*Our research claims to evaluate the 2D vertical and horizontal velocity ratios obtained by using the PS-InSAR technique in the light of geological information and to establish the tectonic model that caused the deformation. For this, Sentinel-1 satellite images between 2015-2023 were used. Accordingly, the deformation rate in the hanging-wall of the Sarıgöl Fault is -26 mm/y and +3 mm/y in the footwall. This means that under the tectonic regime, the Bozdağ Horst is uplifting while the graben is continuously collapsing. The Swath profiles clearly show that the graben border faults directly control the subsidence geometry of the basin. The fact that we obtained 11 mm/y (westward) and 7 mm/y (eastward) horizontal movements in opposite directions in the area of the maximum vertical deformation area indicates that the subsidence occurred with radial bulging in the horizontal plane and in a synformal geometry vertically. That is, the horizontal movement is related to the geometry and type of the southern border faults that directly control the subsidence regime of the basin, rather than the NW-SE directional compression in the region. In addition, the vertical deformations, which increase towards the southern margin and decrease towards the interior of the basin, point that the main graben fault with listric geometry may have been caused by a domino-style reversal in the hanging-wall. The fact that the deformations are not visible from the west of Alaşehir is due to the fact that the Alaşehir and Salihli sub-basins mentioned in the literature are limited by a covered semi-vertical fault. The observations of inconsistencies in vertical velocity and groundwater level changes at some points and the fact that these points are close to surface ruptures caused by the Alaşehir earthquake suggest that a significant part of the deformations occurred under tectonic effects.*

*As a result, the deformations between Alaşehir and Sarıgöl occurred with a-seismic creep that occurred during the ongoing interseismic phase, in addition to the seismic pulses that developed in the coseismic phase of the 1969 Alaşehir earthquake. Therefore, attributing current deformations to groundwater level changes alone may lead to erroneous modellings. Sudden changes in the groundwater level cause the a-seismic deformation that will occur during the interseismic phase to accelerate the sediment consolidation developed under tectonic control and cause deformations to occur rapidly.*

**Keywords:** Active tectonics, Gediz Graben, PS-InSAR, radar interferometry, Sarıgöl-Alaşehir/Manisa, StaMPS.

## GİRİŞ

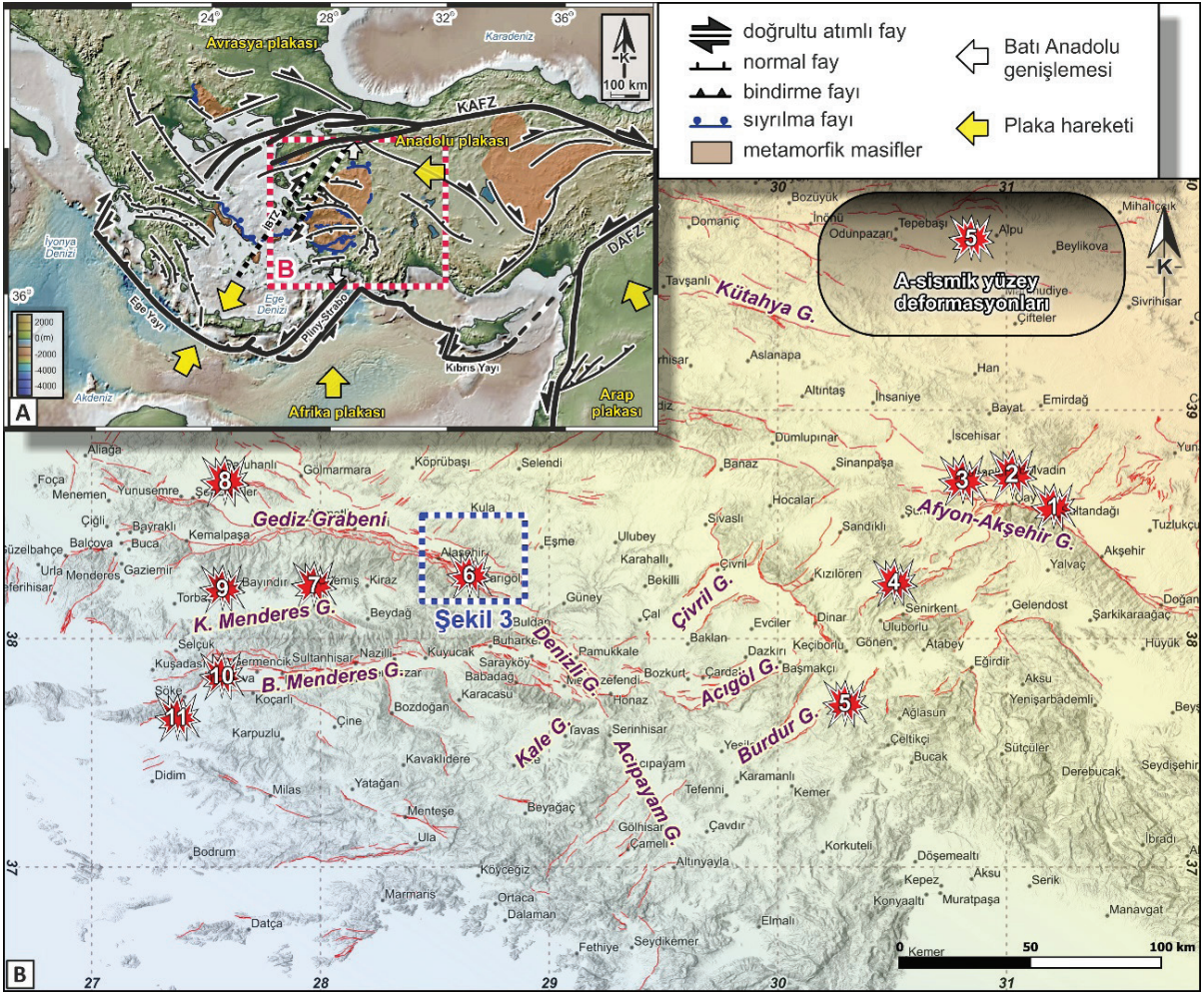
Son yıllarda özellikle Batı Anadolu’da gelişen a-sismik yüzey deformasyonlarının önemli bir bölümünün eski yüzey kırıklarını izlemesi dikkat çekicidir. Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB)’nde (Eyidoğan ve Jackson, 1985; Şengör vd., 1985; Şengör, 1987; Jackson ve McKenzie, 1988; Ambraseys 1988; Reilinger vd., 1997; McClusky vd., 2000; Bozkurt, 2001a; Taymaz vd, 2007; Biryol vd., 2011) bulunan grabenler içerisinde meydana gelen ve son 30 yıldır rapor edilen a-sismik yüzey deformasyonlarının lokasyonlarını Gediz (Alaşehir), Küçük Menderes, Büyük Menderes, Burdur, Gülovası ve Afyon-Akşehir grabenleri olarak sıralamak mümkündür (Şekil 1). Örneğin Bolvadin (Afyon-Akşehir Grabeni)’nde yüzey deformasyonlarının Şekil 1b’de 2 numaralı yıldızla gösterilen Bolvadin Fayı’nın eski yüzey kırığı üzerinde geliştiğine dair jeodezik ve paleosismolojik veriler elde edilmiştir (Özkaymak vd., 2017). Bu çalışmaya konu olan

Gediz (Alaşehir) Grabeni içinde yer alan ve yüzey deformasyonlarının gözlemlendiği Alaşehir-Sarıgöl arasında kalan alanda, tıpkı Bolvadin Fayı örneğinde olduğu gibi, 1969 depreminin (M:6,9) yüzey kırığı bulunmaktadır (Şekil 2a). Bu nedenle, Özkaymak vd. (2017)’nin kurmuş olduğu benzer deformasyon-yüzey kırığı ilişkisini, Alaşehir-Sarıgöl arasında kalan alanda araştırmak amacıyla bu çalışmanın temelleri atılmıştır.

Bu çalışmada Gediz Grabeni’nin doğu ucunda yer alan Alaşehir ile Sarıgöl ilçeleri arasındaki bölgede *Persistent Scatterer-InSAR* (PS-InSAR) yöntemi kullanılarak yüzey deformasyonları incelenmiş, yapılan arazi çalışmaları ile bölgenin aktif tektoniği ve güncel deformasyonlarının nedenleri tartışılmıştır. Uzun periyotta elde edilen görüntüler ile 18 Ekim 2020’de yağan şiddetli yağmur ve dolu sonrası Sarıgöl’de gelişen yarıkların, 1969 Alaşehir depremi sonucu oluşan yüzey kırıkları ve grabenin çökme geometrisi ile ilişkisi tartışılmıştır. Sarıgöl Aşağı Koçaklar

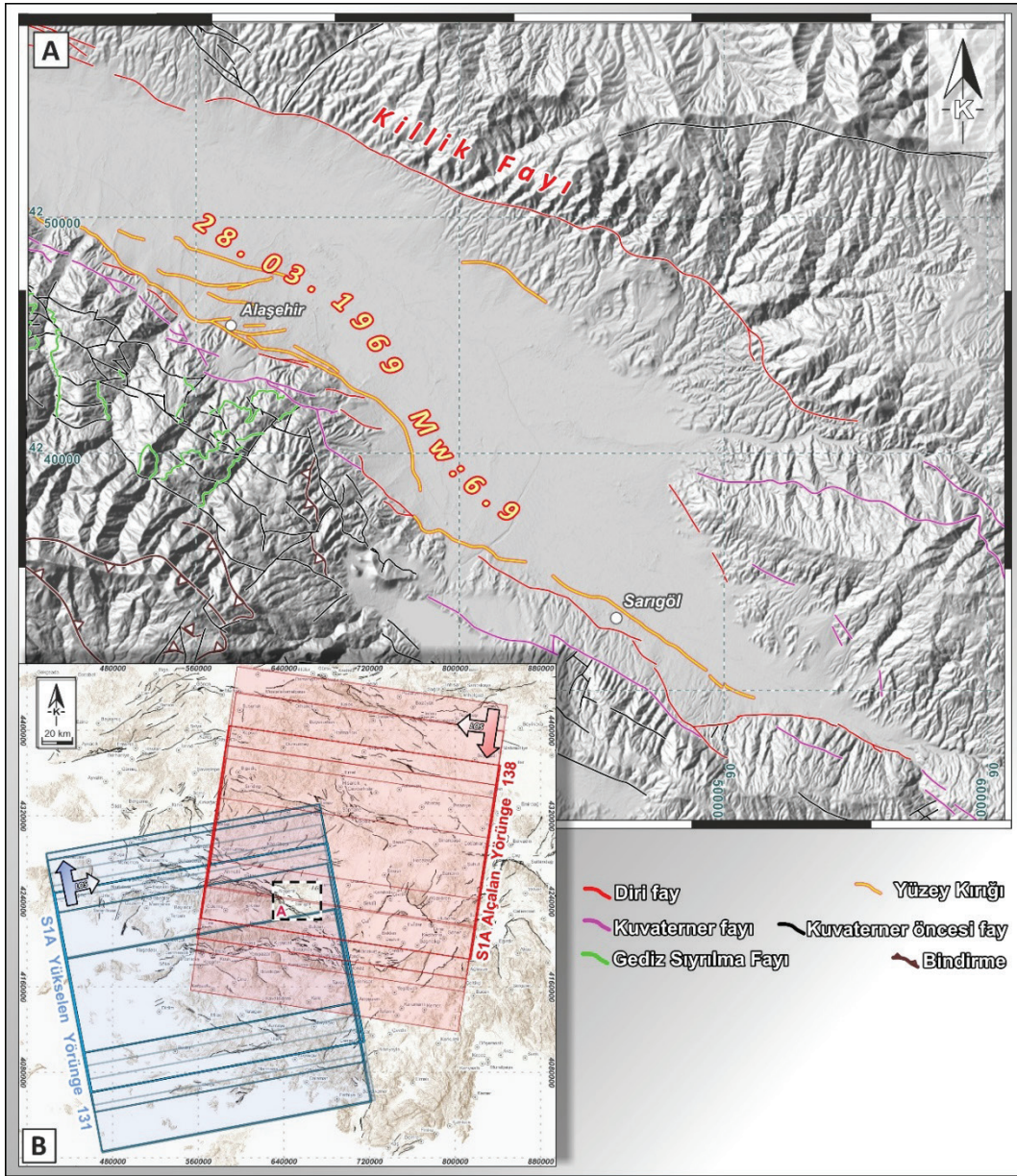
Mahallesi'nde gözlenen yıkımın boyutunu ve hızını ölçmek için arazi çalışmalarının yanı sıra, PS-InSAR yöntemi kullanılarak elde edilen tüm veriler, jeolojik, hidrojeolojik, jeofizik ve jeodezik çalışmalarla birlikte değerlendirilmiş, bölgede gelişen uzun periyotlu deformasyonun etkileri yorumlanmıştır. Tüm bu korelasyonlarla elde edilen bulgular birleştirilerek tektonik çökme modeli oluşturulmuştur. Bu çalışma, bölgenin

çökme geometrisi ile ilişkili tektonik modeli ilk kez ortaya koyarak, gelecekte yapılacak çalışmalara farklı bir bakış açısı kazandırmayı amaçlamıştır. Ayrıca bu çalışma ile aktif tektonik etkiler altında gelişen graben tipi havzalarda çökme geometrisinin, sadece yeraltı su seviyesi ve faylarla kontrol edilmediği, eskiden kalıtsal yapıların da deformasyondaki dağılımda büyük rol oynadığı anlaşılmıştır.



**Şekil 1. A)** Türkiye'nin ana tektonik hatları ve çalışma alanının Batı Anadolu tektoniğindeki konumu (Bozkurt (2001a)'den uyarlanmıştır). **B)** Batı Anadolu Genişleme Bölgesi'nin (BAGB) aktif havzalarını ve a-sismik yüzey deformasyonlarını gösteren basitleştirilmiş harita.

**Figure 1. A)** Main tectonic structures of Türkiye and location of study area in the Western Anatolian tectonics (adapted from Bozkurt (2001a)). **B)** Simplified map showing active basins and a-seismic surface deformations of Western Anatolian Extensional Province (WAE).



**Şekil 2. A)** Çalışma alanının yapısal elemanlarını gösteren COPDEM (30 m.)’den yararlanılarak oluşturulmuş 3 boyutlu Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) haritası (Diri faylar Emre vd. (2018)’den alınmıştır) ve **B)** bu çalışmada kullanılan Sentinel-1 görüntü çerçeveleri.

**Figure 2. A)** 3D DEM created using COPDEM (30m) showing structural elements of study area (active faults are taken from Emre et al. (2018)) and **B)** Sentinel-1 images frames used in this study.

## BÖLGENİN TEKTONİK ÇATISI

Alaşehir ve Sarıgöl, Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB)’nin (Şekil 1a) (Eyidoğan ve Jackson, 1985; Şengör vd., 1985; Şengör,

1987; Jackson ve McKenzie, 1988; Ambraseys 1988; Reilinger vd., 1997; McClusky vd., 2000; Bozkurt, 2001a; Taymaz vd, 2007; Biryol vd., 2011) içindeki önemli tektonik alanlardan biri

olan, iki kenarı faylarla sınırlı dar ve uzun bir geometrideki (Ketin, 1968) Gediz Grabeni (Alaşehir)'nin doğu ucunda yer alır (Şekil 1b). BAGB, farklı çalışmacılara göre; 13,5 mm/yıl (Eyidoğan, 1988), 11,7±5 mm/yıl (Le Pichon vd., 1995), 20 mm/yıl (Reilinger vd., 2006), 10 mm/yıl (Nocquet, 2012) hızla, K-G yönde genişleyen (McKenzie, 1978; Le Pichon ve Angelier, 1979; Taymaz vd., 1991; Price ve Scott, 1994; Seyitoğlu ve Scott, 1996; Genç vd., 2001; Lips vd., 2001; Sözbilir, 2001; Sözbilir vd., 2003a; Sözbilir vd., 2003b; Bozkurt, 2003, 2004; Purvis ve Robertson, 2005; Reilinger vd., 1997; Özkaymak ve Sözbilir, 2008; Nocquet, 2012; Sangu vd., 2020; Şaroğlu ve Güler, 2020; Weiss vd., 2020) ve bu harekete bağlı olarak oluşan yaklaşık D-B uzanımlı normal fay sistemleri ve K-G uzanımlı veriv ve doğrultu atımlı faylarla karakterizedir (Koçyiğit, 1984). Günümüzde BAGB'deki genişlemenin KD-GB yönde gerçekleştiğini belirten çalışmalar da mevcuttur (Dumont vd., 1979; Angelier vd., 1981; Zanchi ve Angelier, 1993; Saatçılar vd., 1999; Rojay vd., 2005; Poyraz vd., 2019). Güneydoğu Ege bölgesi Avrasya'ya göre, saat yönünün tersine ve güneybatı Ege'ye göre 10 ± 1 mm/yıl hızla Helen hendeğine doğru (yani GD'ye doğru) hareket ederek, bu tutarlı hareketten önemli ölçüde sapar (McClusky vd., 2000).

Ege genişleme rejimine (Şengör, 1979) neden olan olay, Dewey ve Şengör (1979)'a göre geç Miyosen sonrası, Şengör vd. (1985)'e göre erken Miyosen'de Anadolu'nun Avrasya ve Afrika'ya göre batıya doğru hareketidir. Helen Yayını'ndaki litosferik dalımın tavan bloğundaki evriminin neden olduğu genişleme, farklı hızlara sahip levhanın "yatay" gerilmesinden (*no slab pull break-off*) kaynaklanır (Innocenti vd., 2005). Ege'deki kabuk incelmesinin K-G genişleme yönünde bir örnek olmadığı da bilinmektedir (Zhu vd., 2006). BAGB içindeki Alaşehir (Gediz) ve Büyük Menderes grabeninin tavan bloğu çökellerinden elde edilen sporomorf tayinleri, D-B gidişli bu iki ana genişlemeli yapının

yaşının erken Miyosen olduğunu göstermektedir (Seyitoğlu ve Scott, 1996). Literatürdeki birçok çalışmada (Yılmaz vd., 2000; Hetzel vd., 1998; Seyitoğlu vd., 1992; Seyitoğlu ve Scott 1991, 1994, 1996; Seyitoğlu vd., 2002; Bozkurt, 2003; Ring vd., 2003; Purvis ve Robertson, 2004; Purvis vd., 2005; Thomson ve Ring, 2006; Sözbilir, 2002; Ersoy ve Helvacı, 2007; Çiftçi ve Bozkurt, 2009b; Öner ve Dilek, 2011; Gessner vd., 2013; Jolivet vd., 2013; Sümer vd., 2013; Uzel vd., 2015; Uzel vd., 2020) genişleme yaşının erken Miyosen olduğu konusunda hemfikirken, genişleme yaşını Oligosen dönemine kadar indiğini ifade eden çalışmalar da vardır (Lips vd., 2001; Işık ve Tekeli, 2001; Gessner vd., 2001a, 2001b; Bozkurt vd., 2006; Dilek vd., 2009; Forster ve Lister 2009; van Hinsbergen vd., 2010; Ersoy vd., 2010; Asti vd., 2018).

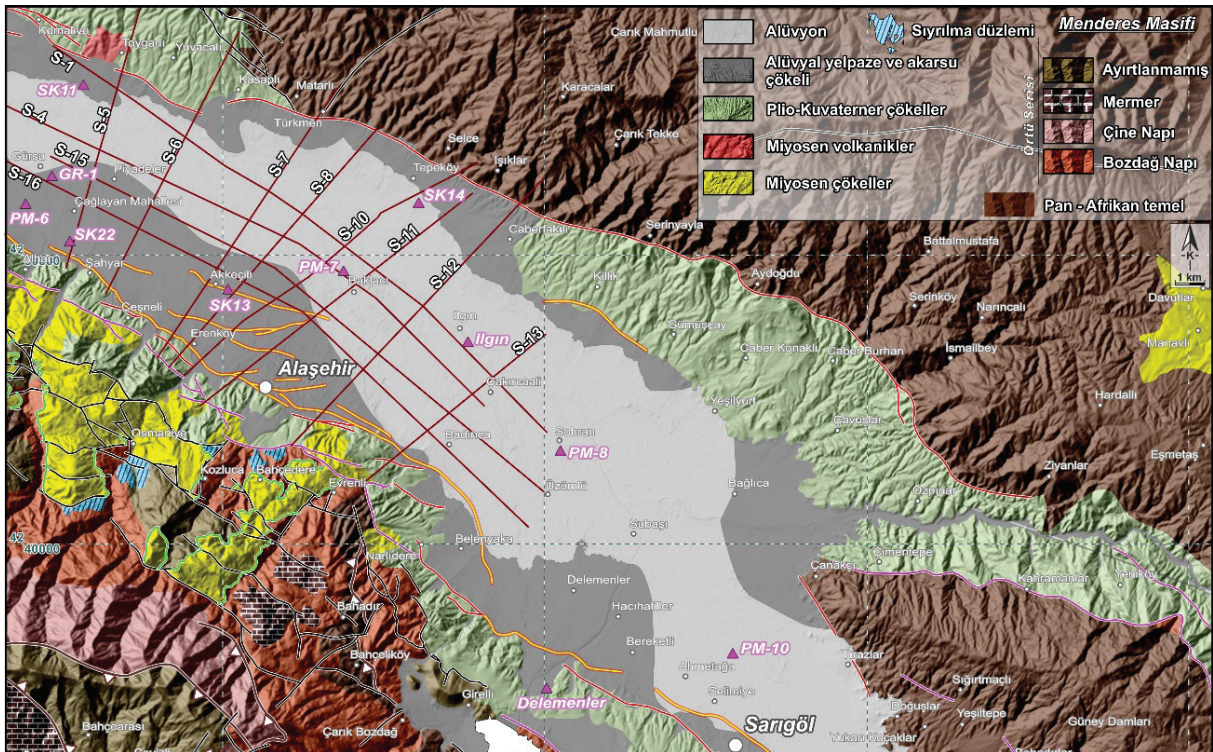
Aktif fay düzlemlerinde yapılan paleostres çalışmalarına göre, Gediz Grabeni geç Pliyosen'den beri K-G, KKD-GGB, KB-GD gibi ortalama K-G Neojen genişleme yönü göstermektedir (Temiz, vd, 1998; Bozkurt, 2001b; Bozkurt ve Sözbilir, 2006; Rojay, 2009; Çiftçi ve Bozkurt, 2009a ve b; Tekin vd., 2022). Koçyiğit vd. (1999), Gediz Grabeni'nin kısa bir sıkışma fazıyla ayrılan iki farklı genişleme aşamasıyla oluştuğunu belirtmektedir. Hali hazırda bu kanıtı destekleyen çok sayıda çalışma da (Bozkurt, 2000 ve 2001a; Yılmaz vd., 2000; Kaya vd., 2004; Bozkurt ve Rojay 2005; Beccaletto ve Steiner, 2005; Erkül vd., 2005; Bozkurt ve Sözbilir, 2004 ve 2006; Uzel ve Sözbilir, 2008; Emre ve Sözbilir, 2007; Gürer vd., 2009; Rojay, 2009; Gürboğa vd., 2013; Göktaş ve Hakyemez, 2015; Rojay vd., 2019) bulunmaktadır. Bunun yanında, Gediz Graben Sistemi Fayları (Emre vd., 2018) içerisinde yer alan Manisa Fayı ve Akçapınar Segmenti'nde görülen aktarım rampası (*relay ramp*), bölgesel genişleme yönüne dik gelişen lokal stres değişimlerini yansıtmaktadır (Bozkurt ve Sözbilir, 2006; Çiftçi ve Bozkurt, 2007). Grabeni sınırlayan normal fayların dağlara paralel



basamaklı bir yapı sunduğu (Arpat ve Bingöl, 1969; Koçman, 1985) ve aktif genişlemeli fay izlerinin baskın olarak grabenin güney kenarında izlendiği (Roberts, 1988) çok eski çalışmalardan beri bilinmektedir (Şekil 3). Bozdağ Horstu'nda bulunan akarsulardan alınan uzunluk profillerinde, en az 3 ayrı gençleşme seviyesi gösteren basamakları (Çelik, 1991), aynı zamanda kalın Neojen tortulları sınırlamaktadır (Paton, 1992). Buradaki basamak tipi normal faylar, tortul kayalarda 15°'lik dönüşle eğimlenmeye neden olmuştur (Hetzel vd., 1995). Bu dönüşün, Gediz Sıyrılma Fayı'nın tavan bloğunda meydana geldiği (Savaşçın vd., 1999) ve fayların re-aktivasyonu ile süreksiz olan ve örtüşen daha küçük basamaklı bitişik fayların etkileşimiyle birleşerek fay segmentlerini oluşturduğu bilinmektedir (Bozkurt ve Sözbilir, 2006) (Şekil 3). Sıyrılma fayı, 0,5°-1°/My oranda güneye devrilme (Buscher vd., 2013) nedeniyle, Yuvarlanan Reze (*Rolling Hinge*)'in bir sonucu olarak 40°-60°'lik başlangıç eğiminden günümüzde 0°-20°'lik daha düşük bir eğime gerilemiştir (Gessner vd., 2001b). Tavan bloğunda bulunan tüm yapıların ardışık gelişimi, grabenleşme modellerinden biri olan Yuvarlanan Reze Mekanizması (*flexural rotation/rolling hinge*) olarak adlandırılmıştır (Seyitoğlu vd., 2002). Havzaya doğru gençleşen basamak yapılı faylar, rift sınırının havzaya doğru göçü olarak da yorumlanmaktadır (Çiftçi ve Bozkurt, 2010). Bodur vd. (2023)'ün jeodinamik modellerinde, bu basamak yapılı yüksek açılı normal fayların, kabuksal akışın barındırdığı yatay bir eksen etrafında giderek ~40° daha sığ eğimlere doğru döndüğünü göstermektedir.

Havzaya doğru ilerleyen bu basamak faylarının en son ürünü, 28.03.1969 tarihli Alaşehir depreminin yüzey kırığıdır (Şekil 2a ve 3). Depreme neden olan fay, ilk olarak Hancock ve Barka (1987) tarafından Alaşehir Fayı olarak adlandırılmış, günümüzde ise Gediz Graben Sistemi fayları içine dahil edilerek Alaşehir Segmenti (Emre vd., 2018) olarak tanımlanmıştır. Meydana gelen  $M_s=6,5$  (6,9) büyüklüğündeki

deprem, 49 can kaybına ve 4651 konutun yıkılmasına veya ağır hasar görmesine neden olmuştur (Arpat ve Bingöl, 1969). Deprem sırasında Kent (2015)'e göre 30 km, Arpat ve Bingöl (1969)'a göre 12 km uzunluğunda yüzey kırığı meydana gelmiştir. Emre vd. (2018)'in haritası baz alınarak, bu çalışmada hesaplanan uzunluk ise yaklaşık 40 km'dir (Şekil 3). Koca vd. (2011) karotlu sondajlardan elde edilen bilgiler ışığında bölgede meydana gelen deformasyonların nedenlerini tartışmış, grabeni sınırlayan fayların yüzey hasarlarında etkili olduğu sonucuna varmıştır. Gediz Grabeninde GNSS (Poyraz vd., 2015; Poyraz vd., 2019; Tiryakioğlu vd., 2019; Doğan vd., 2022) ve InSAR (Poyraz ve Hastaoğlu, 2020; Hastaoğlu vd., 2023) yöntemleri kullanılarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma bulunmakla birlikte, elde edilen sonuçlar genel olarak jeodezik temelde ve kısa periyotta elde edilen görüntüler ve ölçümler kullanılarak değerlendirilmiştir. 28.03.1969 tarihli Alaşehir depreminden sonra yüzey kırığı oluşturacak büyüklükte depremler olmamasına rağmen, bölgede hali hazırda ciddi yüzey çatlakları ve çöküntüler meydana gelmektedir. 1969 yüzey kırığı boyunca gözlenen güncel yüzey deformasyonlarının nedenleri, Koca vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada jeolojik haritalama, morfometrik ölçümler, karotlu zemin sondajı, konsolidasyon deneyleri gibi yöntemler kullanılarak detaylı olarak yorumlanmıştır. Fakat bugüne kadar yapılan birçok çalışmada deformasyonların nedenleri ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Bazı çalışmalar meydana gelen deformasyonları mikrosismik aktiviteye (Gürsoy vd., 1997) bağlamış, bazıları ise tektonik krip ile a-sismik olarak meydana geldiğini (Hodgkinson, 1996; Eravcı vd., 2009; Gören, 2016; Doğan vd., 2022) belirtmişlerdir. Koca vd., 2011 ve Poyraz vd., (2019) ise deformasyonların her iki nedenle de meydana geldiğini ifade etmektedir. Yapılan tüm çalışmalardan anlaşılacağı üzere bu deformasyonlar grabenin genişleme rejimi ile doğrudan ilişkilidir.



**Şekil 3.** Çalışma alanının SYM üzerine giydirilmiş jeoloji haritası. Analizlerde kullanılan yeraltı su seviyesi ölçümü yapılmış kuyuların lokasyonu ve Çiftçi ve Bozkurt (2009a)'da yer alan sismik profil hatları haritada gösterilmiştir. Diri faylar Emre vd. (2018)'den, metamorfik birim yüzlekleri ise Koralay vd. (2011)'den yararlanılarak çizilmiştir.

**Figure 3.** Geological map of study area overlaid on DEM. (The seismic profile lines in Çiftçi and Bozkurt (2009) and locations of wells used in analyzes, for which groundwater level measurements were performed, are shown on the map. Active faults taken from Emre et al. (2018) and metamorphic unit outcrops drawn using Koralay et al. (2011)).

Graben bazında yapılan GPS ve GNSS hızlarına göre genişlemenin hızı, grabenin batı ucu boyunca 11 mm/yıl ve doğu ucu boyunca 5 mm/yıl'dır (Hodgkinson, 1996). Barka ve Reilinger (1997) göre bu hız  $10 \pm 5$  mm/yıl, Nocquet (2012)'ye göre 6 mm/yıl Öner ve Dilek (2011)'e göre ise Alaşehir Havzası'nda ortalama 6 ile 8-9 mm/yıl'dır.

## MATERYALLER ve YÖNTEMLER

Aktif tektoniğin hâkim olduğu alanlarda yapılan ilk jeodezik araştırma 17 Mayıs 1892 Tapanuli-Sumatra depremiyle başlamış (Yeats vd., 2006), Reid (1910)'un 1906 San Francisco

depremi ile ilgili çalışmasıyla birlikte yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda, İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR), zemin deformasyonunu karakterize etmede (Dai vd., 2002; Shahabi ve Hashim, 2015; Anderson vd., 2016; Bozzano vd., 2019) ve levha sınırları boyunca gerinim birikimi ve gerilim oranını değerlendirmede yaygınlaşan bir araç haline gelmiştir (Cigna vd., 2012; Sarychikhina ve Glowacka, 2015; Dánişor vd., 2018; De Novellis vd., 2018; Kim ve Jung, 2018; Ali vd., 2019; Aslan vd., 2019; Blasco vd., 2019). Ancak bu yöntemlerin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek mekânsal ve zamansal kısıtlamaların elde edilecek sonuçlar üzerinde doğrudan veya dolaylı etkileri

bulunmaktadır. Daha doğru sonuçlar için, elde edilen verilerin jeolojik bilgilerle korelasyonunun yapılması gerekir. Böylece coğrafi tehlikelerin yönetimi için daha güvenli bir arazi planlaması ve koordinasyonu sağlanabilir (Zhang vd., 2016).

Türkiye'deki aktif tektonik alanlarda InSAR yönteminin ilk kullanımı (Çakır vd., 2003) 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ile başlamış, yer kabuğunun tektonik etkiler altındaki hareketini anlamak adına günümüzde de birçok çalışmada (örn. Çetin vd., 2014; Akoğlu vd., 2018; Aslan vd., 2019; Çağlayan vd., 2019; Doğru, 2020; Tatar vd., 2020; Işık vd., 2021; Oktar vd., 2021; Taymaz vd., 2022; Saber, vd., 2023) kullanılan etkili bir yöntem haline gelmiştir. Tektonik alanların dışında baraj, köprü, elektrik santrali, yerleşim alanı gibi üst yapı, jeotermal alan, heyelan bölgesi vb. yeraltı su seviyesi değişimleri ile gelişen a-sismik çöküntü alanlarının takibi için yapılan sayısız çalışmada da (örn. Abdikan vd., 2014; İmamoğlu vd., 2019 ve 2022; Bayık vd., 2021; Gezgin, 2022) kullanılmaktadır. Günümüzde InSAR, kabuksal stres alanlarındaki deformasyon değişimlerini görüntülemenin yanı sıra, meydana gelen kayma dağılımlarını haritalayarak, sismik ve a-sismik olaylara yanıt vermek için kullanılan bir araç haline gelmiştir (Reid, 1910; Fialko, 2006; Walters, vd., 2011; Elliott vd., 2016; Ingleby ve Wright, 2017).

Yüksek oranda gerinim birikimi ile karakterize edilen alanlarda, uzun zaman serileri (on yıllık) ve zemin deformasyonuna ilişkin en doğru gözlemler sabit GNSS gözlem ağları ile sağlanmaktadır (Fattahi, 2015). GNSS veya nivelman yaklaşımları gibi geleneksel jeodezik yöntemlerin çoğu pahalıdır ve zaman açısından sürdürülebilirliği zordur. GNSS ölçümleri, esasen Dünya yüzeyindeki nokta ölçümlerine dayanır ve tüm alanda meydana gelen hareketin tam bir resmini elde etmeyi zorlaştırır (Maghsoudi vd., 2018). Buna karşın, Diferansiyel SAR interferometrisi (DInSAR), geniş bir uzamsal kapsama alanında ve birkaç metreye kadar

yüksek bir uzamsal çözünürlükle ana kaya deformasyonunu elde etmek için hızlı, ucuz ve eşsiz bir fırsat sağlayabilir (Rosen vd. 1996; Massonnet, 1997). Geleneksel DInSAR, heyelan ve deprem gibi ani olayların neden olduğu büyük yer değiştirmelerini incelemek için oldukça etkili bir yöntemdir. Ancak izleme yapılan dönem nispeten uzun bir periyodu kapsadığında, fazların de-korelasyonu ve atmosferik yapaylık nedeniyle sinyal almada bazı zorluklarla karşılaşır (Haghighi, 2019). Bu kısıtlamanın üstesinden gelmek için çok zamanlı radar (MT-SAR) veri yığını analiz ederken, Sabit Saçıcı İnterferometri (*Persistent Scatterer Interferometry* (PSI)) ve Küçük Temel Alt Kümesi (*Small Baseline Subset* (SBAS)) yöntemleri kullanılır (Lauknes vd., 2010; Shanker vd., 2011; Yen vd., 2011).

### InSAR Veri Setleri

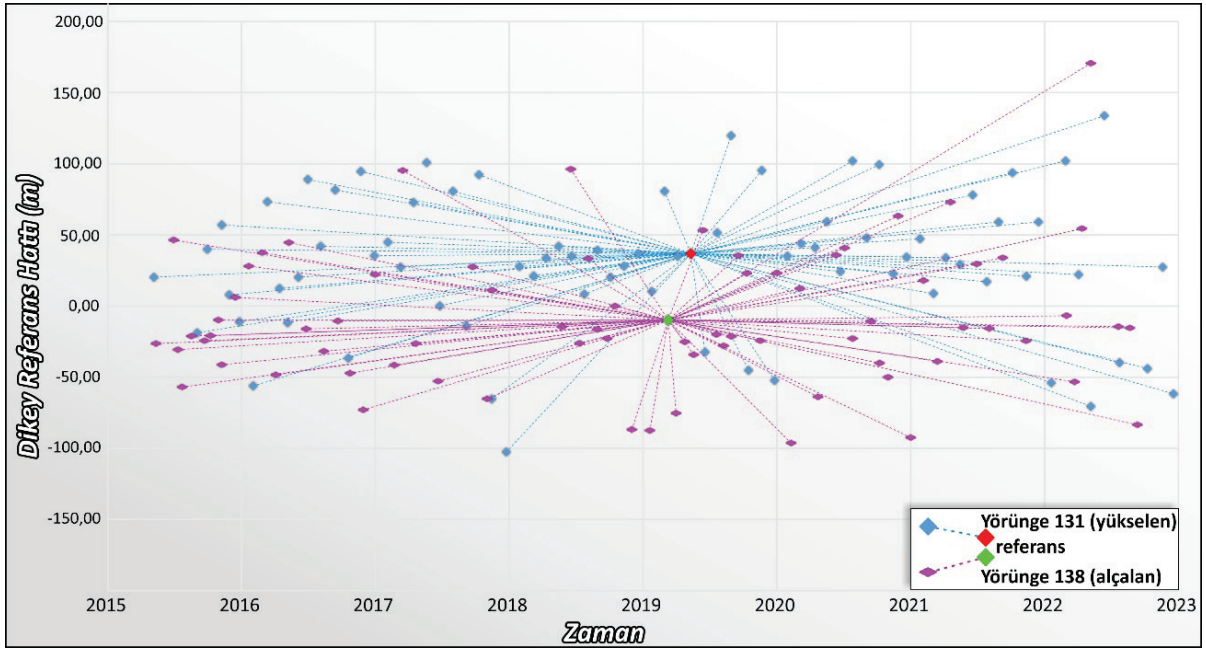
Copernicus Sentinel-1 (S-1) uydusunun günümüz misyonu, Avrupa Uzay Ajansı'na (ESA) veri sürekliliği sağlamak için, A ve B birimlerinden oluşan özdeş C-bandı sentetik açıklıklı radar (SAR) uydularından oluşan bir takım uydusuna dayanmaktadır (Yagüe-Martínez vd., 2016). Bu çalışmada kullanılan Copernicus Sentinel verileri [2015-2023], ESA tarafından işlenen ASF DAAC [03 Ocak 2023 veri erişimi]'den alınan Sentinel-1A (C-bandı: dalga boyu 5,6 cm) uydu görüntülerini (74 alçalan ve 76 yükselen yörünge) kapsamaktadır (Şekil 2b ve Şekil 4). Sentinel-1 göreviyle, Şerit Haritası Modu (SM), İnterferometrik Geniş Alan Modu (IW), Ekstra Geniş Alan Modu (EW) ve Dalga Modu (WM) olmak üzere dört farklı ölçüm modu ve görüntü özelliğine sahip veri ürünleri elde edilir. İnterferometrik geniş alan modu (IW) çoğu uygulamada yaygın olarak kullanılan bir moddur. Bu mod, geniş bir şerit (*swath*) genişliğini (250 km) orta düzeyde bir geometrik çözünürlükte (5m x 20m) interferogram görüntüleri elde etmek için kullanılır (Torres vd., 2012). Bu çalışmada kullanılan görüntüler, 2015 Mart ile 2023 Ocak

zaman aralığındaki, VV polarizasyonlu Tek Bakışlı Kompleks (SLC) İnterferometrik Geniş (IW) şerit modu ışınları olarak kaydedilmiştir. Görüntülerin dik referans hattı  $\pm 200$  m arasında değişmektedir (Şekil 4). SLC veri setinin ön işlemleri ve referans görüntü seçimleri Avrupa Uzay Ajansı tarafından sağlanan SNAP programıyla hazırlanmıştır. Yükselen yörüngede (Path 131) 20190509, alçalan yörüngede (Path 138) ise 20190311 tarihli referans görüntüler kullanılmıştır (Şekil 4). Radar fazındaki topografik katkıları düzeltmek için Copernicus DEM (GLO-30) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ile çalışılmıştır. Ön işlemde sonra, SLC verileri aynı alana kırılarak hem mesafede hem de azimutta ölçeklendirilmiş, böylece yardımcı görüntülerin ana geometriyle aynı ölçekte interferogramlar oluşturması sağlanmıştır. Sonuç olarak, radar pikselleri Cigna

vd. (2012) tarafından önerildiği gibi yarı boyuta (yani yaklaşık 2 m'ye 10 m) indirgenmiştir.

### Çok Zamanlı InSAR İşlemleri

Zaman serisi analizi olarak da bilinen çok zamanlı InSAR (MTI) işleme, en iyi sinyali elde etmek için, aynı yörüngelerdeki birden fazla SAR görüntüsünü işleyerek sinyallerdeki bozulmaların (zamansal korelasyon ve atmosferik etkiler) üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır (Hooper vd., 2012; Osmanoglu vd., 2016; Bayık vd., 2021; İmamoğlu vd., 2022). Çok zamanlı InSAR analizi yaklaşımları PS-InSAR ve SBAS olmak üzere iki genel kategoriye ayrılmıştır. Bu kategorilerin her biri, SAR görüntülerinde belirli bir saçılma mekanizması türü için optimize edilmiştir.



**Şekil 4.** Bu çalışmada kullanılan Sentinel-1A referans görüntüler (yükselen ve alçalan yörüngeler) için baz çizgi-zaman grafikleri. Kırmızı ve yeşil nokta, her bir yörünge için referans olarak kullanılan ana görüntüyü göstermektedir.

**Figure 4.** Baseline-time plots for the Sentinel-1A reference images (ascending and descending) used in this study. (Red and green dots show main image used as reference for each track.)

PS-InSAR olarak adlandırılan ilk yaklaşımda, önemli herhangi bir zamansal bozulma belirtisi göstermeden, uzun süre boyunca daha kararlı özellikler gösteren, dünya yüzeyindeki kalıcı saçıcılardan yararlanır (Ferretti vd., 2001; Hooper vd., 2004). İnterferogramlar, herhangi bir mekânsal/zamansal temel ölçüt olmaksızın, veri seti içindeki tek referanslı bir SAR görüntüsüne göre oluşturulur ve yalnızca kalıcı saçınım noktaları ölçüm noktaları olarak analiz edilir (İmamoğlu vd., 2022). İkinci yaklaşım olan SBAS, sadece küçük mekânsal/zamansal taban çizgileri ile interferogram oluşumunu zorlayarak zamansal dekorelasyonu azaltmayı amaçlar (Berardino vd., 2002; Hooper, 2008). PS-InSAR tekniği, nokta hedefleri olarak adlandırılan nesnelere odaklanır, yani muhtemelen küçük boyutlu ve köşe reflektörleri (örneğin binalar, kayalar) gibi çok iyi karakterize edilmiş bir geometriye sahip ve yüksek geri saçılma gösteren alanlarda kullanılır (Wang vd., 2009). SBAS tekniği ise açık alanlar veya çok geometrik olarak karakterize edilmemiş nesnelere gibi sözde dağıtılmış hedefler üzerine yoğunlaşmaktadır (Wang vd., 2009).

Yapılan arazi çalışmaları sonucu, sel felaketinin öncesinde ve sonrasında meydana gelen deformasyonların, genel olarak yerleşim alanlarına denk geldiği tespit edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada, deformasyon ölçümleri için PS-InSAR metodu kullanılmıştır. Elde edilen interferogram yığınları, StaMPS (Hooper, 2008; Hooper vd., 2012) kullanılarak işlenmiştir. PS seçim adımı birçok alt adım içerir ve PS noktaları genlik dağılım indeksi ( $DA$ ) ile tanımlanır (Ferretti vd., 2001). Öncelikle noktaların gürültü özellikleri genlik analizi ile incelenir; ikinci olarak eşik değeri belirlenir. Aslan vd. (2019), rastgele genlik değişkenliğini en aza indirmek ve tarım alanları veya kar nedeniyle oluşan ilişkisiz pikselleri ortadan kaldırmak için eşik  $DA$  değerini 0,4 olarak önermiştir. Radar interferogram filtrelemesi (Goldstein & Werner, 1998), sonraki 2B'lu faz çözümünü iyileştirmek ve faz

gürültüsünü azaltmak için tüm interferogramlarda gerçekleştirilmiştir. Faz çözümü yaklaşımı için, SNAPHU (Chen ve Zebker, 2002) kullanılmıştır. Daha sonra atmosferik etkileri ortadan kaldırmak için Bekaert vd. (2015) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu Reducing Atmospheric InSAR Noise (TRAIN) programından yararlanılmıştır.

### Sentinel-1 Verilerinin 2B Yer Değiştirme Oranlarına Ayrıştırılması

Yalnızca LOS (*Line of Sight*) bileşenlerini ölçen InSAR tekniğinin (İmamoğlu vd., 2022), düşey, D-B ve K-G yönlerinde üç boyutlu (3B) deformasyon vektörünü elde edebilmesi için en az üç bağımsız alım geometrisi gereklidir (Hu vd., 2014). Gediz Grabeni iki farklı yörüngeden gelen görüntüleme geometrisine sahip Sentinel-1 verileri içinde kaldığından sadece iki farklı görüntüleme geometrisi mevcuttur. Bu sebeple, gerçek deformasyon vektörünün üç bileşeninden yalnızca düşey ve D-B yönlü olanları, alçalan ve yükselen uydu görüntülülerinden elde edilen LOS verileriyle, denklem (1)'de verilen formül (Fernandez vd., 2018; Aslan vd., 2019; Pawluszek-Filipiak ve Borkowski, 2020; Bayramov vd., 2021) kullanılarak dönüştürülmüştür.

$$\begin{pmatrix} a_{LOS}^{asc} \\ a_{LOS}^{dsc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{asc} & -\cos\alpha_{asc} \sin\theta_{asc} \\ \cos\theta_{dsc} & -\cos\alpha_{dsc} \sin\theta_{dsc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{ver} (Up-Down) \\ d_{hor} (East-West) \end{pmatrix} \quad (1)$$

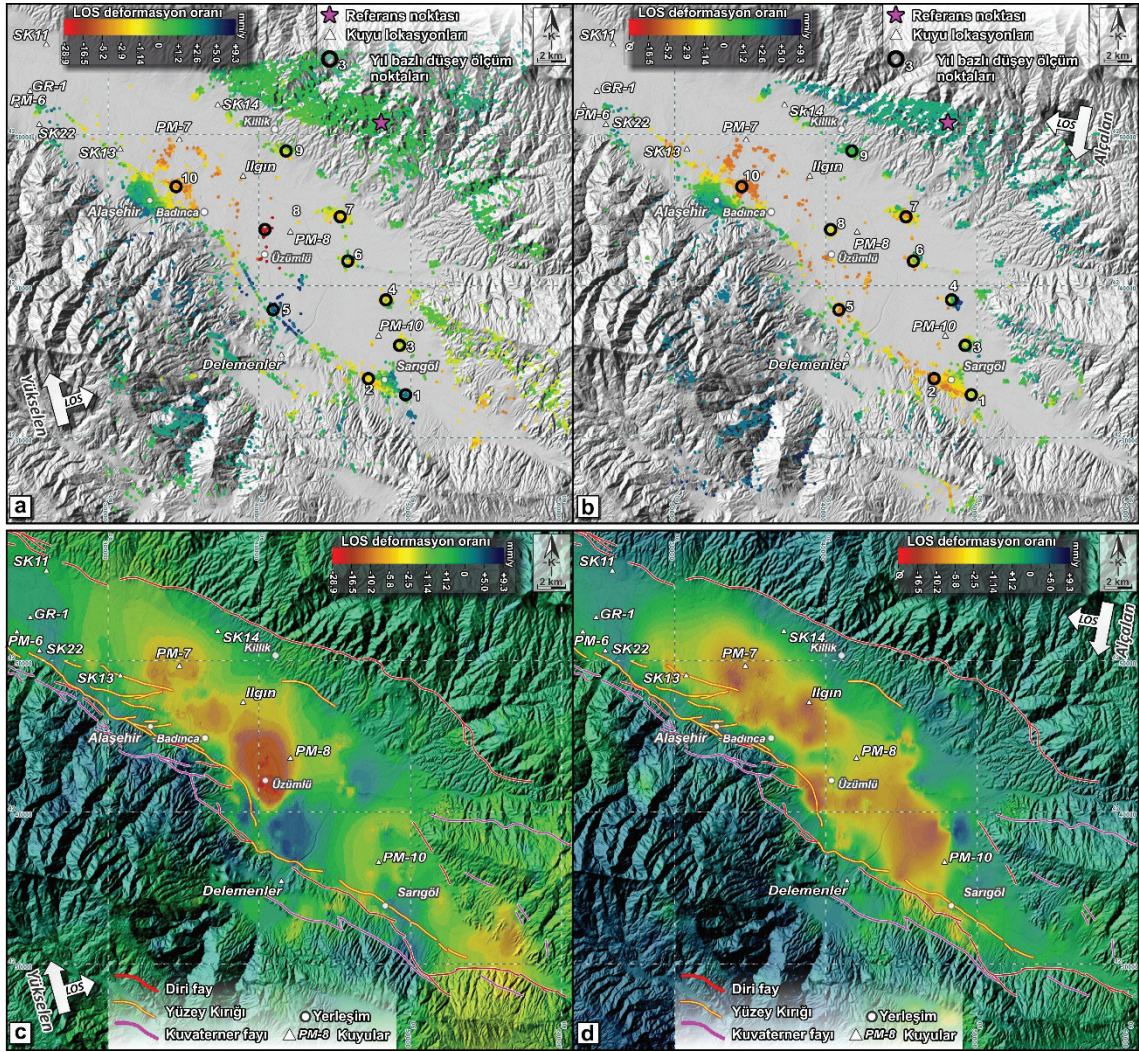
Bu denklemde  $\theta_{asc}$  ve  $\theta_{dsc}$  lokal geliş açılarını,  $\alpha_{asc}$  ve  $\alpha_{dsc}$  ise uyduların yön açılarını sembolize etmektedir. Elde edilen yıllık LOS hareket hızlarının mevsimsel yeraltı su seviyesi değişimi ile korelasyonu, deformasyonun gelecek dönem etkilerinin tahmin edilmesi ve önlem alınmasını sağlamanın yanı sıra, a-sismik deformasyonla gelişen çöküntü alanlarının dağılımının ortaya konması açısından önemlidir. Bu kapsamda, Hastaoğlu vd. (2023)'ün Devlet Su İşleri'ne ait ILGIN (2013-2018) ve Doğan vd. (2022)'de kullanılan DELEMENLER (2011-2019) kuyu

verileri ile, Şimşek ve Demirkese (2022)'nin çalışma alanımız içinde kalan 9 adet kuyuda hesapladığı kısa dönem kuyu izleme sonuçları (2017-2019) kuyu künyeleri değiştirilmeden kullanılarak yeraltı su seviyesi değişimlerinin deformasyon üzerine etkisi değerlendirilmiştir (Şekil 3). Yeraltı su seviyesi ve düşey yönlü yer değişim grafikleri oluşturulurken, ölçüm yapılan zaman sıfır kabul edilerek kümülatif değişim oranlarına göre hesaplanmıştır. Pandemi döneminde ve sonrasında kuyu gözlemleri yapılmadığından (Hastaoğlu vd., 2023) son yılların verileri değerlendirilememiştir. Yükselen ve alçalan yörünge veri setlerinde görüntü edinim tarihleri eşit olarak örneklenemediğinden, LOS deformasyon zaman serisinde ortak bir zaman referansı kullanılmış, tüm noktalarını temsil edebilen bir fonksiyon ile ara değer hesabı yapmayı mümkün kılmak için, her iki veri setine İkinci Dereceden Bağ İnterpolasyonu (*Quadratic Spline Interpolation*) yöntemi uygulanarak yeniden haritalama yapılmıştır. Bu sayede PS yoğunluğunun düşük olduğu yerlerde (tarım ve sulak alan nedeniyle düşük tutarlılık değerinin olduğu yerlerde) deformasyon verileri hakkında bilgi edinme şansına sahip olunmuştur. Bu çalışma kapsamında jeolojik haritalama çalışmaları yapılmış (Şekil 3), Çiftçi ve Bozkurt (2009a)'da yer alan ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı'na ait (TPAO) sismik kesitlerinden (Şekil 3) yorumlanarak çizilen enine jeolojik kesit kullanılmış, yüzey deformasyonunun kaya birimleri ve yapısal hatlarla olan ilişkisinin ortaya konması amaçlanmıştır.

### PS-InSAR SONUÇLARI

Alaşehir-Sarıgöl arasını kapsayan 1100 km<sup>2</sup>'lik alanda yapılan PS-InSAR işlemiyle, yükselen ve alçalan yörüngelerde sırasıyla 10508 PS ve 8508 PS veri noktası elde edilmiştir. Ortalama nokta yoğunluğu yükselen ve alçalan yörüngeler için

sırasıyla 9,5 ve 7,73 PS/km<sup>2</sup> olmuştur (Şekil 5a ve b). Her iki hattın benzer LOS hız noktaları düşey yönlü deformasyon gösterirken, farklı mekânsal model gösteren alanlar ise yatay yer değişimini ifade etmektedir (Şekil 5). Şekil 5a ve b'de gösterildiği gibi, yüksek zamansal uyumsuzluk nedeniyle, graben içinde tarımsal alanların yoğun olduğu kesimlerde PS-InSAR kullanarak zemin yer değiştirmesini tahmin etmek güçleşmektedir. İkinci Dereceden Bağ İnterpolasyonu ile yeniden modellenen LOS yıllık hız değerleri yükselen yörünge için -28,9 mm/yıl ile +9,3 mm/yıl, alçalan yörünge için -16,5 mm/yıl ile +9,3 mm/yıl arasındadır (Şekil 5c ve d). 2015-2023 dönemi boyunca LOS ölçümlerinin 2B ayrıştırılması ile elde edilen düşey yer değiştirmeler, graben üzerindeki yıllık ortalama düşey deformasyon hızının mm/yıl aralığında belirlenmesine olanak sağlamıştır. Yükselen ve alçalan yörüngelerde Denklem (1)'de verilen eşitlikle hazırlanan 2B'lu sonuçlar, düşey hız (Şekil 6a) ve D-B yönlü hızların (Şekil 6b) yıllık yer değişim miktarlarını yansıtmaktadır. Negatif değerlere sahip piksellerin sayısına dayanarak, Alaşehir-Sarıgöl'ün graben içerisinde bulunan alanlarında hâkim olan çökme süreçlerinin açıkça gözlemlendiğini söylemek mümkündür. Yansımaların yoğun olduğu alanlarda yıllık ortalama düşey deformasyon hızları, Alaşehir merkezinde -16,92 ile -6,94 mm/yıl arasında, Sarıgöl merkezinde ise -12,8 ile 0,8 mm/yıl arasındadır (Şekil 6a). Düşey deformasyon hızlarına bakıldığında, en yüksek çökme oranı -26 mm/yıl ile Alaşehir'e bağlı Üzümlü Köyü'nde tespit edilmiştir. LOS ölçümlerinin yatay doğu-batı yer değiştirmeye göre 2B ayrışımı, yıllık ortalama yatay deformasyon hızının 11 mm/yıl (batıya) ve 7 mm/yıl (doğuya) olduğunu göstermiştir (Şekil 6b). 18 Ekim 2020 tarihinde Sarıgöl'de meydana gelen yarıkların olduğu alanda ise 6-4 mm/yıl arası değişen hız oranlarıyla yatay yer değiştirmeler tespit edilmiştir.



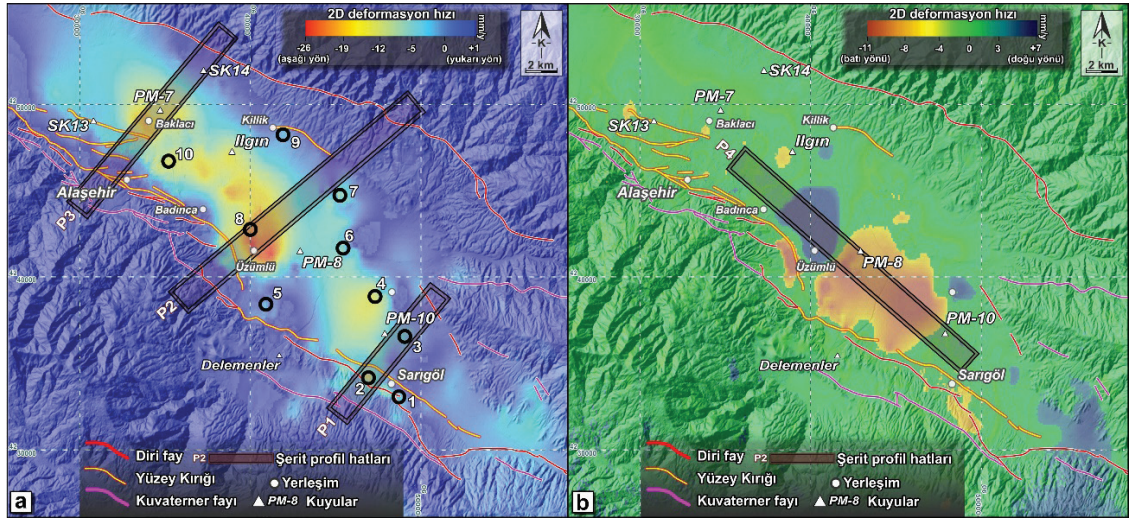
**Şekil 5.** Alaşehir-Sarıgöl civarının LOS deformasyon hızı: **A)** yükselen yörünge ve **B)** alçalan yörüngelere ait PS noktaları. **C)** yükselen ve **D)** alçalan yörüngelere ait İkinci Dereceden Bağ İnterpolasyonu ile yeniden haritalanmış LOS deformasyon haritası. Numaralandırılmış siyah yuvarlak işaretler ayrıştırma sonrası elde edilen düşey yönlü zaman serisi grafiklerin (Şekil 7) yerini göstermektedir.

**Figure 5.** LOS deformation rate of Alaşehir-Sarıgöl vicinity: PS points of **A)** ascending orbit and **B)** descending orbit. LOS deformation map remapped by Spline Interpolation for **C)** ascending and **D)** descending orbit (numbered black circles indicate location of vertical directional time series graphs (Figure 7) obtained after decomposition).

## TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, Alaşehir-Sarıgöl arasında PS-InSAR sonuçlarından elde ettiğimiz LOS hızları 2B hızlara dönüştürülerek yatay ve düşey hız vektörlerine ayrılmıştır. 2015 Mart ile 2023 Ocak arasında hesapladığımız yıllık ortalama düşey hız değerleri interpolasyon işlemiyle alansal hız

değerlerine dönüştürülmüş, -26 mm/yıl ile +1 mm/yıl arası değişen düşey hızlar elde edilmiştir (Şekil 6a). Koca vd. (2011)'in 2000 yılının yaz aylarında, deforme olan üst yapılardan alınan arazi ölçümleri düşey yer değiştirme hareketinin 20-45 cm, 2010 yılında aynı hatta ölçülen yer değiştirme miktarlarının ise 1,00-1,25 m olduğunu göstermiştir.



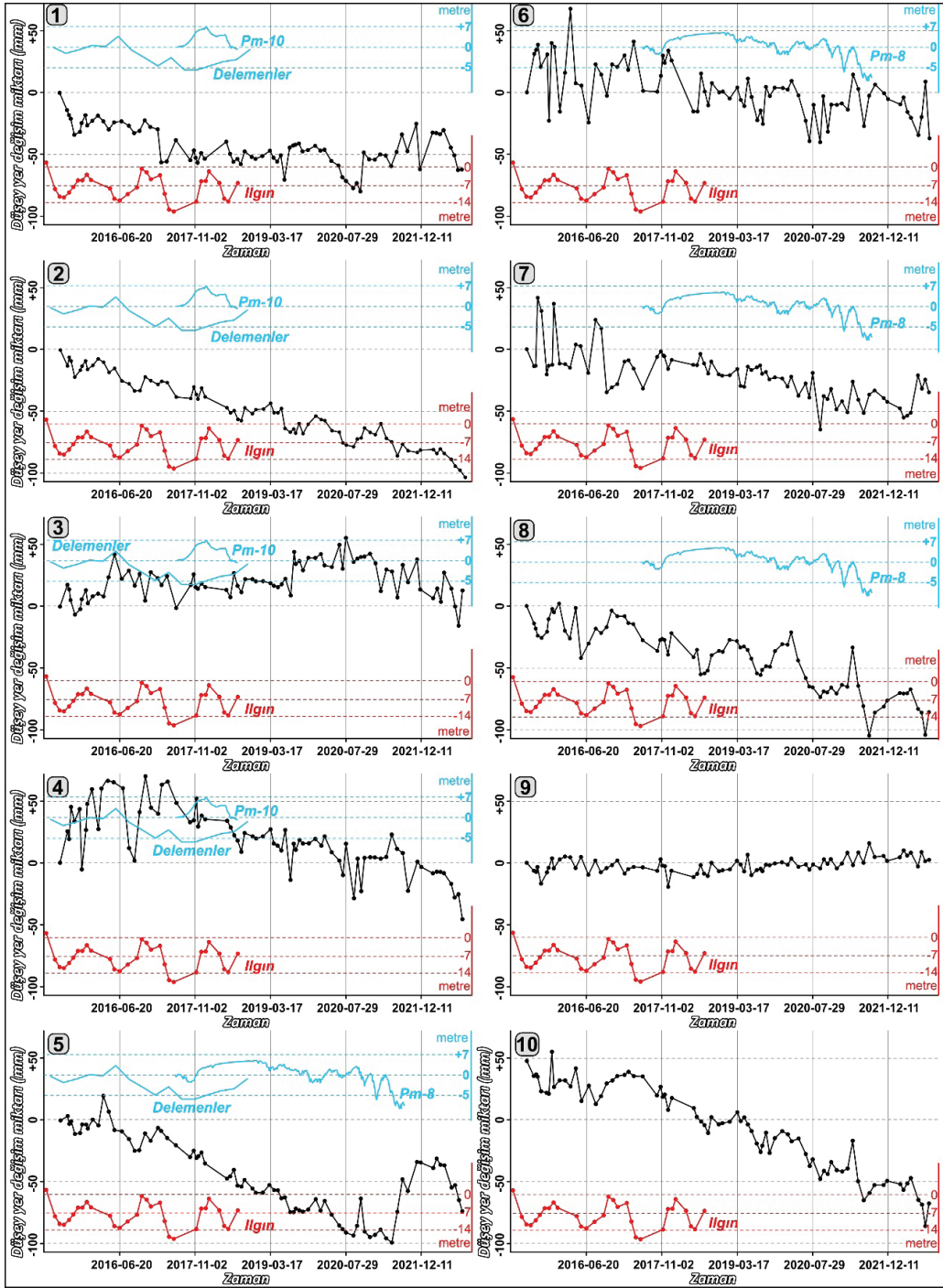
**Şekil 6.** Alaşehir-Sarıgöl civarının 2B ayrışmadan elde edilen **a)** düşey ve **b)** yatay (doğu-batı) deformasyon hızları. Numaralandırılmış siyah yuvarlak işaretler ayrıştırma sonrası elde edilen düşey yönlü zaman serisi grafiklerin (Şekil 7) yerini, dikdörtgenler ise ortalama hız değerleri ile topografyanın birlikte yorumlandığı Şerit Profil hatlarını (Şekil 8), üçgenler ise yeraltı su verilerinde kullanılan kuyu lokasyonlarını gösterir.

**Figure 6. a)** vertical and **b)** horizontal (east-west) deformation velocities of Alaşehir-Sarıgöl vicinity obtained from 2D decomposition. (Numbered black circles indicate location of vertical time series graphs (Figure 7) obtained after decomposition. Triangles represent well locations used in groundwater level of wells data. Rectangles indicate Swath profile lines (Figure 8), where average velocity values and topography are interpreted together).

Bu ölçümler, bina, duvar ve yol gibi ilksel formu bilinen üst yapılarda hesaplanmış ve toplam deformasyon miktarlarını yansıtmaktadır. Yazarların 2000 ve 2010 yılı arasındaki farklı deformasyon ölçümleri, bölgenin tarımsal faaliyetlerinin büyük bir ivmeyle artmasına ve sonuç olarak aşırı pompaj sonucu YAS düşmesine bağlanabilir. Yıllık deformasyon hızının en yüksek olduğu Sarıgöl merkezde dar bir zaman aralığında yapılan ölçümlere göre, çökme oranının maksimum 5,2 cm/yıl'a ulaştığı bilgisi de literatürde yer alan veriler arasındadır (Gören, 2016). Şekil 7'de yer alan grafiklerden de görüleceği üzere, mevsimsel döngülere denk gelen ve kısa dönemlerde yapılacak ölçümlerin 5 cm/yıl'ı aştığı görülmektedir. Sarıgöl mevkiinde GNSS ölçümleri 2013-2015 arası -90 mm/yıl (Poyraz vd., 2019), 2017-2020 arası 70-80 mm/yıl (Doğan vd., 2022) olan yıllık düşey hız değerleri sunar ve Alaşehir'e doğru gidildikçe sırasıyla -33 ve -13 mm/yıl'a düşmektedir

(Poyraz vd., 2019). Havzada gömülü Miyosen çökellerinin kalıtsal sınırı ile yüzey kırığının neden olduğunu düşündüğümüz alansal deformasyon arasındaki ilişkiyi anlamak amacıyla yaptığımız interpolasyon sonuçları (-26 mm/yıl ile +1 mm/yıl düşey hız), GNSS sonuçlarına göre farklı hız değerleri sunmaktadır. Bu farklılığın temel sebebi, interpolasyon öncesi toplanan verinin dağınık ve özellikle aşırı heterojen olduğu noktaları homojenize etmesinden kaynaklanır. PS-InSAR sonuçlarını Hızlı Fourier dönüşümü (*Fast Fourier transformation* (FFT)) algoritmasıyla hesaplayan bir çalışmada (Hastaoğlu vd., 2023) 60 mm/yıl (maksimum), başka bir çalışmada (Poyraz ve Hastaoğlu, 2020) ise LOS yönündeki -50 mm/yıl'lık çökme değeri elde edilmiştir. Bir diğer radar interferometri çalışmasında (Weiss vd., 2020) grabenin 20 mm/yıl hızla K-G doğrultuda genişlediği anlaşılmaktadır.





Şekil 7. 2B ayrışmadan elde edilen düşey yer değiştirme miktarları (siyah çizgiler) ve kuyulara ait yeraltı su seviyesi (mavi ve kırmızı çizgiler) grafikleri. Kuyu ve ölçüm lokasyonları için Şekil 6'ya bakınız. Veriler ilk ölçüm zamanları baz alınarak kümülatif olarak yerleştirilmiştir.

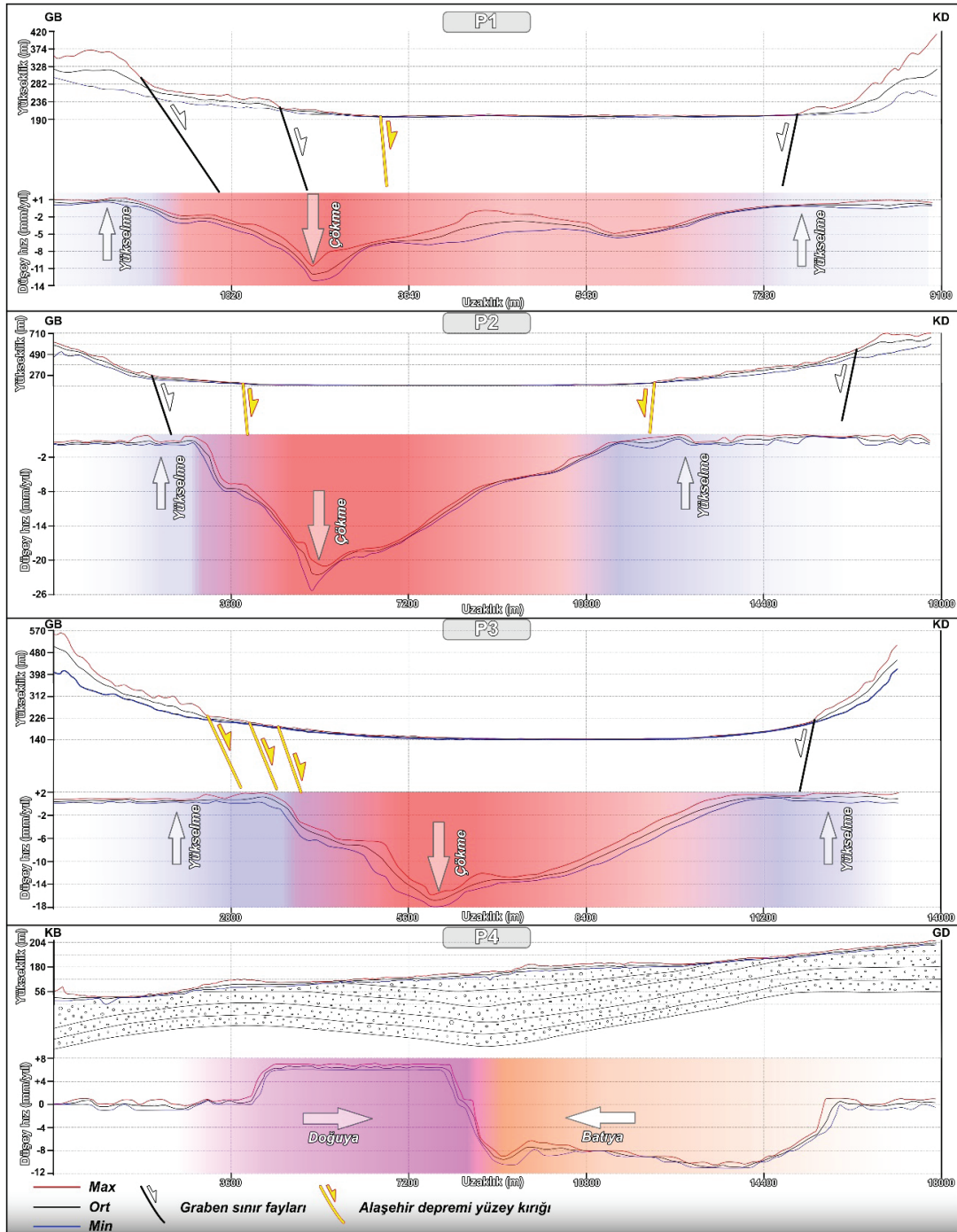
**Figure 7.** Graphs of vertical displacements obtained from 2D decomposition (black lines) and groundwater level (blue and red lines) of wells. (See Figure 6 for location of wells and measurements. Data are cumulatively placed based on times of first measurements).

Elde ettiğimiz 11 mm/yıl (batıya) ile 7 mm/yıl (doğuya) arasındaki yatay hareketler (Şekil 6b), Tiryakioğlu vd. (2019) tarafından 18 mm/yıl ile 29 mm/yıl arasında, Poyraz vd. (2019) da ise GB'ya 12 mm/yıl ile 27 mm/yıl arasında bulunmuştur. Hastaoğlu vd. (2023) genelde düşük miktarda yatay hareket ölçmesine rağmen, spesifik olarak Sarıgöl'ün KB'sinde küçük bir alanda 43 mm/yıl batıya hareket tespit etmiştir. Bu değerler arasındaki farklılıkların temel sebebi, daha önce yapılmış InSAR çalışmalarındaki ölçüm periyodları arasında zamansal farkın kısa olması ve GNSS ölçümlerinin doğası gereği yapılan göreceli plaka düzeltmeleri olarak düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, Poyraz vd. (2016; 2019; 2020)'nin sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, bölgedeki aktif tektonik rejim altında Bozdağ Horstu'nun yükselirken, grabenin de eş zamanlı olarak çöktüğü anlaşılmaktadır.

Önceki çalışmalarda kullanılan YAS verilerinin zamana bağlı değişim grafiği, bu çalışmada elde edilen yer değiştirme miktarı ile zamansal ölçeklendirme yapılarak denştirilmiştir (Şekil 7). Elde ettiğimiz sonuçlar, havza içerisinde deformasyon dağılımının her yerde eşit olmadığını (Şekil 6) ve buna nedenin ise yeraltı su seviyesinin alansal olarak değişkenlik göstermesi olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 7). Bu durumu araştırmak için, yeraltı su seviyesi değişimleri ile PS-InSAR kullanılarak elde edilen düşey hareket karşılaştırılmış, hidrojeolojik süreçlerin deformasyon üzerindeki etkisi anlaşılmasına çalışılmıştır (Şekil 7). Zaman çizelgesinde, yeraltı suyu seviyesindeki azalmanın, önceki çalışmalarda (Koca vd., 2011; Gören, 2016; Poyraz vd., 2015; 2016; 2019; Tiryakioğlu vd., 2019; Poyraz ve Hastaoğlu, 2020; Doğan vd., 2022; Hastaoğlu vd., 2023) da ifade edildiği gibi arazideki çökme hızıyla doğrudan ilişkili olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 7). Mevsimsel sezon değişikliklerinin meydana getirdiği yeraltı su seviyesi değişimleriyle, PS-InSAR sonuçları kullanılarak

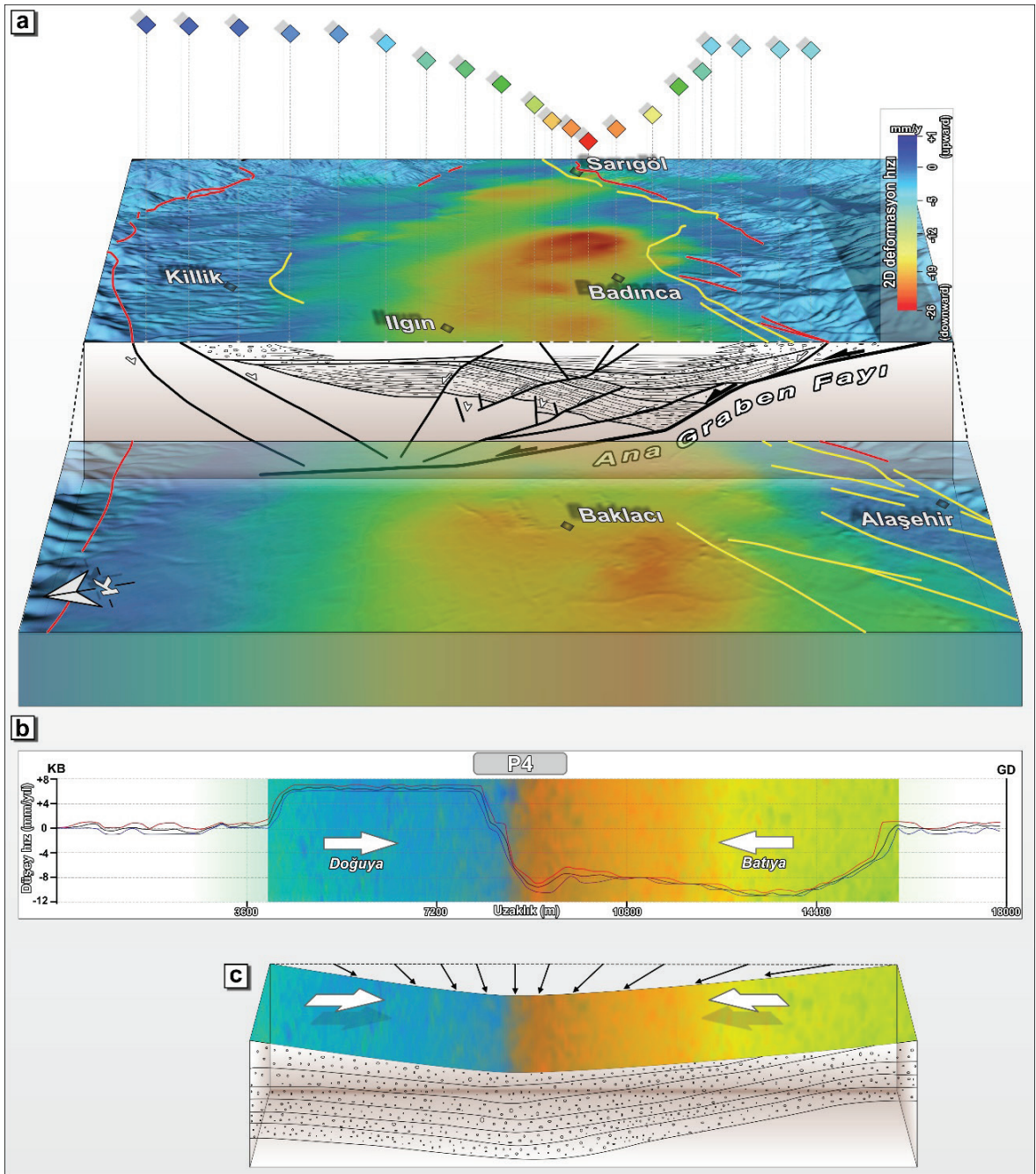
yapılan nokta bazlı zaman/hız değişim grafikleri genel olarak tutarlıdır. Grabenin kuzey kenarında yer alan Killik Fayı'ndaki aktivitenin, güney kenara göre göreceli olarak daha düşük olması da buna neden olan etmenlerden biridir. Bu durumu daha anlaşılabilir kılmak için, grabene dik ve paralel yönde alınan Şerit Profil (*Swath Profile*)'lerde (Şekil 8) bölgenin jeolojisi ve elde edilen sonuçlar birleştirilmiş, bu sayede fay geometrisinin neden olduğu deformasyon dağılımları yorumlanmıştır. Buna göre, Alaşehir'in batısı ile Sarıgöl'ün doğusu düşey yer değişimlerinin sifra yaklaştığı alanlardır. Bu sınırlardan merkeze ve güneye gidildikçe düşey ve yanal hızlarda artış gözlenmektedir (Şekil 8).

Sarıgöl yerleşim alanınınından geçen faylardan biri olan Sarıgöl Fayı'nın, karotlu sondajlardan elde edilen veriler ışığında teorik olarak listrik normal fay geometrisine sahip olduğu belirtilmiştir (Koca vd., 2011). Şekil 9a'da da görüldüğü üzere, havzanın güney kenarından (-26 mm/yıl) kuzeye doğru gidildikçe (-3 mm/yıl) düşey yönlü deformasyon oranındaki azalma, listrik normal fay geometrisi teorisini desteklemektedir. Bu durum, havza içine ilerleyen listrik fay düzleminin eğiminin azalmasıyla birlikte deprem sonucu gelişen atım miktarının da azalmasıyla açıklanabilir. Bu da intersismik dönem sırasında çökel kayalardaki oturma miktarının, havza içine ve fayın bitim noktasına doğru azalması anlamına gelir. Bu nedenle grabenin güney kenarından kuzey kenarına doğru ortalama hız değerlerinin azaldığı düşünülmüştür. Havzanın listrik fay geometrili yapısal kontrol altında geliştiğini aktaran bir diğer çalışma da Çiftçi ve Bozkurt (2010)'a aittir. Alaşehir'in güneyinde, ana graben fayı olarak adlandırılan ve havza kenarında yer alan yüksek açılı faylarla birlikte çalışan bu fayın, çalışmacıların yorumladığı TPAO sismik kesitlerine göre de listrik geometriye sahip bir fay olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 9a).



**Şekil 8.** 2B ayrışmadan elde edilen düşey (P1, P2, P3) ve yatay (P4) yer değiştirme hızlarının, ana yapısal hatlarla birlikte çizilmiş enine kesitleri. Topografya ve PS-InSAR sonuçları 1 km genişlikteki şerit profil ile alınmıştır. Profil hatları için Şekil 6'ya bakınız.

**Figure 8.** Cross-sections of vertical (P1, P2, P3) and horizontal (P4) displacement velocities obtained from 2D decomposition, plotted with main structural lines. (Topography and PS-InSAR results were obtained with a 1 km wide swath profile. See Figure 6 for swath profile line locations).



**Şekil 9. a)** Gediz Grabeni'nin GD kesimindeki yapısal elemanlar ve düşey çökme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren şematik tektonik model (model, bu çalışma kapsamında elde edilen 2B hız haritası ve Çiftçi ve Bozkurt (2010)'da verilen enine jeolojik kesitin korelasyonu ile çizilmiştir). **b)** Çökmenin yatay düzlemde radyal yayılımla olduğunu gösteren P4 kesiti ve **c)** şematik blok InSAR modeli.

**Figure 9. a)** Schematic tectonic model showing relationship between existing structural elements and vertical subsidence velocity in SE section of Gediz Graben (tectonic model was drawn by correlating the 2D velocity map obtained within scope of this study and geological cross-section given in Çiftçi and Bozkurt (2010)). **b)** P4 section and **c)** schematic InSAR model showing that the collapse occurred with radial bulging in horizontal plane.

Bu da Alaşehir-Sarıgöl arası meydana gelen yer hareketlerinin bu fayların geometrisi ile doğrudan ilişkili olma nedenini güçlendirir. Ayrıca güney kenara doğru artan, havzanın içine doğru azalan düşey deformasyonların, yüksek açılı fayların listrik geometri ile ana graben fayının tavan bloğundaki domino tarzı (Çiftçi ve Bozkurt, 2009b) bir geri dönüş sürecinden kaynaklanmış olacağı da düşünülebilir.

Literatürde yer alan yatay hareket hızları genellikle bölgenin KD-GB yönlü açılmasına eşlik eden KB-GD yönlü sıkışmalarla açıklanmaya çalışılmıştır (Tiryakioğlu vd., 2019; Poyraz vd., 2019). PS-InSAR sonuçlarından elde edilen 11 mm/yıl (batıya) ile 7 mm/yıl (doğuya) arasındaki yatay hareketler, batı bölümün doğuya ve doğu bölümünün de batıya doğru yer değiştirdiğini göstermektedir. Maksimum çökme hızının gözlemlendiği alanda zıt yönlü (D-B) yatay hareketlerdeki çakışma, çökmenin yatay düzlemde radyal yanıl yayılımla, düşeyde ise senformal geometride gerçekleştiğini düşündürür (Şekil 9b ve c). Bu nedenle yatay hareketin bölgedeki KB-GD yönlü sıkışmadan ziyade, havzanın çökme rejimini doğrudan kontrol eden güney kenar faylarının geometrisi ve türüyle ilişkili olduğu düşünülmüştür. Havza içinde olduğu düşünülen senformlar, genişleme kıvrımlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu kıvrımlar, Gediz Grabeni'nin genel eğilimine göre boyuna veya enine yapılar olarak meydana gelebilir (Çiftçi ve Bozkurt, 2008). Gediz Grabeni'nin yapısal evriminin Miyosen'den günümüze kadar, güney kenar fayları ile yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir (Çiftçi ve Bozkurt, 2009b). Çiftçi ve Bozkurt (2010), Alaşehir ve Salihli alt havzalarının farklı tortul kalınlıklarına sahip olmalarını, oluşumları sırasındaki zamansal fark ile açıklamaktadır. Bu kapsamda ele alındığında, Şekil 6 ve 9'de görülen deformasyonların Alaşehir'in batısından itibaren gözükmemesi, bu iki alt havzanın, aralarında meydana gelen örtülü yarı düşey bir fayla

sınırlanmış (Çiftçi ve Bozkurt, 2010) olmasına bağlanabilir.

Aktif fayların konumları çökme modelinin konumsal dağılımıyla (Şekil 6) ve yeraltı su seviyesi değişimleri (Şekil 7) ile bazı yerlerde uyum içindedir. Uyumsuz olan alanlar bölgede tarımsal sulama amacıyla kullanılan yeraltı su çekimi dışında, zemin deformasyon süreçlerinin de doğal tektonik faktörler tarafından kontrol edildiği varsayımını güçlendirir. 1, 2, 5, 8 ve 9 numaralı ölçüm noktalarında (Şekil 6a ve Şekil 7) yeraltı su seviyesi değişimlerinde tutarsızlık gözlenmesi, bu noktaların Alaşehir depremi ile oluşmuş yüzey kırıklarına yakın olmasından, bu alanlarda meydana gelen deformasyonların önemli bir bölümünün ise tektonik etkiler altında meydana gelmesinden kaynaklanabilir. Ayrıca, düşey ve yatay yer değiştirmelerin, Gediz Grabeni'ni sınırlayan yüksek açılı faylar ve 1969 Alaşehir depreminde meydana gelen yüzey kırıklarıyla morfolojik olarak sınırlanmış olduğu da görülmektedir (Şekil 6). Bu da tespit ettiğimiz deformasyonların büyük oranda tektonik kökenli a-sismik deformasyonlar olduğunu göstermektedir. Eravcı vd. (2009) düşey yer değiştirmeleri, normal bileşenli fayın olağandışı a-sismik hareketlerine bağlamıştır. Fakat elde ettiğimiz sonuçlarla, deformasyonların sadece diri fayların yüzeye ulaştığı alanlarla kısıtlı olmadığı, fay düzleminin yatay ve düşey deformasyonlarla tavan bloğunu kontrol ettiği anlaşılmıştır (Şekil 8 ve Şekil 9a).

Sonuç olarak, güncel hareket hızlarıyla Alaşehir-Sarıgöl arasında çökme ve yanıl yayılım sonucu meydana gelen deformasyonların, 1969 Alaşehir depremindeki yüzey kırıklarıyla sınırlanması tesadüf değildir. Sarıgöl fayı boyunca yapılan jeolojik ve jeodezik gözlemler, Doğan vd. (2022)'nin de belirttiği gibi, 1969 Alaşehir depreminin kosismik evresinde gelişen sismik kaymaya ek olarak, günümüze kadar devam eden intersismik dönemde a-sismik kayma ile önemli bir gerilme açığa çıkmış olabilir. Bölgedeki

tektonik aktivite geçmişi ve Miyosen'den kalan kalıtsal izlerin varlığı, güncel deformasyonların gelişimine halen etki etmektedir. Bu nedenle mevcut deformasyonları tek başına yeraltı su seviyesi değişimlerine bağlamak eksik modellemelere neden olabilir. Fakat yeraltı su seviyesi değişimlerinin fazla olduğu alanlarda tektonik kontrol altında gelişen çökme olaylarının daha da hızlandığı anlaşılmaktadır. Tektonik krip, büyük depremler için olası bir tetikleyici faktör ve deprem öncüsü olarak tanımlanmaktadır (Radiguet vd., 2016). Bu türden bir a-sismik deformasyon zaman içinde yavaş yavaş büyüyen yapısal hasarlar meydana gelebilmektedir. Günümüzde, bölgedeki deformasyon oranındaki artış, 1990'lı yıllardan bugüne kadar dönemsel olarak yaşanan kuraklık ve yeraltından aşırı su çekilmesi nedeniyle mevcut yeraltı su seviyesinin hızla düşüşüyle artmıştır. Bu da uzun intersismik dönemde meydana gelecek yavaş deformasyonun, sediman konsolidasyonunu hızlandırarak çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesine neden olacaktır. Seviye değişimleri, bölgedeki jeotermal faaliyet ve yapısal elemanlar da dikkate alınarak düşünülmeli, a-sismik olarak hareket eden diri fay hatları üzerinde tampon alanlar oluşturma kriterleri yeniden ele alınmalı ve üst yapı rezerv alanlarının belirlenmesinde mutlaka çok disiplinli çalışmalar yapılmalıdır.

### **EXTENDED SUMMARY**

*It is noteworthy that a significant part of the a-seismic surface deformations developed in recent years, especially in Western Anatolia, follow old surface ruptures. It is possible to list the locations of a-seismic surface deformations occurring in the grabens in the Western Anatolia Extensional Province (WAEP) (Eyidoğan and Jackson, 1985; Şengör et al., 1985; Şengör, 1987; Jackson and McKenzie, 1988; Ambraseys, 1988; Reilinger et al., 1997; McClusky et al., 2000; Bozkurt, 2001a; Taymaz et al., 2007; Biryol et al.,*

*2011) and reported in the last 30 years as follows: Gediz (Alaşehir), Küçük Menderes, Büyük Menderes, Burdur, Gülovası and Afyon-Akşehir grabens (Figure 1). For example, geodetic and paleoseismological data were obtained in Bolvadin (Afyon-Akşehir Graben) indicating that surface deformations developed on the old surface rupture of the Bolvadin Fault, shown with the star number 2 in Figure 1b (Özkaymak et al., 2017). In the area between Alaşehir and Sarıgöl located within the Gediz (Alaşehir) Graben, which is the subject of this study, and where surface deformations are observed, there is a surface rupture of the 1969 earthquake (M: 6.9), just like in the Bolvadin Fault example (Figure 2a). Based on this, investigating the deformation-surface rupture relationship similar to that put forward by Özkaymak et al. (2017) in the area between Alaşehir and Sarıgöl formed the basis of this study.*

*In this study, the surface deformations in the region between Alaşehir and Sarıgöl districts were examined using the Persistent Scatter-InSAR (PS-InSAR) method, and the active tectonics of the region and causes of current deformations were discussed with field studies. With the images obtained over a long period, the relationship between the cracks that developed in Sarıgöl after the heavy rain and hail on October 18, 2020 and the surface ruptures formed as a result of the 1969 Alaşehir earthquake and the subsidence geometry of the graben are discussed. In addition to field studies, all data obtained using PS-InSAR were evaluated together with geological, hydrogeological, geophysical and geodetic studies to measure the extent and speed of the destruction observed in the Sarıgöl-Aşağı Koçaklar neighborhood, and the effects of long-term deformations developing in the region were interpreted. A tectonic subsidence model has been created by combining all the findings obtained from all these correlations. This study aims to provide a different perspective for future studies by revealing for the first time a tectonic model*

associated with the subsidence geometry of the region. In addition, it is now understood that the subsidence geometry in graben-type basins that developed under active tectonic effects, not only controlled by groundwater level and faults but also old hereditary structures, played a major role in deformation distribution.

With the PS-InSAR process performed in the 1100 km<sup>2</sup> area between Alaşehir-Sarıgöl, 10508 PS and 8508 PS data points were obtained in ascending and descending orbits, respectively (Figure 5a and b). The average point density is 9.5 and 7.73 PS/km<sup>2</sup> for ascending and descending orbits, respectively. While similar LOS velocity points of both lines indicate vertical deformation, areas showing different spatial patterns represent horizontal displacement (Figure 5). As shown in Figure 5a and b, it is difficult to estimate the ground displacement using PS-InSAR in the agricultural areas within the graben due to the high temporal unconformity. The LOS annual velocity values remodeled by Spline Interpolation are between -28.9 mm/y and +9.3 mm/y for the ascending orbit, and it ranges from -16.5 mm/y to +9.3 mm/y for the descending orbit (Figure 5c and d). Vertical displacements obtained by 2D decomposition of LOS measurements during the 2015-2023 period allowed us to determine the annual average vertical deformation rate on the graben in the range of mm/year. The 2D results prepared with the equation given in Equation (1) for ascending and descending orbits reflect the annual displacement amounts in a vertical (Figure 6a) and E-W direction (Figure 6b). Annual average vertical deformation rates in the areas where reflections are intense are between -16.92 and -6.94 mm/y in the center of Alaşehir and between -12.8 and 0.8 mm/y in the center of Sarıgöl (Figure 6a). Considering the vertical deformation rates, the highest subsidence rate was found in the Üzümlü village in Alaşehir with -26 mm/y. The 2D decomposition of LOS measurements with respect to the horizontal

east-west displacement showed that the average annual horizontal deformation rate was 11 mm/y (westward) and 7 mm/y (eastward) (Figure 6b). On the other hand, horizontal displacements were detected with velocities ranging between 6-4 mm/y in the area where cracks occurred in Sarıgöl on October 18, 2020. Accordingly, it is understood that under the active tectonic regime in the region, while the Bozdağ Horst uplifted, the graben collapsed simultaneously.

Point-based time/velocity variation graphs using PS-InSAR results are generally consistent with groundwater level changes caused by seasonal changes. The fact that the activity on the Killik Fault on the northern edge of the graben is relatively lower than on the southern edge is one of the factors causing this. In order to make this situation more understandable, the geology of the region and the results obtained from the Swath Profiles (Figure 8) taken in the perpendicular and parallel directions to the graben were combined thus the deformation distributions caused by the fault geometry were interpreted. According to this, west of Alaşehir and east of Sarıgöl are the areas where vertical displacements approach zero. Vertical and lateral velocities increase as we go from these borders to the center and south (Figure 8).

It has been stated that the Sarıgöl Fault, one of the faults passing through the Sarıgöl settlement area, theoretically has a listric normal fault geometry in the light of the data obtained from core drillings (Koca et al., 2011). As seen in Figure 9, the decrease in the vertical deformation rate from the southern edge of the basin (-26 mm/y) to the north (-3 mm/y) supports the theory of listric normal fault geometry. This situation can be explained by the decrease in the dip of the listric fault plane advancing into the basin will also decrease the amount of offset caused by the earthquake. This means that the amount of consolidation in the sedimentary rocks during the interseismic period decreases into the basin

towards the end of the fault. Therefore, it is thought that the average velocity values decrease from the southern edge of the graben to the northern edge. Another study reporting that the basin developed under structural control with listric fault geometry belongs to Çiftçi and Bozkurt (2010). This fault, which is called the main graben fault in the south of Alaşehir and operates together with the high-angle faults located at the edge of the basin, is understood to be a fault with listric geometry, according to the TPAO seismic sections interpreted by the researchers (Figure 9a). This strengthens the reason why the ground movements occurring between Alaşehir and Sarıgöl are directly related to the geometry of these faults. In addition, the vertical deformations, which increase towards the southern margin and decrease towards the interior of the basin, indicate that the high-angle faults are caused by a domino-like (Çiftçi and Bozkurt, 2009b) return process in the hanging-wall of the main graben fault with listric geometry.

The horizontal movement rates in the literature generally try to be explained by the NW-SE directional compressions accompanying the NE-SW directional extension of the region (Tiryakioğlu et al., 2019; Poyraz et al., 2019). The horizontal movements between 11 mm/y (westward) and 7 mm/y (eastward) obtained from PS-InSAR results indicate that the western section is displaced eastward and the eastern section is displaced westward. The overlap in opposite horizontal movements (E-W) in the area where the maximum collapse velocity is observed suggests that the collapse occurred with radial bulging in the horizontal plane and in synformal geometry in the vertical (Figure 9b and c). Therefore, it is thought that the horizontal movement is related to the geometry and type of the southern margin faults, which directly control the subsidence regime of the basin, rather than the NW-SE directional compression in the region. The synforms which are thought to be within the basin are directly related to the extensional folds. These folds may occur as

longitudinal or transverse structures according to the general trend of the Gediz Graben (Çiftçi and Bozkurt, 2008). It is thought that the structural evolution of the Gediz Graben is closely related to the southern margin faults from the Miocene to the present (Çiftçi and Bozkurt, 2009b). The fact that Alaşehir and Salihli sub-basins have a different sedimentary thickness is explained by Çiftçi and Bozkurt (2010) with the temporal difference in the formation of these basins. In this context, the fact that the deformations seen in Figures 6 and 9 are not visible from the west of Alaşehir can be attributed to the fact that these two sub-basins are bounded by a covered semi-vertical fault (Çiftçi and Bozkurt, 2010).

In some places, the locations of active faults are compatible with the spatial distribution of the subsidence model (Figure 6) and groundwater level changes (Figure 7). Incompatible areas strengthen the assumption that ground deformation processes are also controlled by natural tectonic factors, apart from groundwater abstraction used for agricultural irrigation in the region. Observation of the inconsistencies in groundwater level changes at measurement points 1, 2, 5, 8 and 9 (Figure 6a and 7) may be due to the fact that these points are close to the surface ruptures formed by the Alaşehir earthquake and a significant part of the deformations occurring in these areas occur under tectonic effects. It is also seen that the vertical and horizontal displacements are morphologically constrained by the high angle faults bounding the Gediz Graben and the surface ruptures that occurred in the 1969 Alaşehir earthquake (Figure 6). This indicates that the deformations we detected are mostly a-seismic deformations of tectonic origin. Eravcı et al. (2009) attributed the vertical displacements to the unusual a-seismic movements of the fault with a normal component. However, with the results we obtained, it was easily understood that the deformations were not limited to the areas where the active faults reached the surface, and



that the fault plane controlled the hanging-wall with horizontal and vertical deformations (Figure 8 and 9a).

Consequently, it is not a coincidence that the deformations occurring as a result of subsidence and lateral spreading between Alaşehir-Sarıgöl and current movement rates are bounded by the surface ruptures of the 1969 Alaşehir earthquake. As Doğan et al. (2022) also stated, in addition to the seismic slip that developed in the coseismic phase of the 1969 Alaşehir earthquake, a significant stress may have been released by a-seismic slip in the interseismic phase that continues today. The history of tectonic activity in the region and the presence of hereditary traces from the Miocene still affect the development of current deformations. Therefore, attributing the existing deformations to groundwater level changes alone may lead to incomplete modelling. However, it is understood that the subsidence events developing under tectonic control accelerate in areas where groundwater level changes are high. Tectonic creep is defined as a possible triggering factor and earthquake precursor for large earthquakes (Radiguet et al., 2016). This kind of a-seismic deformation can cause structural damage that grows gradually over time.


Today, the deformation rate in the region has increased due to the rapid decrease in the existing groundwater level due to periodic drought from the 1990s to the present and excessive withdrawal of water from the underground. This will cause the slow deformation that will occur in the long interseismic phase to occur much faster by accelerating sediment consolidation. In order to eliminate such risks, groundwater level changes should be evaluated by taking into account the geothermal activity and structural elements in the region, the criteria for creating buffer zones on a-seismically moving active faults should be reconsidered, and multidisciplinary studies should be carried out in determination of superstructure reserve areas.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Semih ESKİ tarafından Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı olarak yürütülen doktora tezi kapsamında hazırlanmıştır. Yayının yazım aşamasındaki destek ve katkılarından ötürü Dr. Çiğdem TEPE, Doç. Dr. Ökmen SÜMER ve Dr. Atilla ONGAR'a, makalenin bilimsel açıdan kalitesini arttıracak katkılar sağlayan dergi hakemlerine ve "Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı" konuk editörü Oğuz GÖĞÜŞ'e teşekkür ederiz.

## ORCID

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

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

## KAYNAKLAR / REFERENCES

- Abdikan, S., Arıkan, M., Sanli, F. B. & Cakir, Z. (2014). Monitoring of coal mining subsidence in peri-urban area of Zonguldak city (NW Turkey) with persistent scatterer interferometry using ALOS-PALSAR. *Environmental Earth Sciences*, 71, 4081-4089.
- Akoğlu, A. M., Jónsson, S., Wang, T., Çakır, Z., Dogan, U., Ergintav, S., ... & Emre, Ö. (2018). Evidence for tear faulting from new constraints of the 23 October 2011 Mw 7.1 Van, Turkey, earthquake based on InSAR, GPS, coastal uplift, and field observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(4), 1929-1946. <https://doi.org/10.1785/0120170314>
- Ali, M., Shahzad, M. I., Nazeer, M., Mahmood, I. & Zia, I. (2021). Estimation of surface deformation due to Pasni earthquake using RADAR interferometry. *Geocarto International*, 36(14), 1630-1645.
- Ambraseys, N. N. (1988). Engineering Seismology. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 17, 1-105.
- Anderson, E. R., Griffin, R. E. & Irwin, D. E. (2016). Implications of different digital elevation models and preprocessing techniques to delineate debris flow inundation hazard zones in El Salvador. *Natural Hazard Uncertainty Assessment: Modeling and Decision Support*, 167-177.

- 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.
- Arpat, E. ve Bingöl, E. (1969). Ege Bölgesi graben sisteminin gelişimi üzerine düşünceler. *Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) Bulletin*, 73, 1-8.
- ASF (Alaska Satellite Facility), 2019. <https://search.asf.alaska.edu/#/>, 10 Mart 2019.
- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C. & Renard, F. (2019). Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing*, 11(1), 85.
- Asti, R., Malusà, M. G. & Faccenna, C. (2018). Supradetachment basin evolution unravelled by detrital apatite fission track analysis: the Gediz Graben (Menderes Massif, Western Turkey). *Basin Research*, 30(3), 502-521.
- Barka, A. & Reilinger R. (1997). Active Tectonics of Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali Di Geofisica*, X2(3), 587-610.
- Bayık, C., Abdikan, S., Ozdemir, A., Arıkan, M., Balık Sanlı, F. & Doğan, U. (2021). Investigation of the landslides in Beylikdüzü-Esenyurt Districts of Istanbul from InSAR and GNSS observations. *Natural Hazards*, 109(1), 1201-1220.
- Bayramov, E., Buchroithner, M., Kada, M. & Zhuniskenov, Y. (2021). Quantitative assessment of vertical and horizontal deformations derived by 3d and 2d decompositions of insar line-of-sight measurements to supplement industry surveillance programs in the tengiz oilfield (Kazakhstan). *Remote Sensing*, 13(13), 2579.
- Beccaletto, L. & Steiner, C. (2005). Evidence of two-stage extensional tectonics from the northern edge of the Edremit Graben, NW Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 283-297.
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J. & Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Biryol, C. B., Beck, S. L., Zandt, G. & Özacar, A. A. (2011). Segmented African lithosphere beneath the Anatolian region inferred from teleseismic P-wave tomography. *Geophysics Journal International*, 184(3), 1037-1057.
- Blasco, J.M.D., Fomelis, M., Stewart, C. & Hooper, A. (2019). Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing* 11(2), 17.
- Bodur, Ö., Göğüş, O. H., Brune, S., Uluocak, E. Ş., Glerum, A., Fichtner, A. & Sözbilir, H. (2023). Crustal flow driving twin domes exhumation and low-angle normal faulting in the Menderes Massif of western Anatolia. *Earth and Planetary Science Letters*, 619, Article 118309.
- Bozkurt, E. (2000). Timing of Extension on the Büyük Menderes Graben, western Turkey and its tectonic implications. *Geological Society London*, 173, 385-403.
- Bozkurt, E. (2001a). Neotectonics of Turkey - a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14, 3-30.
- Bozkurt, E. (2001b). Late Alpine evolution of the central Menderes Massif, western Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 728-744.
- Bozkurt, E. (2003). Origin of NE-trending basins in western Turkey. *Geodinamica Acta*, 16(2-6), 61-81.
- Bozkurt, E. (2004). Granitoid rocks of the southern Menderes Massif (southwestern Turkey): field evidence for Tertiary magmatism in an extensional shear zone. *International Journal of Earth Sciences*, 93(1), 52-71.
- Bozkurt, E. & Rojay, B. (2005). Episodic, two-stage Neogene extension and short-term intervening compression in Western Turkey: field evidence from the Kiraz Basin and Bozdağ Horst. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 299-316.
- Bozkurt, E. & Sözbilir, H. (2004). Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic,

- two-stage extension in western Turkey. *Geological Magazine*, 141(1), 63-79.
- Bozkurt, E. & Sözbilir, H. (2006). Evolution of the large-scale active Manisa Fault, Southwest Turkey: implications on fault development and regional tectonics. *Geodinamica Acta*, 19(6), 427-453.
- Bozkurt, E., Winchester, J. A., Mittweide, S. K. & Ottley, C. J. (2006). Geochemistry and tectonic implications of leucogranites and tourmalines of the southern Menderes Massif, Southwest Turkey. *Geodinamica Acta*, 19(5), 363-390.
- Bozzano, F., Carabella, C., De Pari, P., Discenza, M. E., Fantucci, R., Mazzanti, P., ... & Sciarra, N. (2019). Geological and geomorphological analysis of a complex landslides system: the case of San Martino sulla Marruccina (Abruzzo, Central Italy). *Journal of Maps*, 16(2), 123-136. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1702596>
- Buscher, J. T., Hampel, A., Hetzel, R., Dunkl, I., Glotzbach, C., Struffert, A., Akal, C. & Rätz, M. (2013). Quantifying rates of detachment faulting and erosion in the central Menderes Massif (western Turkey) by thermochronology and cosmogenic <sup>10</sup>Be. *Journal of the Geological Society*, 170(4), 669-683. <https://doi.org/10.1144/jgs2012-132>
- Chen, C. W. & Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709-1719.
- Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C. & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Çağlayan, A., Isik, V. & Saber, R. (2019). An assessment of Holocene seismic activity on 1944 Earthquake Segment, North Anatolian Fault Zone (Turkey). *Geosciences Journal*, 23, 805-822.
- Çakır, Z., Chabaliér, J. B. D., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A. & Peltzer, G. (2003). Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations. *Geophysical Journal International*, 155(1), 93-110.
- Çelik, H. (1991). Akarsuların (vadi) profil özellikleri ile eski tabanlar arasındaki ilişkiler üzerine araştırmalar. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 43(2), 101-130.
- Çetin, E., Çakır, Z., Meghraoui, M., Ergintav, S. & Akoglu, A. M. (2014). Extent and distribution of aseismic slip on the İsmetpaşa segment of the North Anatolian Fault (Turkey) from Persistent Scatterer InSAR. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(7), 2883-2894.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2007). Anomalous stress field and active breaching at relay ramps: a field example from Gediz Graben, SW Turkey. *Geological Magazine*, 144(4), 687-699.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2008) Folding of the Gediz Graben Fill, SW Turkey: Extensional and/or Contractual Origin?. *Geodinamica Acta*, 21(3), 145-167.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2009a). Evolution of the Miocene sedimentary fill of the Gediz Graben, SW Turkey. *Sedimentary Geology*, 216(3-4), 49-79.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2009b). Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. *Tectonophysics*, 473(1-2), 234-260.
- Çiftçi, N. B. & Bozkurt, E. (2010). Structural evolution of the Gediz Graben, SW Turkey: temporal and spatial variation of the graben basin. *Basin Research*, 22(6), 846-873.
- Dai, F., Lee, C. & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1): 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
- Dănişor, C., Datcu, M. & Dănişor, A. (2018). Estimation of terrain's linear deformation rates using synthetic aperture radar systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 400(2), 022018. IOP Publishing.
- De Novellis, V., Carlino, S., Castaldo, R., Tramelli, A., De Luca, C., Pino, N.A., Pepe, S.; Convertito, V., Zinno, I. & De Martino, P. (2018). The 21 August 2017 Ischia (Italy) earthquake source model inferred from seismological, GPS,

- and DInSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 45(5), 2193–2202. <https://doi.org/10.1002/2017GL076336>
- Dewey, J. F. & Şengör, A. M. C. (1979). Aegean and surrounding regions: complex multiplate and continuum tectonics in a convergent zone. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 84–92.
- Dilek, Y., Altunkaynak, S. & Öner, Z. (2009). Syn-extensional granitoids in the Menderes core complex and the late Cenozoic extensional tectonics of the Aegean province. In: Ring, U., Wernicke, B. (Eds.), *Extending a Continent: Architecture, Rheology and Heat Budget*. Geological Society of London Special Publications, 321, 197–223.
- Doğan, A., Kaygusuz, Ç., Tiryakioğlu, İ., Yigit, C. O., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. & Turgut, B. (2022). Geodetic evidence for aseismic fault movement on the eastern segment of the Gediz Graben system (western Anatolia extensional province, Turkey) and its significance for settlements. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 57(3), 461–476.
- Doğru, F. (2020). The Importance of Atmospheric Corrections on InSAR Surveys Over Turkey: Case Study of Tectonic Deformation of Bodrum-Kos Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 177(12), 5761–5780.
- Dumont, J. F., Uysal, S., Şimşek S., Karamandersi, I. H. ve Letouzey, F. (1979). Güneybatı Anadolu'daki grabenlerin oluşumu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 92, 7–17.
- Elliott, J. R., Walters R. J. & Wright, T. J. (2016). The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature Communications*, 7, Article 13844.
- 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>
- Emre, T. & Sözbilir, H. (2007). Tectonic evolution of the Kiraz Basin, Küçük Menderes Graben: evidence for compression/uplift-related basin formation overprinted by extensional tectonics in West Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16(4), 441–470.
- Eravcı, B., Erkmen, C., Yaman, M., Tüzel, B. & Iravul, Y. (2009). The Origin of Ground Deformations that Caused Damage at Sarigol-Manisa-Turkey. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2655.
- Erkül, F., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2005). Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadiç borate basin and tectonic implications for western Turkey. *Geological Journal*, 40(5), 545–570.
- Ersoy, E. Y. & Helvacı, C. (2007). Stratigraphy and geochemical features of the Early Miocene bimodal (ultrapotassic and calc-alkaline) volcanic activity within the NE-trending Selendi Basin, Western Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 117–139.
- Ersoy, E. Y., Helvacı, C. & Sözbilir, H. (2010). Tectono-stratigraphic evolution of the NE–SW-trending superimposed Selendi basin: Implications for late Cenozoic crustal extension in Western Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 488(1–4), 210–232.
- Eyidoğan, H. (1988). Rates of crustal deformation in western Turkey as deduced from major earthquakes. *Tectonophysics*, 148(1–2), 83–92.
- Eyidoğan, H. & Jackson, J. A. (1985). A seismological study of normal faulting in the Demirci, Alaşehir ve Gediz earthquake of 1969–1970 in western Turkey: implications for the nature and geometry of deformation in the continental crust. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 81, 569–607.
- Fattahi, H. (2015). *Geodetic Imaging of Tectonic Deformation With InSAR* [PhD Thesis]. University of Miami, Florida.
- Fernandez, J., Prieto, J. F., Escayo, J., Camacho, A. G., Luzón, F., Tiampo, K. F., ... & Mallorquí, J. J. (2018). Modeling the two- and three-dimensional displacement field in Lorca, Spain, subsidence and the global implications. *Scientific Reports*, 8(1), Article 14782. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33128-0>
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Fialko, Y. (2006). Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San

- Andreas fault system. *Nature*, 441(7096), 968-971.
- Forster, M. & Lister, G. (2009). Core-complex-related extension of the Aegean lithosphere initiated at the Eocene-Oligocene transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B2). Article B02401. <https://doi.org/10.1029/2007JB005382>
- Genç, C. Ş., Altunkaynak, Ş., Karacık, Z., Yazman, M. & Yılmaz, Y. (2001). The Çubukludağ graben, south of İzmir: its tectonic significance in the Neogene geological evolution of the western Anatolia. *Geodinamica Acta*, 14(1-3), 45-55.
- 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.
- Gessner, K., Piazzolo, S., Güngör, T., Ring, U., Kroner, A. & Passchier, C.W. (2001a). Tectonic significance of deformation patterns in granitoid rocks of the Menderes nappes, Anatolide belt, southwest Turkey. *International Journal of Earth Sciences* 89, 766-780.
- Gessner, K., Ring, U., Johnson, C., Hetzel, R., Passchier, C.W. & Güngör, T. (2001b). An active bivergent rolling-hinge detachment system: central Menderes metamorphic core complex in western Turkey. *Geology*, 29, 611-614.
- Gezgin, C. (2022). The influence of groundwater levels on land subsidence in Karaman (Turkey) using the PS-InSAR technique. *Advances in Space Research*, 70(11), 3568-3581.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A. & Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 713-720.
- Göktaş, F. ve Hakyemez, Y. (2015). Kemalpaşa (İzmir) Pliyo-Kuvaterner Havzasının Stratigrafik Evrimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 58(2), 1-28. <https://doi.org/10.25288/tjb.298498>
- Gören, R. (2016). *Alaşehir ve çevresinde Gediz grabeni güney kenar faylarının holosen aktivitesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Gürboğa, Ş. D., Koçyiğit, A. & Ruffet, G. (2013). Episodic two-stage extensional evolutionary model for southwestern Anatolian graben-horst system: new field data from the Erdoğan-Yenigediz graben (Kütahya). *Journal of Geodynamics*, 65, 176-198.
- Gürer, Ö. F., Sarica-Filoreau, N., Özburan, M., Sangu, E. & Doğan, B. (2009). Progressive development of the Büyük Menderes Graben based on new data, western Turkey. *Geological Magazine*, 146(5), 652-673.
- Gürsoy, H., Temiz, H. ve Tatar, O. (1997). Gediz grabeni GD kenarındaki güncel deformasyon verileri. *Aktif Tektonik Araştırma Grubu Birinci Toplantısı*, İTÜ, İstanbul.
- Haghighi, M. H. (2019). *Local and large scale insar measurement of ground surface deformation* [PhD Thesis]. Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Hancock, P. L. & Barka, A. A. (1987). Kinematic indicators on active normal faults in western Turkey. *Journal of Structural Geology*, 9(5-6), 573-584.
- Hastaoğlu, K. O., Poyraz, F., Erdoğan, H., Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Duman, H. Gül, Y., Guler, S., Dogan, A. & Gul, Y. (2023). Determination of periodic deformation from InSAR results using the FFT time series analysis method in Gediz Graben. *Natural Hazards*, 117(1), 491-517. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05870-w>
- Hetzel, R., Ring, U., Akal, C. & Troesch, M. (1995). Miocene NNE-directed extensional unroofing in the Menderes Massif, southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society of London*, 152, 639-654. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.152.4.0639>
- Hetzel, R., Romer, R. L., Candan, O. & Passchier, C. W. (1998). Geology of the Bozdağ area, central Menderes massif, SW Turkey: Pan-African basement and Alpine deformation. *Geologische Rundschau*, 87(3), 394-406.
- Hodgkinson, K. M. (1996). *Crustal deformation in extensional regimes: Iceland, Nevada and SW Turkey*. [PhD Thesis]. Durham University, Durham.
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35, L16302.

- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31, L23611.
- Hu, J., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., Zhang, L. & Sun, Q. (2014). Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133, 1-17.
- Ingleby, T. & Wright T. J. (2017). Omori-like decay of postseismic velocities following continental earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3119-3130.
- Innocenti, F., Agostini, S., Di Vincenzo, G., Doglioni, C., Manetti, P., Savaşçın, M. Y. & Tonarini, S. (2005). Neogene and Quaternary volcanism in Western Anatolia: magma sources and geodynamic evolution. *Marine Geology*, 221(1-4), 397-421. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.03.016>
- Işık, V. & Tekeli, O. (2001). Late orogenic crustal extension in the northern Menderes massif (western Turkey): evidences for metamorphic core complex formation. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 757-765.
- Işık, V., Saber, R. & Çağlayan, A. (2021). November 08, 2019 Turkmanchay earthquake (Mw: 5.9) in NW Iran: an assessment of the earthquake using DInSAR time-series and field evidence. *Natural Hazards*, 105, 3013-3037.
- İmamoğlu, M., Balık Sanli, F., Cakir, Z. & Kahraman, F. (2022). Rapid ground subsidence in the Küçük Menderes Graben (W. Turkey) captured by Sentinel-1 SAR data. *Environmental Earth Sciences*, 81(7), 221.
- İmamoğlu, M., Kahraman, F., Cakir, Z. & Sanli, F. B. (2019). Ground deformation analysis of Bolvadin (W. Turkey) by means of multi-temporal InSAR techniques and Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 11(9), 1069.
- Jackson, J. & McKenzie, D. (1988). The relationship between plate motions and seismic moment tensors and rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophysical Journal*, 93, 45-73.
- Jolivet, L., Faccenna, C., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., Lacombe, O., ... & Driussi, O. (2013). Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat. *Tectonophysics*, 597, 1-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.011>
- 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, 1-13.
- Kent, E. (2015). *The Relationship Between Active Faulting and Fluvial Geomorphology: A Case Study In The Gediz Graben, Turkey* [PhD Thesis]. Plymouth University, Plymouth.
- Ketin, İ. (1968). Relations between general tectonic features and the main earthquake regions of Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 71(71).
- Kim, D. J. & Jung, J. (2018). Subsidence in the Kathmandu Basin, before and after the 2015 Mw 7.8 Gorkha Earthquake, Nepal Revealed from Small Baseline Subset-DInSAR Analysis. *GIScience & Remote Sensing*, 55(4), 604-621.
- Koca, M. Y., Sözbilir, H. ve Uzel, B. (2011). Sarıgöl fay zonu boyunca meydana gelen deformasyonların nedenleri üzerine bir araştırma. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 35(2), 151-174.
- Koçman, A. (1985). İzmir-Bozdağlar yöresinin yapısal jeomorfolojisi ve evrimi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 3(1), 63-86.
- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve Yakın Dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 27, 1-16. [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/84b98aac2ddd59\\_ek.pdf?dergi=T%20DCRK%20DDE%20JEOLJ%20DD%20B%DCLTEN%20](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/84b98aac2ddd59_ek.pdf?dergi=T%20DCRK%20DDE%20JEOLJ%20DD%20B%DCLTEN%20)
- 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, 605-616.
- Koralay, E., Candan, O., Akal, C., Dora, O. Ö., Chen, F., Satir, M. ve Oberhänsli, R. (2011). Menderes Masifi'ndeki Pan-Afrikan ve Triyas yaşlı

- metagranitoidlerin jeolojisi ve jeokronolojisi, Batı Anadolu, Türkiye. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 142, 69-121.
- Lauknes, T. R., Shanker, A. P., Dehls, J. F., Zebker, H. A., Henderson, I. H. C. & Larsen, Y. (2010). Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2097-2109.
- 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, 1-42.
- Le Pichon X., Chamot-Rooke C., Lallemand S., Noomen R. & Veis G. (1995). Geodetic determination of the kinematics of Central Greece with respect to Europe: implications for Eastern Mediterranean tectonics, *Journal of Geophysical Research*, 100, 12675-12690.
- Lips, A. L., Cassard, D., Sözbilir, H., Yilmaz, H. & Wijbrans, J. R. (2001). Multistage exhumation of the Menderes massif, western Anatolia (Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 89(4), 781-792.
- Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D. & Saepuloh, A. (2018). Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 386-396.
- Massonnet, D., Holzer, T. & Vadon, H. (1997). Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 24(8), 901-904.
- McClusky, S. C., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... & Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105, 5695-5719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>
- McKenzie, D. (1978). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. *Geophysical Journal International*, 55(1), 217-254.
- Nocquet, J. M. (2012). Present-day kinematics of the Mediterranean: a comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579, 220-242.
- Oktar, O., Erdoğan, H., Poyraz, F. & Tiryakioğlu, İ. (2021). Investigation of deformations with the GNSS and PSInSAR methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23), 1-16.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90-102.
- Öner, Z. & Dilek, Y. (2011). Supradetachment basin evolution during continental extension: The Aegean province of western Anatolia, Turkey. *Geological Society of America Bulletin*, 123(11-12), 2115-2141.
- Özkaymak, C. & Sözbilir, H. (2008). Stratigraphic and structural evidence for fault reactivation: the active Manisa fault zone, western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 615-635.
- 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>
- Paton, S. (1992). Active normal faulting, drainage patterns and sedimentation in southwestern Turkey. *Journal of the Geological Society, London* 149, 1031-44.
- Pawluszek-Filipiak, K. & Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS Techniques to determine mining-related deformations using sentinel-1 data: The case study of Rydułtowy mine in Poland. *Remote Sensing*, 12(2), 242.
- Poyraz, F. & Hastaoğlu, K. Ö. (2020). Monitoring of tectonic movements of the Gediz Graben by the PSInSAR method and validation with GNSS results. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(17), 1-11.
- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. Ö. ve Demirel, M. (2016). Gediz Grabenin Doğu Kesimindeki Tektonik Hareketlerin Envisat Radar Görüntülerini Kullanarak Araştırılması. 8. *Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu* (s.: 1-5). İstanbul.

- Poyraz, F., Hastaoğlu, K. Ö., Koçbulut, F., Tiryakioğlu, İ., Tatar, O., Demirel, M., ... & Sığırcı, R. (2019). Determination of the block movements in the eastern section of the Gediz Graben (Turkey) from GNSS measurements. *Journal of Geodynamics*, 123, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.11.001>
- Poyraz, F., Tatar, O., Hastaoğlu, K. Ö., Tiryakioğlu, İ., Gürsoy, Ö., Koçbulut, F., ... & Gül, D. (2015). Gediz Grabeninin Doğu Kesimindeki Güncel Tektonik Hareketlerin GPS Ve Ps-InSAR Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi; İlk Sonuçlar. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 17-28. <https://doi.org/10.15659/hartek.15.03.64>
- Price, S. P. & Scott, B. (1994). Fault-block rotations at the edge of a zone of continental extension; southwest Turkey. *Journal of Structural Geology*, 16(3), 381-392.
- Purvis, M. & Robertson, A. (2004). A pulsed extension model for the Neogene–Recent E–W-trending Alaşehir Graben and the NE–SW-trending Selendi and Gördes Basins, western Turkey. *Tectonophysics*, 391(1), 171-201.
- Purvis, M. & Robertson, A. (2005). Sedimentation of the Neogene–Recent Alaşehir (Gediz) continental graben system used to test alternative tectonic models for western (Aegean) Turkey. *Sedimentary Geology*, 173(1-4), 373-408.
- Radiguet, M., Perfettini, H., Cotte, N., Gualandi, A., Valette, B., Kostoglodov, V., ... & Campillo, M. (2016). Triggering of the 2014 Mw 7.3 Papanao earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. *Nature Geoscience*, 9(11), 829-833. <https://doi.org/10.1038/ngeo2817>
- Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake: The California Earthquake of April 18, 1906. *Carnegie Institute Washington Publication*, 87(2), 192.
- Reilinger, R. E., McClusky, S. C., Oral, M. B., King, R. W., Toksoz, M. N., Barka, A. A., Kinik, I., Lenk, O. & Sanli, I. (1997). GPS measurements of present day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 102(B5), 9983-9999. <https://doi.org/10.1029/96JB03736>
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R. ... & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 111(B5). Article B5411 <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Ring, U., Johnson, C., Hetzel, R. & Gessner, K. (2003). Tectonic denudation of a Late Cretaceous–Tertiary collisional belt: regionally symmetric cooling patterns and their relation to extensional faults in the Anatolide belt of western Turkey. *Geological Magazine*, 140(4), 421-441.
- Roberts, S. C. (1988). *Active normal faulting in Central Greece and Western Turkey* [phD Thesis]. University of Cambridge, Cambridge.
- Rojay, B. (2009). Post-Miocene Deformation in Central Anatolia and its link to Horst and Graben System of Western Anatolia, Turkey. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 4601.
- Rojay, B., Demirci, C., Toprak, V. & Özsayın, E. (2019). Superposition of the neotectonic events in a complex multi extensional terrain evolution during post-Miocene in western Anatolia (Gediz-Alaşehir Graben, western Turkey). *Geophysical Research Abstracts*, (21).
- Rojay, B., Toprak, V., Demirci, C. & Süzen, L. (2005). Plio-quadernary evolution of the Küçük Menderes graben southwestern Anatolia, Turkey. *Geodinamica Acta*, 18(3-4), 317-331.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. & Fielding, E. J. (1996). Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR–C radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101(E10), 23109-23125.
- Saatçılar, R., Ergintav, S., Demirbağ, E. & İnan, S. (1999). Character of active faulting in the North Aegean Sea. *Marine Geology*, 160(3-4), 339-353.
- Saber, R., Isik, V., Caglayan, A. & Tourani, M. (2023). Sentinel-1 InSAR observations and time-series analysis of co- and postseismic deformation mechanisms of the 2021 Mw 5.8 Bandar Ganaveh Earthquake, Southern Iran. *Journal of Mountain Science*, 20(4), 911-927.



- Sangu, E., Gürer, Ö. F. & Gürer, A. (2020). Fault kinematic and Plio-Quaternary paleostress evolution of the Bakırçay basin, western Turkey. *International Geology Review*, 62(10), 1245-1261.
- Sarychikhina, O. & Glowacka, E. (2015). Application of DInSAR Stacking Method for Monitoring of Surface Deformation Due to Geothermal Fluids Extraction in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 (WGC)* (pp. 19-25).
- Savaşçın, M. Y., Giese, L. B., Kaya, O., Pekdeğer, A. & Woith, H. (1999). An example for the optimal use of geothermal energy-the integrated development project for Kula, West Anatolia. *International Symposium on Geology and Environment*, Istanbul.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1991). Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey. *Geological Magazine*, 128(2), 155-166.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1994). Late Cenozoic basin development in west Turkey: Gördes basin tectonics and sedimentation. *Geological Magazine*, 131(5), 631-637.
- Seyitoğlu, G. & Scott, B. C. (1996). The age of Alaşehir Graben (west Turkey) and its tectonic implications. *Geological Journal*, 31(1), 1-11.
- 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.
- Seyitoğlu, G., Tekeli, O., Çemen, İ., Şen, Ş. & Işık, V. (2002). The role of the flexural rotation/rolling hinge model in the tectonic evolution of the Alaşehir graben, western Turkey. *Geological Magazine*, 139, 15-26.
- Shahabi, H. & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific reports*, 5(1), 9899.
- Shanker, P., Casu, F., Zebker, H. A. & Lanari, R. (2011). Comparison of persistent scatterers and small baseline time-series InSAR results: A case study of the San Francisco bay area. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4), 592-596.
- Sözbilir, H. (2001). Extensional tectonics the geometry of related macroscopic structures: Field evidence from the Gediz detachment, western Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, 10, 51-67.
- Sözbilir H. (2002). Revised stratigraphy and facies analysis of the Palaeocene-Eocene supra-allochthonous sediments and their tectonic significance (Denizli, SW Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 11, 1-27.
- Sözbilir, H., Erkül, F. & Sümer, Ö. (2003a). Field evidence for post-Miocene NE-trending accommodation zone lying between Gümüldür (İzmir) and Bigadiç (Balıkesir), west Anatolia. 56. *Geological Congress of Turkey*, 85-86.
- Sözbilir, H., İnci, U., Erkül, F. & Sümer, Ö. (2003b). An active intermittent transfer 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: Recent Progress in Tectonics and Palaeo-seismology and Field Training Course in Palaeoseismology*, 87.
- 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.
- Sümer, Ö., İnci, U. & Sözbilir, H. (2013). Tectonic evolution of the Söke Basin: extension-dominated transtensional basin formation in western part of the Büyük Menderes Graben, Western Anatolia, Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 148-175.
- Şaroğlu, F. ve Güler, B. (2020). Batı Anadolu Tektonik Kaması'nın güncel deformasyonu: batıya doğru kaçıştan kaynaklanan blok hareketleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 63(2), 161-194. <https://doi.org/10.25288/tjb.593423>
- Şengör, A. M. C. (1979). The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance. *Geological Society of London*, 136, 269-282.
- Şengör, A. M. C. (1987). Cross-faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey. *Geological Society London*, 28, 575-589.
- 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. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publications 37*, 227-264.
- Şimşek, C. ve Demirkesen, A. C. (2022). Kısa Dönem Kuyu İzlem Verilerine Göre Yeraltısuyu Besleniminin Belirlenmesi, Alaşehir (Manisa) Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 91-104.
- Tatar, O., Sözbilir, H., Koçbulut, F., Bozkurt, E., Aksoy, E., Eski, S., ... & Metin, Y. (2020). Surface deformations of 24 January 2020 Sivrice (Elazığ)–Doğanyol (Malatya) earthquake (Mw= 6.8) along the Pütürge segment of the East Anatolian Fault Zone and its comparison with Turkey's 100-year-surface ruptures. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 2(3), 385-410. <https://doi.org/10.1007/s42990-020-00037-2>
- Taymaz, T., Ganas, A., Berberian, M., Eken, T., Irmak, T. S., Kapetanidis, V., ... & Özkan, B. (2022). The 23 February 2020 Qotur-Ravian earthquake doublet at the Iranian-Turkish border: Seismological and InSAR evidence for escape tectonics. *Tectonophysics*, 838. Article 229482. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229482>
- Taymaz, T., Jackson, J. & McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International*, 106(2), 433-490.
- Taymaz, T., Yılmaz, Y. & Dilek, Y. (2007). The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 291(1), 1-16.
- Tekin, T., Sançar, T. & Rojay, B. (2022). A new set of overprinting slip-data along Manisa Fault in Aegean Extensional Province, Western Anatolia. *EGU22-452, Copernicus Meetings*.
- Temiz, H., Gürsoy, H. & Tatar, O. (1998). Kinematics of late pliocene-quaternary normal faulting in the southeastern end of the Gediz graben, Western Anatolia, Turkey. *International Geology Review*, 40(7), 638-646.
- Thomson, S. N. & Ring, U. (2006). Thermochronologic evaluation of postcollision extension in the Anatolide orogen, western Turkey. *Tectonics*, 25, Article TC3005.
- Tiryakioğlu, İ., Umutlu, A. İ. ve Poyraz, F. (2019). Jeodezik Yöntemlerle Deprem Tekrarlama Periyotlarının Belirlenmesi: Alaşehir Bölgesi Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 762-768.
- Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., Bibby, D. & Lokas, S. (2012). The Sentinel-1 mission and its application capabilities. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1703-1706). *Munich, Germany*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351196>.
- Uzel, B., Kuiper, K., Sözbilir, H., Kaymakci, N., Langereis, C. G. & Boehm, K. (2020). Miocene geochronology and stratigraphy of western Anatolia: Insights from new Ar/Ar dataset. *Lithos*, 352, Article 105305.
- Uzel, B., Langereis, C. G., Kaymakci, 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.
- 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.
- 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), 1-33, Article TC3009.
- Walters, R. J., Holley, B., Parsons & Wright T. J. (2011). Interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault from Envisat InSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 38(5), Article L05303. <https://doi.org/10.1029/2010GL046443>
- Wang, H., Wright, T. J. & Biggs, J. (2009). Interseismic slip rate of the northwestern xianshuihe fault from insar data. *Geophysical Research Letters*, 36(3), Article L03302. <https://doi.org/10.1029/2008GL036560>
- Weiss, J. R., Walters, R. J., Morishita, Y., Wright, T. J., Lazecky, M., Wang, H., ... & Parsons, B. (2020). High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data. *Geophysical Research Letters*,

- 47(17), Article e2020GL087376. <https://doi.org/10.1029/2020GL087376>
- Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M. & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220-2234. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>
- Yeats, R. S., Sieh, K. ve Allen, C. R. (2006). *Deprem Jeolojisi* (Çev: R. Demirtaş ve K. Kayabalı). Ankara: Gazi Kitabevi. (Orijinal yayın tarihi: 1997).
- Yen, J. Y., Lu, C. H., Chung-Pai, C., Hooper, A. J., Chang, Y. H., Liang, W. T., ... & Chen, K.-S. (2011). Investigating active deformation in the northern Longitudinal Valley and City of Hualien in eastern Taiwan using persistent scatterer and small-baseline SAR interferometry. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. 22, 291-304. [https://doi.org/10.3319/TAO.2010.10.25.01\(TT\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2010.10.25.01(TT))
- Yılmaz, Y., Genç, Ş. C., Gürer, O. F., Bozcu, M., Yılmaz, K. ve Karacık, Z., Altunkaynak, Ş. & Elmas, A. (2000). When did the western Anatolian grabens begin to develop?. In E. Bozkurt, J. A. Winchester & J. D. A. Piper (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society of London, Special Publication, 173*, 353-384. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.173.01.17>
- Zanchi, A. & Angelier, J. (1993). Seismotectonics of western Anatolia: regional stress orientation from geophysical and geological data. *Tectonophysics*, 222(2), 259-274.
- Zhang, Y., Meng, X., Chen, G., Qiao, L., Zeng, R. & Chang, J. (2016). Detection of geohazards in the Bailong River Basin using synthetic aperture radar interferometry. *Landslides*, 13(5), 1273-1284.
- Zhu, L., Mitchell, B. J., Akyol, N., Cemen, I. & Kekovali, K. (2006). Crustal thickness variations in the Aegean region and implications for the extension of continental crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B1), Article B01301. <https://doi.org/10.1029/2005JB003770>



**Hasan Dağı Volkanı ve Çiftlik-Bozköy (Orta Anadolu) Gömülü Kalderasını Besleyen Aktif Magma Odalarına İlişkin Isı Transferi Analizleri**  
*Heat Transfer Analysis of Active Magma Chambers Feeding Hasan Dağı Volcano and Çiftlik-Bozköy (Central Anatolia) Hidden Caldera*

**Özgür Karaoğlu\***

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
26480 Eskişehir*

• Geliş/Received: 17.08.2023 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 28.12.2023 • Kabul/Accepted: 19.01.2024  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 03.04.2024 • Baskı/Printed: 31.07.2024

*Araştırma Makalesi/Research Article*

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

**Öz:** Ülkemizdeki Jeotermal enerji kaynaklarının %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır. Kapadokya bölgesi son yıllarda jeotermal sektörünün potansiyelin artırılması adına pek çok yatırımın yapıldığı önemli bir saha olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda Hasan Dağı ve çevresinde jeotermal enerji bulmak ve işletmek amaçlı sondaj faaliyetleri sürdürülmektedir. Bunların en önemlisi 3S Kale Enerji şirketi tarafından yürütülen çalışmalarda Çiftlik-Bozköy bölgesinde, 3.814 metre derinlikte 295 °C; diğer daha derin sondajdan 3.957 metre derinlikten 341 °C kuyu dibi sıcaklık değeri elde edilmiştir. Bu iki sondaj verisinden yararlanarak sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre söz konusu sıcaklık değerlerini üretebilmek için 7 km derinlikte 600-700 °C ve/veya 8 km derinlikte 900-1.000 °C sıcaklığında ısı kaynağı olarak işlev gören bir magma odasının (magma odası çatısı) üst kabukta bulunması gerekmektedir.

Hasan Dağı ve çevresinde gerçekleştirilen manyetotellurik (MT) çalışmaları sonucunda özellikle Niğde düzlüğüne doğru elde edilen profillerde 4-6 km derinlikte ve yaklaşık aynı ölçülerdeki genişlikte olası bir magma odası olduğu önerilmiştir. Bu MT çalışmaları ile sondaj verileri birlikte değerlendirilerek Hasan Dağı ve çevresinde muhtemel açılacak sondaj çalışmaları için çeşitli sıcaklık belirtileri elde edilmiştir. Buna göre, Hasan Dağı güneybatısında yer alan düzlük alanlarda yürütülecek jeotermal sondaj faaliyetlerinden 3.814 metrede 120 °C; 3.000 metrede 90 °C; 2.000 metrede 74 °C; 1.000 metrede 41 °C gibi yaklaşık sıcaklık değerlerinin elde edilmesi beklenmektedir. Hasan Dağı altındaki magma odasına doğru aynı derinlikte sıcaklık değeri 600 °C'ye ulaşmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Hasan Dağı, ısı transferi, jeotermal enerji, Magma, sayısal modelleme, volkan.

**Abstract:** In Turkey, 78% of geothermal energy resources are located in Western Anatolia, 9% in Central Anatolia, 7% in the Marmara Region, 5% in Eastern Anatolia, and 1% in other regions. The Cappadocia region stands out as an important area where many investments have been made in recent years to increase the potential of the geothermal sector. In recent years, drilling activities were carried out in and around Hasan Dağı volcano to find and utilise geothermal energy. The most important of these was carried out by the 3S Kale Energy company in the Çiftlik-Bozköy region, where temperature values of 295 °C at a depth of 3,814 meters and 341 °C from another deeper drilling at a depth of 3,957 meters were obtained. Numerical modelling studies were carried out using data from these two individual drillings. According to the simulation results, the magma chamber (magma chamber roof), which acts as a heat source with a temperature of 600-700 °C at a depth of 7 km and/or 900-1,000 °C at a depth of 8 km, must still be actively present in the upper crust to produce these temperature values.

*Magnetotelluric (MT) studies conducted in Hasan Dağı and vicinity suggest a potential magma chamber with a depth of 4-6 km and a width of approximately the same dimensions, especially in the profiles obtained towards Niğde plain. These MT studies and drilling data were evaluated together and temperature anomalies were obtained for possible drilling in and around Hasan Dağı. Accordingly, it is estimated that approximate temperature values of 120 °C at 3814 meters, 90 °C at 3,000 meters, 74 °C at 2,000 meters, and 41 °C at 1,000 meters will be obtained from geothermal drilling carried out in the flat areas located southwest of Hasan Dağı. The temperature ascends to 600°C at the equivalent depth beneath the magma chamber of Hasan Dağı.*

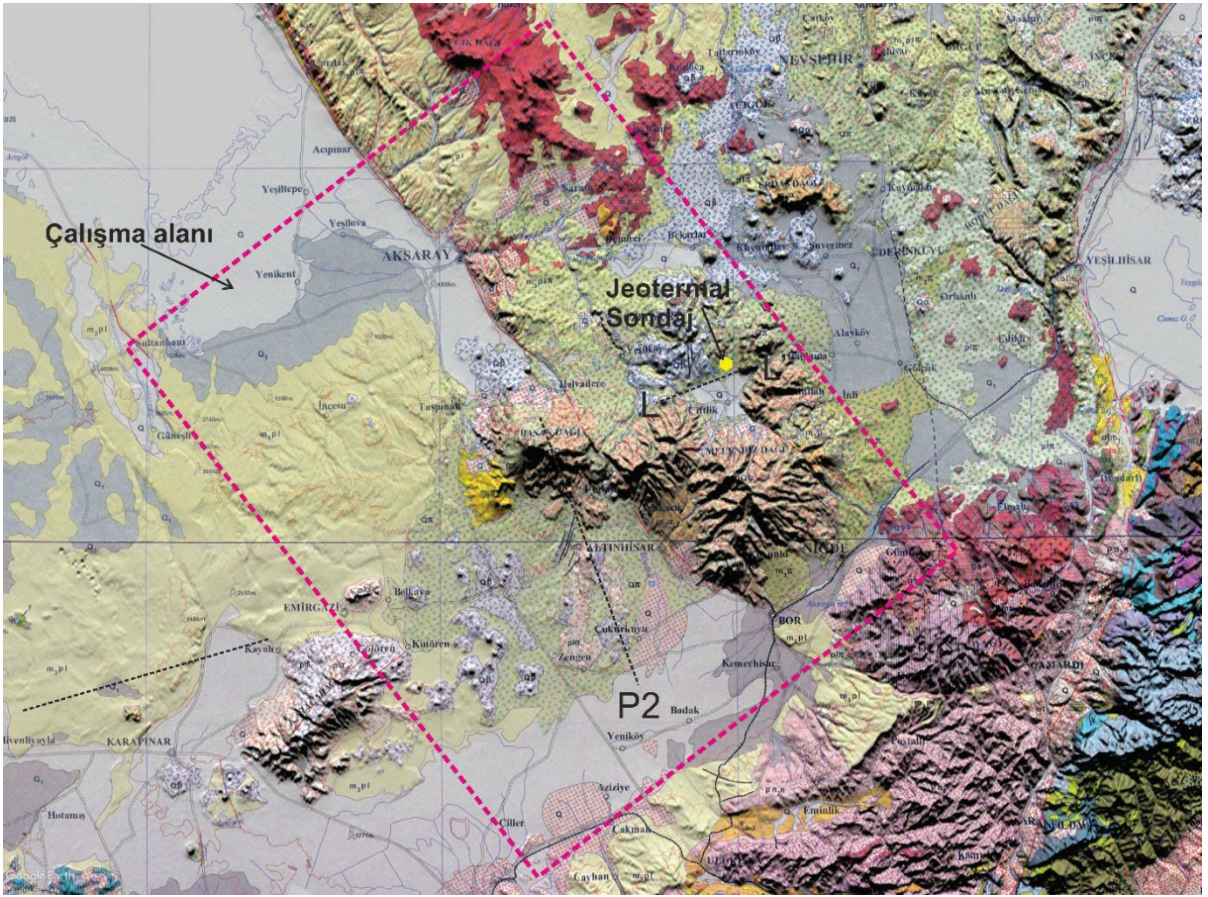
**Keywords:** Geothermal energy, Hasan Dağı, heat transfer, Magma, numerical modelling, Volcano.

## GİRİŞ

Jeotermal enerji yenilebilir enerji kaynakları arasında en çok yatırım yapılan alanlardan birisini teşkil etmektedir. Türkiye jeotermal potansiyeli bakımından Avrupa'nın 1. ülkesi ve kurulu güç bakımından ise Dünyanın 4. ülkesi konumundadır (Şener vd., 2022). Ülkemizdeki Jeotermal enerji kaynaklarının %78'i Batı Anadolu'da, %9'u İç Anadolu'da, %7'si Marmara Bölgesi'nde, %5'i Doğu Anadolu'da ve %1'i diğer bölgelerde yer almaktadır (Şener vd., 2022). Kapadokya bölgesi son yıllarda jeotermal sektörü adına pek çok yatırımın yapıldığı önemli bir saha olarak öne çıkmaktadır. Bölge jeolojisinin özellikle Kuvaterner dönemi boyunca aktif magma odalarından püsküren volkanik malzemeler ile örtülü olması, jeotermal sektörünün bu bölgeye olan ilgisini daha da artırmaktadır. Kuvaterner dönemi boyunca aktif volkanik bölgeler, volkanik püskürümler sürecinde ve birkaç milyon yıl boyunca ısı kaynağı görevi gören magma oda ve rezervuarların sığ kabuğa yerleşmeleri sonucunda bölgedeki ısı akısının artışına neden olması sebebiyle jeotermal kaynakların yaygın olarak bulunacağı sahalardır (Jaeger, 1959; De Silva and Gregg, 2014; Gelman et al., 2013; Karakas et al., 2017; Karaoğlu 2021).

Kapadokya Volkanik Bölgesi (KVB) jeotermal enerji potansiyeli olan bir bölge olarak son yıllarda öne çıkmaktadır. Gömülü kaldera yapıları, aktif kabuğa yerleşmiş sıcak intrüzyonlar

temel ısı kaynakları arasında sayılabilir. KVB bölgesinde geniş düzlüklere yayılan ve birkaç yüz metreye ulaşan ignimbiritlerin olası püskürüm merkezlerine ilişkin pek çok jeofiziksel çalışma yürütülmüştür (örn., Pasquare vd., 1988; Le Pennec vd., 1994; Toprak, 1998; Froger vd., 1998; Koşaroğlu vd., 2016; Bilim vd., 2017; Aydemir vd., 2019). Bölgede gömülü kaldera yapıları ile ilgili yürütülen çalışmalar KVP'nin özellikle orta ve batı kesiminde birkaç km derinlikteki bu depresyon yapılarına işaret etmektedir. Pasquare vd. (1988) özellikle KVP'nin batısında yüzeylenmiş ignimbiritlerin olası püskürüm merkezi için Melendiz stratovolkanı ve Çiftlik bölgesine işaret etmişlerdir (Şekil 1). Bilim vd. (2017) yaptıkları çalışmada çapı 50 km'yi aşan Aksaray-Nevşehir-Niğde-Yeşilhisar arasındaki bölgenin bir depresyon ya da kaldera özelliği gösterdiklerini önermişlerdir (Şekil 1). Ayrıca araştırmacılar söz konusu bölgenin jeotermal gradyan değerinin 50-68 °C/km; ısı akışı değerinin 2,3 ve 2,7 Wm<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> ayrıca radyojenik ısı akış üretim değerinin 0,45 ve 0,70 IW m<sup>-3</sup> arasında olduğunu belgelemişlerdir. Şener vd. (2023) Kapadokya bölgesinde sıcaklık jeotermometre sıcaklık hesaplamaları yaparak çalışma alanına yakın bölgeler için çeşitli sıcaklık değerleri elde etmiştir. Kalsedon jeotermometre hesaplamaları 54-126 °C (Nevşehir); 48-159 °C (Aksaray); 73-159 °C (Niğde) olarak ölçülmüştür. Kuvars jeotermometre hesaplamaları 85-173 °C (Nevşehir); 79-180 °C (Aksaray); 102-180 °C (Niğde) sıcaklık değerlerine işaret etmektedir.



**Şekil 1.** Bölgenin rölyef etkili üç boyutlu Jeoloji haritası (MTA Jeoloji Etüdları Dairesi tarafından hazırlanmıştır, Atabey, 1999) ve önceki çalışmalardan elde edilen manyetotellürik ölçümlere ilişkin profiller (L-L' profili: Hacıoğlu vd., 2023; P2 profili: Tank ve Karas, 2020).

**Figure 1.** Three-dimensional geological map of the region with relief effects (prepared by the General Directorate of Geological Studies of the Mineral Research and Exploration Institute, Atabey, 1999) and profiles of magnetotelluric measurements obtained from previous studies (L-L' profile: Hacıoğlu et al., 2023; P2 profile: Tank and Karas, 2020).

Söz konusu ticari girişimin web sitesinden (URL1, 2023) yaptığı açıklamada Bozköy ruhsatından (i) 2016 yılında 3.814 metre derinliğinde bir sondaj yaparak Türkiye'nin en sıcak kuyusunu bulduğunu; 295 °C taban sıcaklığı olan bu kuyu buhar üretme kapasitesine sahip olduğunu duyurmuştur (Şekil 1). Aynı sahada 2021 yılında açılan ve 3.957 metre derinliğinde olan 2. kuyudaki taban sıcaklığı ise 341 °C olarak ölçülmüş olup, her iki kuyu da Türkiye'nin en yüksek taban sıcaklığı olan kuyuları olarak kayıtlara geçmiş durumdadır.

Bu çalışmada söz konusu ticari girişimin açmış olduğu kuyu sıcaklık verilerine dayanarak, ısı kaynağının Hasan Dağı mı yoksa bu bölge altında daha önce bilinmeyen bir ısı kaynağının mı olduğu sorularına cevaplar aranmaya çalışılacaktır. Bunun için Lisanslı Comsol Multiphysics 6.1 programı (Tabatabaian, 2014) kullanılarak katı özellikteki litolojilerde ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir.

## BÖLGE JEOLojİSİ ve JEOFİZİĞİ

Geç Senozoyik dönemi boyunca Avrasya, Afrika ve Arabistan plakaları arasındaki yakınlaşma ve nihayetindeki bu plakaların çarpışmaları bölgesini şekillendirmiştir. Orta Anadolu platosu bu orojenik olaylara tektonik deformasyon, hızlı kabuksal yükselimler ve oldukça yüksek hacimdeki volkanik etkinlikler ile karşılık vermiştir. Orta Anadolu platosu günümüz topografyasını son 10 My'lık süreç içinde yaklaşık 1 km'lik yükselme sonucu kazanmıştır (Cosentino vd. 2011; Yildirim vd. 2011; Schildgen vd. 2012). Bu yükselimlere sebep olan kabuksal deformasyon manto kaynağından ergiyen magmanın yüzeye taşınmasında büyük rol oynamıştır. Magmanın çoğunlukla litosferik-ancak yer yer astenosferik manto katkıların da olduğu gözlenmektedir.

Magma yüzeye ulaşması sürecinde fraksiyonlaşma sürecinin baskın bir şekilde izlendiği görülmektedir. Magmanın özellikle üst kabuk boyunca kabarcıklenme ve köpüklenmesi yüksek enerjili püskürmeli volkanik etkinliklere sebep olmuştur. Manto ergimeleri sonucu, daha çok kabuk boyunca yerleşen magma rezervuar ve bunlardan ayrılan magma odaları ile sonuçlanmıştır. Söz konusu magma rezervuar ve odaları kabuk boyunca yerleşimlerinin ardından, kabuksal deformasyonlar sonucu gelişen zayıf zonlar boyunca (bazen kırık-çatlak ve fay düzelmeleri) büyük hacimli (1-10 km<sup>3</sup>) stratovolkanları, dom yerleşimlerini, daha küçük hacimli (1 km<sup>3</sup>) çatlak kontrollü lav püskürmelerini sürekli beslemiştir.

Kapadokya Volkanik Bölgesi (KVB) stratovolkanlar (örn., Hasan Dağı, Erciyes ve Göllüdağ) ve kaldera volkanlarından püsküren ignimbirit serileri ile karakteristiktir (Şekil 2). Birkaç yüz metreye ulaşan ignimbirit ve püms-kül geri düşme ürünleri kökensel olarak magmanın kabuk boyunca fraksiyonlaşması ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir.

Hasan Dağı'nın güneybatısında yer alan Keçikalesi volkanı, KVP'nin batı kesimindeki ilk volkanik etkinliklerinden birini temsil etmektedir (Şekil 1 ve 2). Besang vd. (1977) bu volkanik ürünlerin 13,7±0,3 My ile 12,4±0,6 arasında püskürdüğünü tarihlemiştir. Paleo-Hasan Dağı olarak Aydar ve Gorgaud (1998) tarafından adlandırılan ilk lav ürünleri 6,31 My±0,9 (K/Ar yaşı) ile Taşpınar köyü civarında gözlenen ignimbiritler Deniel vd. (1998) tarafından 7,21±0,9 My (K/Ar yaşı) olarak tarihlendirilmiştir. Mezo-Hasan Dağını oluşturan lav akıntıları, dom yerleşimleri ve piroklastik malzemeler 700 bin yıl olarak tarihlendirilirken (Aydar, 1992); Neo-Hasan Dağı olarak adlandırılan ve volkanın günümüz morfolojisini şekillendiren volkanik ürünlerden oldukça genç yaşlar elde edilmiştir. Karakapı köyü civarındaki dom ve lav akıntılarında 0,08 ve 0,58 My (Ercan vd., 1990); Gözlükuyu köyü civarındaki bazaltik koniden 120-65 bin yıl (Ercan vd., 1990) lav akıntılarında ise 34 bin yıl yaş verileri elde edilmiştir (Aydar ve Gorgaud, 1998). En genç efüzif karakterli volkanik aktiviteler 29 ve 33 bin yıl olarak Kuzucuoğlu vd. (1998) tarafından belgelenmiştir. Ayrıca en genç ürünler arasında bazaltik dom, blok kül akıntısı ve andezitik lavlardan 29 ve 9 bin yıl yaş verileri kaydedilirken; kaldera sonrası domun 6 bin yıl önce yerleştiği belirtilmiştir (Aydar ve Gorgaud, 1998).

Çiftlik-Bozköy bölgesi morfolojik olarak 6-6,5 km çapına ulaşan kaba bir elipsoid geometriye sahip çukurluk bir alandır. Üstte birkaç 10 metreye kadar ulaşan volkaniklerden türeme alüvyon malzemesi, bunun altında oldukça kalın bir piroklastik birim yer alır. Bozköy ve Çardak civarından Yeşilköy sırtlarına doğru bu ignimbiritik örtünün üzerinde yer alan genelde ortaç volkanik kayaçlar bulunmaktadır (Şekil 1 ve 2).

| Sistem         | Seri        | LİTOLOJİ | AÇIKLAMA   | Kalınlık (km) | k [w/m.K] | Cp [J/(kg.K)] | $\alpha$ [1/K] |                      |
|----------------|-------------|----------|--|---------------|-----------|---------------|----------------|----------------------|
| Kuvaterner     | Holosen     |          | Aluvyal fan depozitleri  | L1            | 2         | 0,45          | 850            | $3,0 \times 10^{-6}$ |
|                | Pleyistosen |          | Pomza ve skorya geri düşme ürünleri<br>Bazaltik lav akmaları<br>Blok ve kül akmaları | L2            | 5         | 1,50          | 950            | $7,2 \times 10^{-6}$ |
| Neojen         | Pliyosen    |          | Gösel kireçtaşı ve ara katkılı kiltası   | L3            | 1         | 1,30          | 840            | $4,6 \times 10^{-6}$ |
|                |             |          | İgnimbirit   |               |           |               |                |                      |
|                | Miyosen     |          | Lav, tuf ve diğer piroklastik çökeller   | L4            | 7         | 0,45          | 800            | $4,8 \times 10^{-6}$ |
|                |             |          | İgnimbirit   |               |           |               |                |                      |
|                |             |          | Bazalt, obsidyen ve andezitten oluşan breşik ignimbiritler<br>Andezitik lav          |               |           |               |                |                      |
| Paleojen       | Oligosen    |          | Pümsi geri düşme ürünleri ve ignimbiritler   | L5            | 2         | 0,41          | 930            | $8,8 \times 10^{-6}$ |
|                |             |          | Jips<br>Konglomera, kumtaşı ve çamurtaşı   | L6            | 3         | 0,25          | 850            | $8,9 \times 10^{-6}$ |
|                | Eosen       |          | Kireçtaşı<br>Konglomera, kumtaşı ve kiltası  | L7            | 2         | 0,85          | 980            | $6,2 \times 10^{-6}$ |
| Kretase        |             |          | Diyabaz, gabro ve serpantinit  |               |           |               |                |                      |
| Kretase öncesi |             |          | Mermer   | L8            | 10        | 1,90          | 980            | $9,2 \times 10^{-6}$ |
|                |             |          | Kalk-şist, kuvars-şist ve gnays  |               |           |               |                |                      |

**Şekil 2.** Bölgenin jeolojik dikme kesiti (MTA Jeoloji Etüdüleri Dairesi tarafından hazırlanmıştır, Atabey, 1999) üzerinde farklı litolojilere ait termal parametreler (k: termal iletkenlik (kondaktivite); Cp: özgül ısı kapasitesi,  $\alpha$ : termal genleşme sabiti).

**Figure 2.** Thermal parameters for various lithologies on the geological cross-section of the region (prepared by the General Directorate of Geological Studies of the Mineral Research and Exploration Institute, Atabey, 1999) (k: thermal conductivity; Cp: specific heat capacity,  $\alpha$ : thermal expansion constant).



Tank ve Karaş (2020) tarafından Hasan Dağı, Keçiboyduran ve Melendiz dağlarının güney kesimlerini kapsayan 27 lokasyondan manyetotellürik (MT) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya göre Hasan Dağı'nın güneybatısı Niğde düzlüğüne doğru elde edilen yaklaşık 45 km'lik iki boyutlu profillerde 4-6 km derinlikte ve yaklaşık aynı ölçülerde genişlikte potansiyel bir magma odası önermişlerdir. Hacıoğlu vd. (2023) Melendiz dağı kuzeyinde, Çiftlik bölgesini de içine alan, 60 lokasyondan gerçekleştirdikleri MT çalışmalar neticesinde 3 km derinliğe ve çapı 12 km'ye kadar ulaşan gömülü bir kalderanın varlığına işaret etmektedirler. Ancak araştırmacılar, bu bölgede bir magma odasına ilişkin kanıt elde edememişlerdir (Hacıoğlu vd., 2023). Dornadula vd. (basımda) gerçekleştirdikleri nümerik modelleme çalışmasında, Şahinkalesi (Çiftlik bölgesi) altında 5 km derinlikte bir magma odası varsayımıyla, 4 km derinlikte 378 °C'ye ulaşan termal bir sistemin varlığını önermişlerdir.

Bu çalışmada magma odası ve ısı kaynağı ile ilişkili elde edilen veriler göz önünde bulundurularak söz konusu ticari girişim tarafından derin kuyu ölçümleri sonucu elde edilen sıcaklık değerleri ile olan analitik ilişkisi ele alınacaktır.

## METODOLOJİ

### Sayısal Modeller

Bölgenin jeolojik harita ve kolon istiflerine dayanarak sayısal modelleme çalışmalarında 8 ana kaya birimi tanımlanmıştır (Atabey, 1999; Şekil 2). Temelde, L8 olarak adlandırılan Kretase ve öncesi dönemleri temsil eden kalk-şist, mermer, diyabaz, gabro ve serpantin kayaçları yer almaktadır. Eosen dönemi kireçtaşları (L7); Oligosen dönemi konglomera ve jipsler (L6); Miyosen dönemi pümis geri düşme ürünleri ve ignimbiritler, bazalt, obsidyen ve andezitler ile başka bir ignimbiritik seviye (L5); Pliyosen

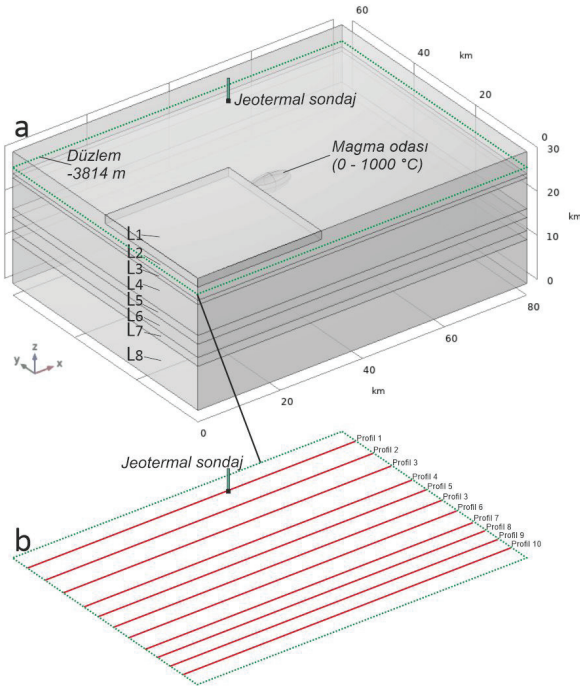
dönemi ortaç lav, tüf ve ignimbiritler (L4) ve üzerini uyumsuzlukla üzerleyen gösel kireçtaşları gelmektedir (L3). Kuvaterner döneminin erken evrelerini temsil eden bazaltik-andezitik lavlar ve ortaç ve asidik piroklastik ürünler (L2) ile blok ve kül akma çökelleri, bazaltik lav akmaları ve pomza-skorya geri düşme ürünleri ile en üstte bulunan alüvyal çökeller (L1) Holosen dönemi istiflerini temsil etmektedir (Şekil 2).

Tüm sonlu elemanlar model geometrileri COMSOL Multiphysics 6.1 (Tabatabaian, 2014) Isı Transferi Modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Magma odası geometrisi Tank ve Karaş (2020) tarafından elde edilen MT verileri ile aynı zamanda jeofizik yöntemlerle görüntülenmiş dünyadaki sıg kabul koşullarında bulunan diğer magma odaları da dikkate alınarak elipsoid şeklinde olduğu kabul edilmiştir (örn., Gudmundsson, 2012; Chestler ve Grosfils, 2013; Le Corvec vd., 2013; Caricchi vd., 2014). Modeller üç boyutlu (3-B) simetrik, içsel kaçma basıncı ( $P_e$ ) ve sıcaklığa ( $T_e$ ) sahip ve boş olarak kabul edilen magma odalarına uygulanmıştır (örn., Gudmundsson, 2012; Gerbault, 2012; Karaoğlu vd., 2016).

İzotermal çalışmalarda kıtasal kabuk koşullarında saf magnetitlerin ortalama Curie sıcaklığı 580 °C, genel termal gradyan değeri 25 °C -30 °C arası olarak kabul edilir (Okubo vd., 1985; Rozimant vd., 2009). Her ne kadar bölgenin termal özelliklerini çalışılan iki temel çalışma (Bilim vd., 2017; Aydemir vd., 2019) söz konusu bölgenin termal gradyan sıcaklığını nispeten yüksek 50 °C/km olarak hesaplamış olsalar da bu yüksek gradyana zaten kabuk koşullarındaki magmatik etkinlik olması sebebiyle bu çalışmada 25 °C dünya ortalama kabuk sıcaklık değerine yaklaşık bir değer kullanılmıştır.

Bu kaya birimlerinin her birine (L1-L8) litolojik özelliklerine uygun termal parametreler tanımlanmıştır (Şekil 3). Modellemelerde termal kondaktivite değerleri için  $k$  [W/(m\*K)] 0,25 ve 1,9 arasında; değişken sıcaklık değişimi

koşullarını hesaplanması için (bir kaya kütlelerinin geçici bir ısı kaynağına tepkisi) özgül ısı kapasitesi  $C_p$  [J/(kg\*K)] 840 ve 980 arasında;  $\alpha$  değeri termal genişleme sabiti olarak [1/K] her bir litoloji için  $3,0 \times 10^{-6}$  ve  $9,2 \times 10^{-6}$  arasında kullanılmıştır (Nabelek et al., 2012; Rodriguez et al., 2015). Modellemeleri değerlendirmek için hem üç boyutlu hacimsel hem de yatay kesitlerden yararlanılmıştır (Şekil 3a-b). Söz konusu Bozköy sondajları için 3.814 metreden yatay kesit alınmıştır (Şekil 3b). Yüzeiden 3.814 metre derinliği temsil eden kesit üzerinde mekânsal sıcaklık değişimlerini çok daha iyi gözlemek için 10 adet profil tanıtılmıştır (Şekil 3b).



**Şekil 3.** Heterojen kabuk segmenti boyunca elipsoidal-şığ bir magma odası ve geometrik ilişkileri gösteren üç boyutlu sayısal model kurulumu. Magma Odası 5 MPa'lık içsel basınç ile baskılanmaktadır. Magma odası 10 X 4 X 4 km boyutlarına sahiptir.

**Figure 3.** Three-dimensional numerical model setup showing an ellipsoidal-shallow magma chamber and its geometric relationships along a heterogeneous crustal segment. The magma chamber has an internal pressure of 5 MPa. The dimensions of the magma chamber are 10 X 4 X 4 km.

## Eşitlikler

Radyoaktif ısı transferi ihmal edilerek COMSOL'un "Heat Transfer in Solids" ara yüzünde aşağıdaki eşitlik kullanılmış olup:

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = q_0 + Q_{ted} + Q \quad (1)$$

burada,  $\rho$  yoğunluk, sabit stres altında özgül ısı, mutlak sıcaklık, öteleme hareketinin hız vektörü;  $Q$  diğer kaynaklardan ısı transferi (bu durum şığ magma Odası ya da derin magma rezervuarını temsil eder);  $q$  konduksiyon ısı akısını temsil etmekte olup aşağıdaki eşitlikte tanımlanır:

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

burada,  $k$  daha önce de bahsedildiği gibi termal konduktivite değeridir.  $Q_{ted}$  katılardaki termoelastik etkileri açıklayan bir termoelastik sönümlemedir ve yalnızca ısı transferi katı mekânine bağlandığında geçerlidir ve şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{ted} = -\alpha T: \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

burada daha önce bahsedildiği gibi,  $\alpha$  termal gerilme sabiti ve  $S$  ikinci Piola-Kirchhoff stres tensor değeridir.

## Sınır Koşulları ve Parametreler

Isı transferi simülasyonları için; hesaplama alanının ( $T_{up}$ ) üst yatay sınırının (yerküre yüzeyi) sıcaklığı 10 °C olarak ayarlanmıştır. Magma odasının magma rezervuar duvar sıcaklığı ( $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$ ,  $T_{e3}$ ,  $T_{e4}$ ,  $T_{e5}$ ,  $T_{e6}$ ,  $T_{e7}$ ,  $T_{e8}$ ,  $T_{e9}$ ,  $T_{e10}$ ) 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 ve 1.000 °C olarak ayarlanmıştır. Hesaplama alanının sol tarafı, sağ tarafı ve alt sınırı için iki ek sıcaklık sınır koşulu kullanılır. Tüm modellerde, daha önce Jaupart vd. (1998) ve Eldursi vd. (2009) tanımladığı gibi, dikey kenarların sıcaklığı, alt yatay sınırdaki maksimum 765 °C'ye ulaşan her 1 km'lik derinlik artışı için sıcaklığın 25 °C arttığı derinliğin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$T_b(y)[^{\circ}C] = -30 y[km] \quad (4)$$

## Model Ağı (Mesh)

Simülasyonlarda dört yüzlü ikinci dereceden elemanlarla COMSOL'da önceden tanımlanmış son derece ince ağ örgüsü ayarları uygulanmıştır. Bu ağ ayarı, 6,4 km'lik bir maksimum öge boyutu ve 0,8 km'lik bir en küçük öge boyutu, 0,5 değerinde eğrilik katsayısı; 0,6 değerinde dar bölgelerin çözünürlük değeri ile 1,45'lik en büyük öge büyüme hızı tanımlanmıştır. Böylelikle modellerde kullanılan toplam eleman sayısı 85.719 olmuştur.

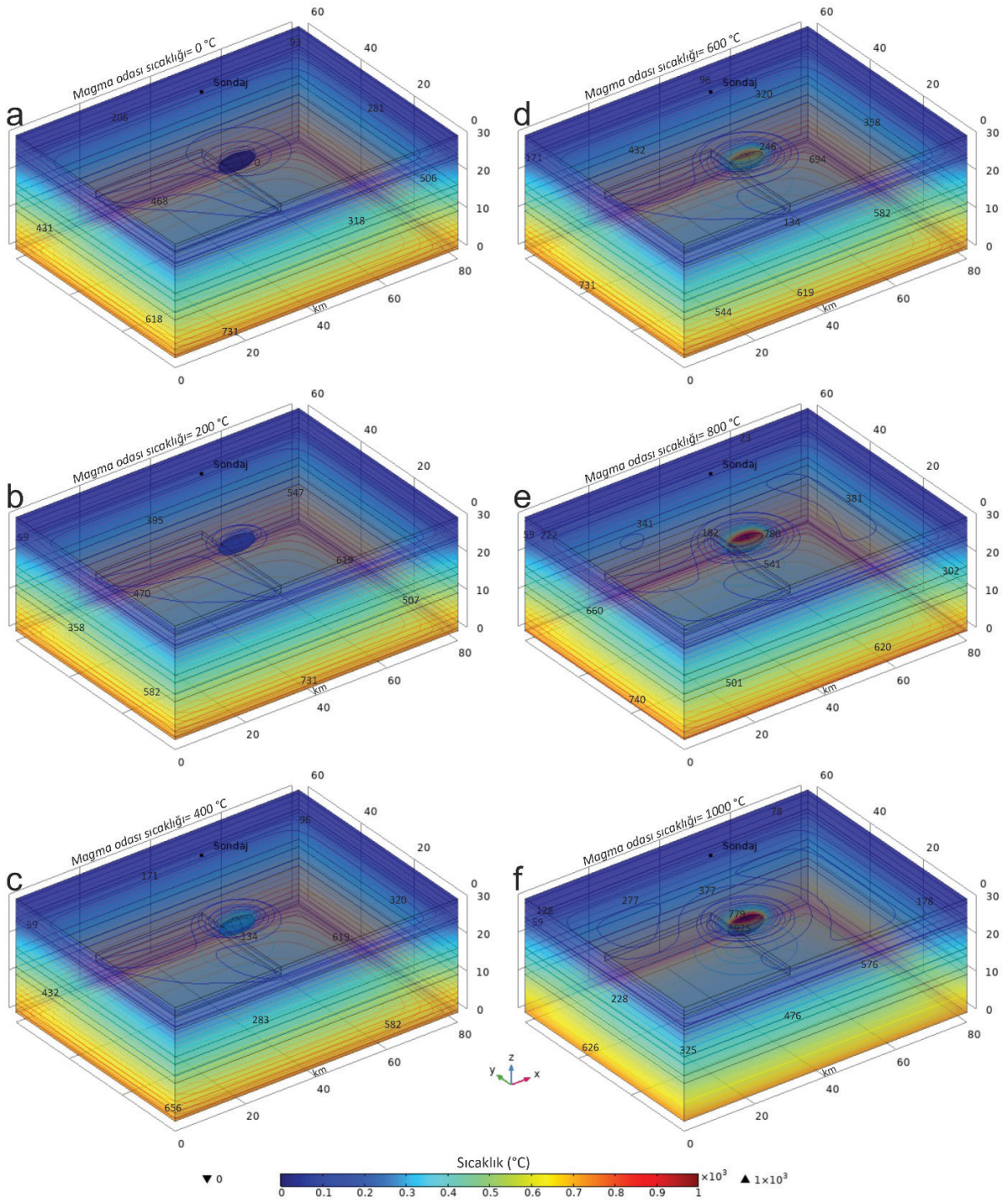
## BULGULAR

### Hasan Dağı Altında Magma Odası

Üç boyutlu hacimsel "ısı transferi" uygulamasında Hasan Dağı altında farklı sıcaklıklara sahip (0, 200, 400, 600, 800, 1.000 °C) magma odalarının heterojen kabuk boyunca sıcaklık dağılımları izlenmektedir (Şekil 4). Magma odası sıcaklığının etkin olmadığı (0 °C) durumda ortamda yalnızca termal gradyan ile ilgili sıcaklık dağılımı gözlenmektedir. 30 km derinlikteki sıcaklığın 765 °C olduğu yeniden hatırlanmalıdır (Şekil 4a). Magma odası sıcaklığı 200 °C olduğu durumda yalnızca magma odası ve çevresinde düşük seviyelerde bir ısı artışı olduğu söylenebilir (Şekil 4). 400 °C uygulamasında magma odasının 1 km'lik yakın çevresinde 134 °C sıcaklığa ulaştığı gözlenmektedir (Şekil 4c). Magma odasına 600 °C uygulamasında sondaj ve çevresinde 96 °C'lik sıcaklık değerleri dikkati çekmektedir (Şekil 4d). Magma odasına 800 °C uygulamasında magma odasının yanal olarak 3-4 km çevresinde 200 °C'ye sıcaklık değerleri izlenirken (Şekil 4e); 1.000 °C uygulamasında sondaj bölgesi ve çevresinde 128 °C civarı sıcaklık değerleri elde edilmektedir (Şekil 4f).

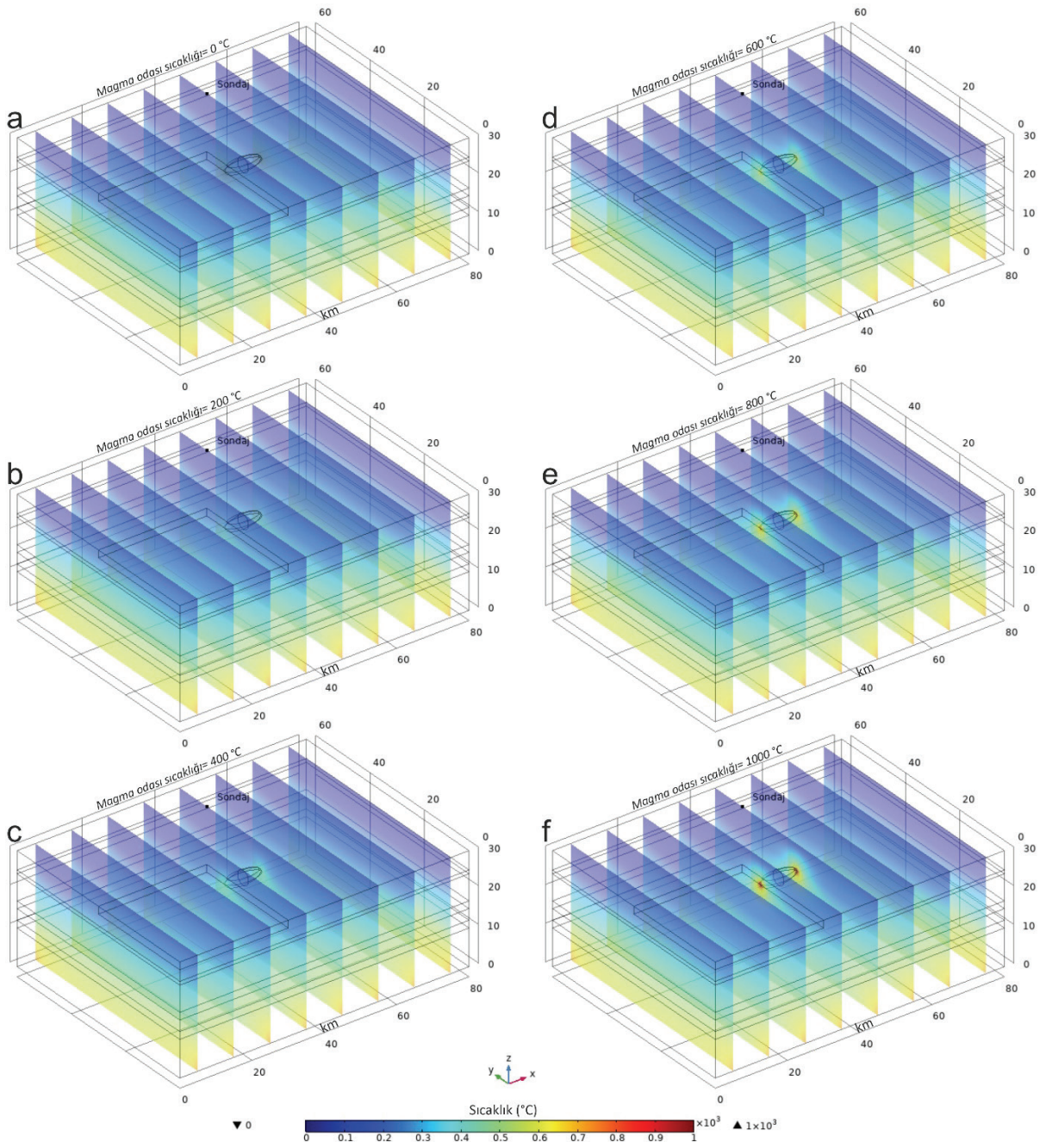
Aralarında 10 km aralıklar uygulanarak elde edilen dikey kesitler üzerinde sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 5). Tüm kesitlerde mavi renklerle simgelenen düşük sıcaklıklardan (minimum 10 °C) sarı renk ile gözlenen yüksek sıcaklıklara (maksimum 715 °C) olan dağılım ilişkileri izlenebilmektedir. Tüm uygulamalarda en yüksek sıcaklık değerleri magma odası çevresinde gözlenmektedir (Şekil 5). Magma odasının 1.000 °C olduğu uygulamada yüksek sıcaklık olarak sınıflanabilecek 600-700 °C sıcaklık değerlerinin en fazla 1 km yanal yayılımla olduğu izlenmektedir (Şekil 5).

Sondaj faaliyetinin yürütüldüğü maksimum derinliklerden birisi olan 3.814 metre boyunca kabuk içindeki sıcaklık dağılımlarının ölçülmesi için yatay bir kesit alınmıştır (Şekil 6). Söz konusu derinlikte (3.814 m) uygulanan farklı sıcaklığa sahip magma odaları için sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 6). Buna göre magma odasına uygulanan 0 °C ile beklendiği şekilde yalnızca bu derinlikteki termal gradyan değerleri elde edilmiştir. Sondaj bölgesinde 59 °C sıcaklık değeri gözlenmektedir (Şekil 6a). 200 °C uygulamasında, magma odası ve çevresinde 127 °C, sondaj bölgesinde 90 °C sıcaklık gözlenmektedir (Şekil 6b). Sıcaklık 400 °C'ye yükseldiğinde magma odası ve çevresinde 243 °C, sondaj bölgesinde yaklaşık 94 °C sıcaklık dağılımı söz konusudur (Şekil 6c). Magma odası sıcaklığı 600 °C olduğunda 1 km çevresine kadar 395 °C ve sondaj çevresinde 73 °C sıcaklık takip edilmektedir (Şekil 6d). Magma odası sıcaklığı 800 °C olması durumunda sondaj bölgesinde 82 °C (Şekil 6e); magma odası sıcaklığı maksimum 1.000 °C uygulanması durumunda ise sondaj bölgesi ve çevresinde 78 °C sıcaklık değeri elde edilmektedir (Şekil 6f).



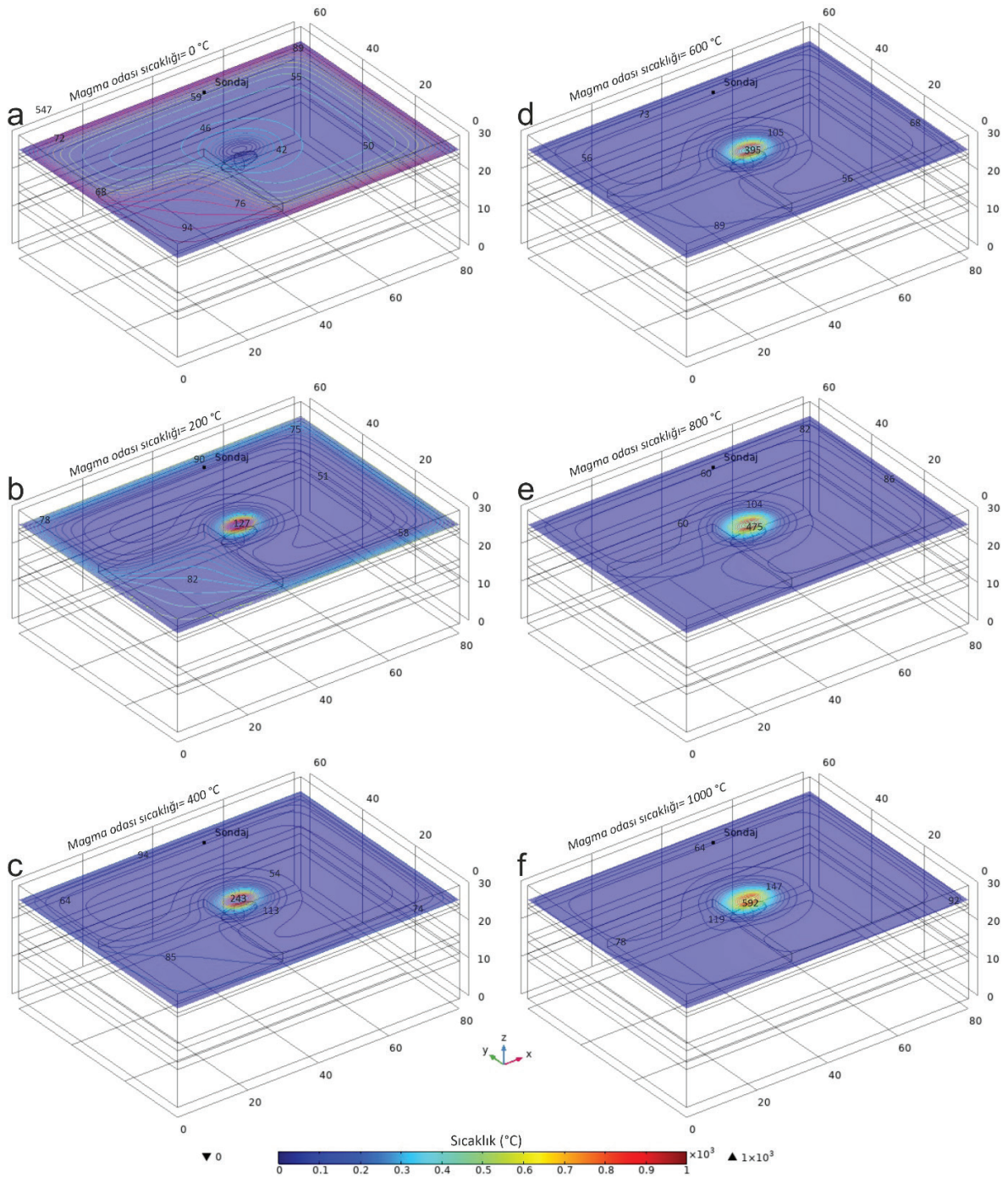
Şekil 4. Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca farklı sıcaklıklara sahip ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C ve (f) 1.000 °C) magma odasının neden olduğu hacimsel sıcaklık dağılımları.

Figure 4. Volumetric temperature distributions caused by the magma chamber with different temperatures ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C and (f) 1,000 °C) along the three-dimensional crustal segment beneath Hasan Dağı volcano.



**Şekil 5.** Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C ve (f) 1.000 °C) magma odasının neden olduğu, aralarında 10 km bulunan kabuğu dik kesen dilimler boyunca sıcaklık dağılımları.

**Figure 5.** Temperature distributions along slices perpendicular to the crustal segment at intervals of 10 km caused by the magma chamber with different temperatures ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C and (f) 1,000 °C) beneath Hasan Dağı volcano.



Şekil 6. Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C ve (f) 1.000 °C) magma odasının neden olduğu, 3814 metre derinliği temsil eden yanıl kesit boyunca sıcaklık dağılımları.

Figure 6. Temperature distributions along a lateral section representing a depth of 3814 meters caused by the magma chamber with different temperatures ((a) 0 °C, (b) 200 °C, (c) 400 °C, (d) 600 °C, (e) 800 °C and (f) 1,000 °C) beneath Hasan Dağı volcano.

Sıcaklık dağılımını daha iyi takip edebilmek için, 3.814 metre derinliğe sahip sondaj derinliğinde, yatay bir kesit üzerinde birbirinden 6 km aralıklı birbirine paralel 10 adet profil boyunca incelenmiştir (Şekil 7a). Magma odasına 0-1.000 °C aralığında farklı sıcaklık uygulamaları simüle edilmiştir. Buna göre tüm profiller boyunca ortalama 100 °C sıcaklık değerleri izlenirken en yüksek sıcaklık magma odasının tam üzerinden geçen profilden ve 1.000 °C uygulanarak maksimum 600 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 7a). Sondaj faaliyetinin gerçekleştirildiği alandaki sıcaklık dağılımını daha detaylı izlemek amacıyla elde edilen *Profil 1* boyunca lokal sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 7b). Söz konusu kesit boyunca ortalama 45 °C; 1.000 °C magma odası uygulaması sonucunda ise maksimum 57 °C sıcaklık değerleri hesaplanmıştır (Şekil 7b).

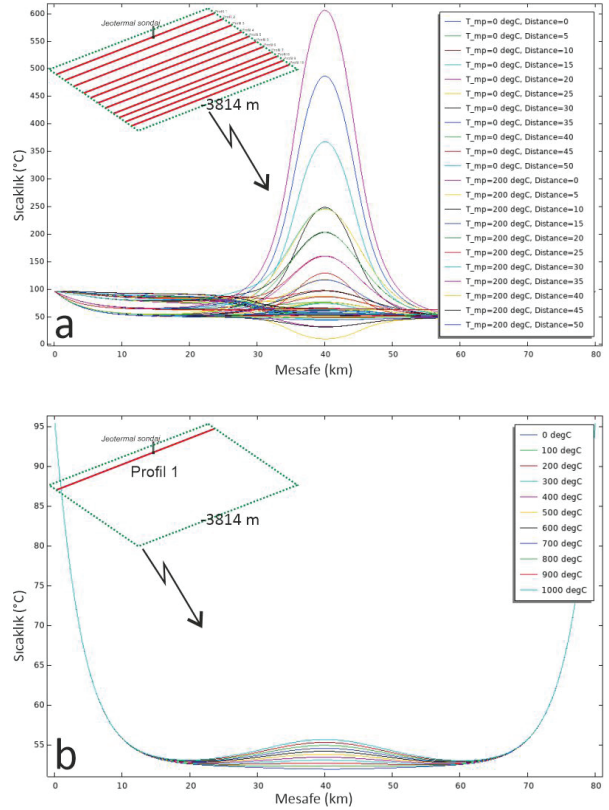
### Çiftlik-Bozköy Altında Magma Odası

3814 metre derinlikte, aynı geometriye ancak farklı derinliklere sahip (7, 8, 9 ve 10 km) magma odalarına 0-1.000 °C arasında 100 °C aralıklarla sıcaklıklar uygulanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Sondaj faaliyetinin yürütülmüş olduğu bölgenin 7 km altında ve magma odası 0-1.000 °C arası 10 farklı sıcaklık uygulanması durumunda, en yüksek sıcaklık 600 °C'ye ulaşmaktadır (Şekil 8a). Magma odası 8 km olması durumunda 3.814 metre derinlikte en fazla 360 °C sıcaklık değeri gözlenirken (Şekil 8b); 9 km derinlikte en yüksek 210 °C sıcaklık dağılımı gözlenmektedir (Şekil 8c). Daha da derine 10 km'ye yerleşen magma odasının ortalama 70 °C iken en yüksek yaklaşık 150 °C olarak hesaplanmıştır (Şekil 8d).

### TARTIŞMA ve SONUÇ

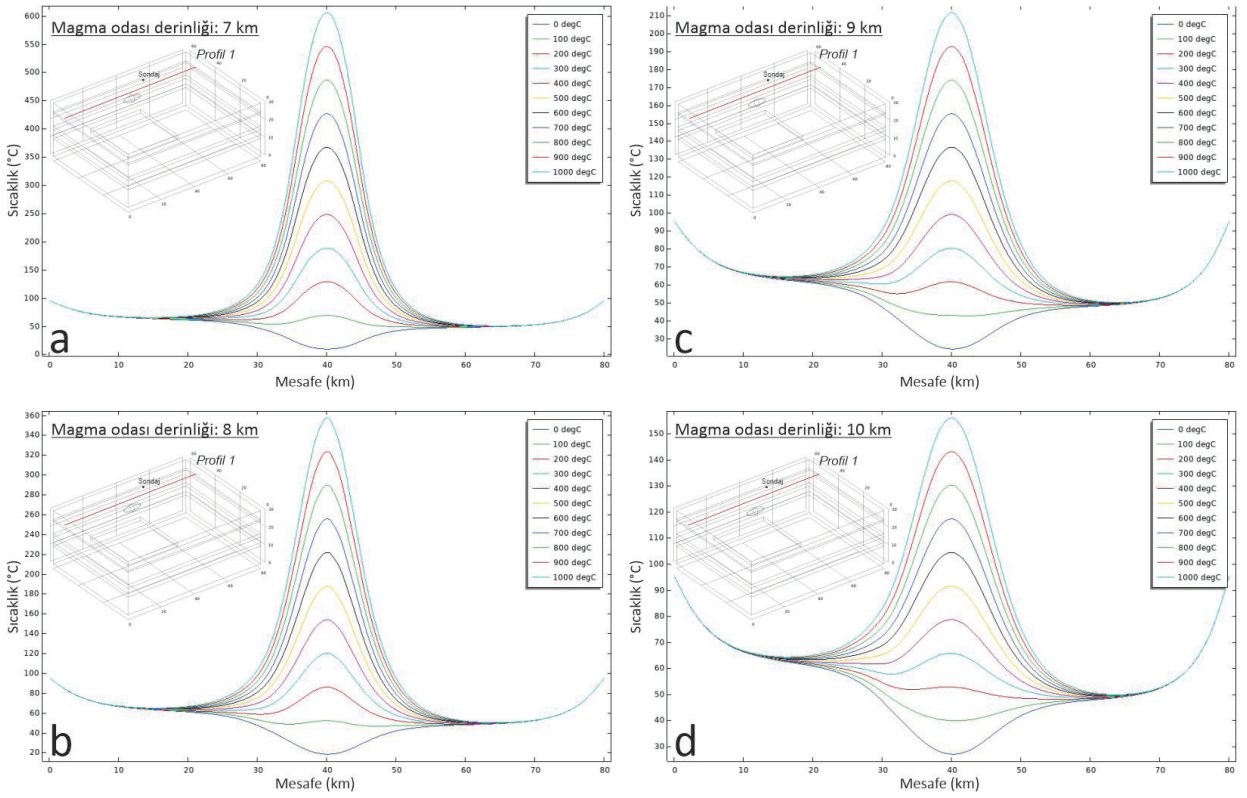
Bu çalışmada iki soruya cevap aranmaktadır: Hasan Dağı volkanı altında MT yöntemiyle saptanan magma odasının ısı transferi ve termal gradyana olan etkisi nasıldır? Diğer soru ise 3S Kale enerji

şirketi tarafından gerçekleştirilen Türkiye'nin en derin sondajlarından elde edilen sıcaklık değerleri için gerekli olan ısıtıcı kaynağın sıcaklık değeri ve kabuk içindeki derinliği nedir? Bu sorulara cevap bulabilmek için sayısal modelleme çalışmaları yapılmış olup ısıtıcı kaynağın termal özelliklerine ilişkin önemli bilgiler elde edilmiştir.



**Şekil 7.** Hasan Dağı volkanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip (0 °C – 1.000 °C) magma odasının neden olduğu, 3.814 metre derinliği temsil eden yanıl kesit üzerinde, **a)** farklı profiller boyunca **b)** Jeotermal sondaj bölgesini kesen Profil 1'den elde edilen sıcaklık dağılımları.

**Figure 7.** Temperature distributions obtained from different profiles **a)** along a lateral section representing a depth of 3,814 meters and **b)** from Profile 1 intersecting the geothermal drilling area, caused by the magma chamber with temperatures ranging from 0 °C to 1,000 °C beneath Hasan Dağı volcano.



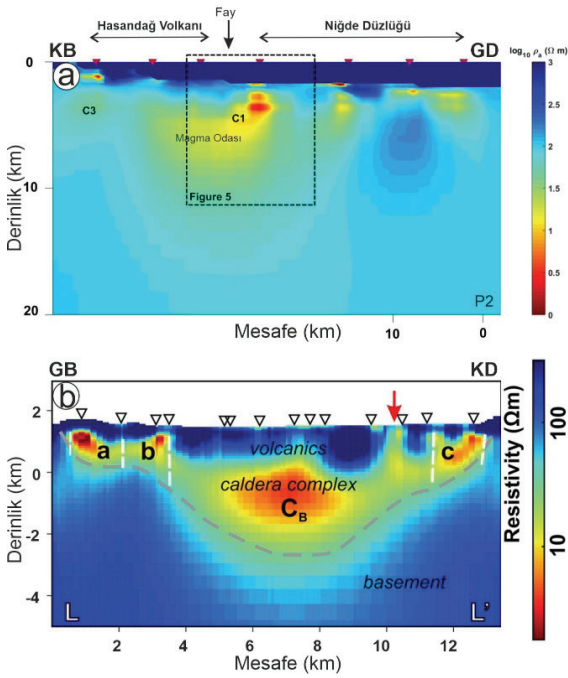
**Şekil 8.** Çiftlik-Bozköy volkanik alanı altında, üç boyutlu kabuk segmenti boyunca, farklı sıcaklıklara sahip (0 °C – 1.000 °C) magma odasının (a) 7 km, (b) 8 km, (c) 9 km ve (d) 10 km derinlikte jeotermal sondaj bölgesini kesen Profil 1’den elde edilen sıcaklık dağılımları.

**Figure 8.** Temperature distributions obtained from Profile 1 intersecting the geothermal drilling area at depths of (a) 7 km, (b) 8 km, (c) 9 km, and (d) 10 km beneath the Çiftlik-Bozköy volcanic field.

Manyetotellürik veriler Hasandağı Volkanı’nın kabuk boyunca merkez konisinin tam altı yerine; 3-4 km güneydoğusuna doğru magma odasına işaret eden düşük rezistivite değerleri göstermektedir (Şekil 9; Tank ve Karas, 2020). Çiftlik-Bozköy alanı altında ise söz konusu depresyon alanının merkezi olarak tam altında 2-4 km derinlikte oldukça düşük rezistivite değerleri elde edilmiş olup araştırmacılar bunları kaldera yapısı içerisinde değerlendirmiş olup magma odasına ilişkin veri sunmamışlardır (Hacıoğlu vd., 2023). Ancak bu bölge altında magma odası varsayımıyla gerçekleştirilen numerik modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçların (Dornadula vd., basımda), son dönemde gerçekleştirilen

manyetotellürik sonuçları ile örtüşmediği görülmektedir (Hacıoğlu vd., 2023). Ayrıca bu bölge altında 5 km altında magma odası bulunması durumunda, bu bölgeyi yaklaşık 4 km derinliğe ulaşan derin sondaj faaliyetleri sonucunda, visko elastik özellik sergileyen litolojik özelliklere sahip, magma odasının neredeyse çatısına ulaşılması beklenirdi. Bu açıdan, güncel manyetotellürik çalışmalarının bir magma odasının bulunmadığını belirtmeleri sebebiyle, Şahinkalesi (Çiftlik-Bozköy) volkanik bölgesi altında 5 km derinlikte bir magma odasının varsayımıyla gerçekleştirilen numerik modelleme sonuçlarının (Dornadula vd., basımda) yeniden değerlendirmeye ihtiyaç vardır.





**Şekil 9. a)** Hasandağı (Tank ve Karaş, 2020) ve **b)** Çiftlik-Bozköy (Hacıoğlu vd., 2023) volkanik bölgelerinde belirli profil doğrultularından üç boyutlu ters çözüm modelleme ile elde edilen resistivite haritaları.

**Figure 9.** Resistivity maps obtained by three-dimensional inversion modelling of some profile directions in the volcanic regions of **a)** Hasan Dağı (Tank and Karaş, 2020) and **b)** Çiftlik-Bozköy (Hacıoğlu et al., 2023).

Hasan Dağı volkanı altında, 1000 °C yüksek sıcaklık değerlerine sahip magma odası dahi Çiftlik-Bozköy bölgesindeki 3814 metre derinlikteki kabuğu, ancak 78 °C civarı ısıtmaktadır. Söz konusu sondajlardan elde edilen 295 °C (3.814 metre) ve 341 °C (3.957 metre) sıcaklık değerleri göz önüne alındığında Hasan Dağı volkanı altındaki bir ısıtıcı kaynağın Çiftlik-Bozköy bölgesindeki yüksek jeotermal gradyanın ısı kaynağı olarak işlev görmesi mümkün gözükmemektedir.

Hasan Dağı altındaki ısıtıcı kaynak işlevi gören magma odasının MT çalışmaları ile

önerilen 6-7 km derinliğe ve birkaç bin yıl önceki etkinlikleri dikkate alınarak 800-1.000 °C arası bir sıcaklığa sahip olması durumunda ana koninin yakın çevresinde potansiyel sıcak gradyana (3.814 metrede) ulaşması teorik olarak mümkündür (400-600 °C). Ancak düzlük alanda yapılması planlanacak bir sondaj faaliyeti düşünüldüğünde, modelleme çalışmalarından örneğin Hasan Dağı güneybatısında bulunan Taşpınar bölgesinde (Şekil 1) 3.814 metrede 120 °C; 3.000 metrede 90 °C; 2.000 metrede 74 °C; 1.000 metrede 41 °C gibi sıcaklık değerlerine ulaşılacağı söylenebilir.

Çiftlik-Bozköy bölgesinde yürütülen jeotermal sondaj ve sonraki süreçte devam edecek üretim planlanması için bu bölgedeki ısıtıcı kaynağın derinliği, geometrisi ve sahip olduğu sıcaklık değeri önem arz edecektir. Her ne kadar Bilim vd. (2017) yaptıkları çalışmada çapı yaklaşık 50 km olan bir gömülü kaldera yapısı ile bölgenin termomekanik özelliklerini rapor etmiş olsalar da Hacıoğlu vd. (2023) bölge altındaki gömülü kalderanın yaklaşık 13 km genişliğinde olduğunu önermişlerdir (Şekil 9). Söz konusu ticari girişimin 4 km'ye yaklaşan sondajlardan elde edilen sıcaklık verileri dikkate alındığında, bu sıcaklık değerlerine ulaşmak için en az 7 km derinlikte 600-700 °C (Şekil 8a) ve/veya 8 km derinlikte 900-1.000 °C'ye sahip ısı kaynağı işlevinde olan magma odasına (magma odası çatısı) ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak daha derin koşullarda (9, 10 km ve fazlası) kabuk boyunca yerleşen magma odası söz konusu sıcaklıkları üretmeyeceği için magma odası derinliğinin en fazla 8 km olması gerektiğini ifade etmek mümkündür. Manyetotellürik çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile nümerik modelleme çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde, magma odasının en az 8 km derinlere ulaşan ve en sıcak bölgesini temsil eden merkez kısmının; kabuğun sıg kesimlerine doğru, yaklaşık 7 km derinlikte, nispeten soğumaya maruz kalmış ergiyik-katı faz geçiş zon ile temsil edilen magma odası çatı kısmının olduğu; 2-3 km derinliklerde ise katı

halde 200-300 °C sıcaklık değerlerinde ısıtılmış kayaçların var olduğu söylenebilir. 7-8 km derinlikte üst çatısı bulunan bir magma odası ve sondaj faaliyetlerinin yaklaşık 4 km'ye kadar yalnızca elastik özellik gösteren katı kayaçlarda yürütüldüğü göz önünde bulundurulduğunda söz konusu magma odasının, sil şeklinde, düşük kalınlık sergileyen (2-3 km), ancak kabuk boyunca yanal yayılan bir geometride olduğu iddia edilebilir.

Saha çalışmaları ve yayınlanan jeofizik ölçümlere dayanarak Bozkurt-Çiftlik bölgesinin oldukça büyük bir püskürüm merkezi olduğu söylenebilir. Karaoğlu vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre, çapı 8-8,5 km olan Nemrut Kalderası'nın en az 64 km<sup>3</sup> hacminde piroklastik malzeme püskürttüğü dikkate alındığında, çapı 13 km'ye kadar ulaşan bir kaldera oluşumu için birkaç yüz km<sup>3</sup>'lük piroklastik malzemenin boşalmasına tekabül edebilir. Bu hacimdeki malzemenin Kuvaterner dönemi boyunca püskürümü, aynı zamanda magma odasının özellikle üst kesiminde önemli bir boşluk oluşumuna neden olabileceği düşünülebilir. Bu çalışmadaki magma odasının çatısına ilişkin 7-8 km olan derinlik hesabının, oldukça yüksek hacimde köpürmüş magma püskürümü de göz önüne alındığında, kaldera-oluşturan püskürümler sırasında magma odası çatı derinliğinin birkaç km daha yüzeye yakın (3-4 km) olabileceği iddia edilebilir.

### **EXTENDED SUMMARY**

*The Cappadocia Volcanic Region (CVR) has recently garnered attention for its geothermal energy potential. The presence of buried caldera structures and plutons embedded in the active crust signifies the primary heat sources in the region. Numerous geophysical studies have been conducted concerning the potential eruption centres of ignimbrites that extend across extensive plains within the CVR region, some of which*

*reach several hundred meters in height (e.g., Pasquare et al., 1988; Le Pennec et al., 1994; Toprak, 1998; Froger et al., 1998; Koşaroğlu et al., 2016; Bilim et al., 2017; Aydemir et al., 2019). Thanks to some research on buried caldera structures in the region, these collapse structures have been identified, especially in the central and western parts of the CVR. Pasquare et al. (1988) proposed the Melendiz stratovolcano and the Çiftlik region as potential eruption centres for the ignimbrites predominantly exposed in the western part of the KVP. Bilim et al. (2017) posited that the region encompassing Aksaray-Nevşehir-Niğde-Yeşilhisar, with a diameter exceeding 50 km, exhibits characteristics of a depression or caldera (Figure 1). Additionally, researchers have documented the geothermal gradient of the region to be in the range of 50-68 °C/km, with heat flux values ranging from 2.3 to 2.7 Wm<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, and radiogenic heat flux production values spanning from 0.45 to 0.70 W m<sup>-3</sup>. Şener et al. (2023) conducted geothermometer temperature calculations in the Cappadocia region, yielding various temperature values for areas proximate to the study location. Chalcedony geothermometer estimations reported temperatures ranging from 54 to 126 °C in Nevşehir, 48 to 159 °C in Aksaray, and 73 to 159 °C in Niğde. Quartz geothermometer calculations indicated temperature values spanning from 85 to 173 °C in Nevşehir, 79 to 180 °C in Aksaray, and 102 to 180 °C in Niğde.*

*In a statement on the website of the commercial enterprise in question (URL1, 2023), it was reported that (i) Turkey's hottest well was discovered by drilling to a depth of 3,814 meters in 2016 under the Bozköy licence. This well, boasting a bottom temperature of 295 °C was confirmed to have the capacity for steam production (Figure 1). The second well, drilled in the same field in 2021 to a depth of 3,957 meters, recorded a bottom temperature of 341 °C, establishing both wells as the ones with the highest bottom temperatures in Turkey.*

*In this study, I investigate whether the heat source lies in Hasandağı volcano or if there is an undisclosed heat source beneath this region. To accomplish this, I conducted heat transfer analyses in solid lithologies employing the licenced Comsol Multiphysics 6.1 programme (Tabatabaian, 2014).*

*During the late Cenozoic, the convergence of the Eurasian, African, and Arabian plates culminated in collisions that significantly influenced the regional geological landscape. The Central Anatolian plateau responded to these orogenic events with extensive tectonic deformations, rapid crustal uplift, and a surge in high-volume volcanic activity. Over the past 10 million years, the Central Anatolian Plateau has undergone an elevation of approximately 1 km, resulting in its present topography (Cosentino et al., 2011; Yildirim et al., 2011; Schildgen et al., 2012).*

*Keçikalesi volcano, situated to the southwest of Hasandağı, represents one of the earliest volcanic activities in the western part of the KVP (Figure 1 and 2). Besang et al. (1977) dated these volcanic products to have erupted between  $13.7 \pm 0.3$  Ma and  $12.4 \pm 0.6$  Ma.*

*The Çiftlik-Bozköy region displays an elliptical morphology, with 6-6.5 km in diameter. A substantial pyroclastic unit underlies the alluvial material derived from volcanic sources, reaching several tens of meters in thickness at its apex. Intermediate volcanic rocks are predominantly found within this ignimbritic cover, extending from the vicinity of Bozköy and Çardak to the Yeşilköy ridges (Figure 1 and 2).*

*Magnetotelluric (MT) measurements conducted by Tank and Kardeş (2020) covered 27 locations in the southern areas of Hasandağı, Keçiboyduran, and Melendiz mountains. Their findings suggest the presence of a potential magma chamber with a depth of 4-6 km and a width of roughly the same magnitude, in two-dimensional profiles extending approximately 45 km southwest*

*of Hasandağı towards the Niğde plain. Hacıoğlu et al. (2023) have identified a buried caldera with a depth of 3 km and a diameter of up to 12 kilometers, following MT studies conducted in 60 locations, including the Çiftlik region north of Melendiz Mountain. However, researchers reported that have yet to find definitive evidence of a magma chamber in this area (Hacıoğlu et al., 2023).*

*In this study, I explore the analytical connection between the data regarding the magma chamber and heat source and the temperature values derived from deep well measurements conducted by the aforementioned commercial enterprise.*

*In the three-dimensional “heat transfer” simulation, temperature distributions for magma chambers with varying temperatures (0, 200, 400, 600, 800, 1,000 °C) beneath Hasandağı volcano are observed throughout the heterogeneous crust (Figure 3). In scenarios where the magma chamber temperature is inactive (0 °C), only temperature distributions related to the thermal gradient are observed in the environment. It is essential to note that the temperature at a depth of 30 km remains at 765 °C (Figure 3a). When the magma chamber temperature was set to 200 °C, a modest increase in temperature was observed in the magma chamber and its immediate surroundings (Figure 3b). With a temperature application of 400 °C, the magma chamber’s temperature rises to 134 °C within a radius of approximately 1 km (Figure 3c). In the 600 °C scenario, temperature values around 96 °C are notable in the borehole and its vicinity (Figure 3d). Applying an 800 °C temperature to the magma chamber results in temperature values reaching up to 200 °C within a lateral radius of 3-4 km from the chamber (Figure 3e). In the 1,000 °C scenario, temperature values around 128 °C were observed in and around the drilling area (Figure 3f).*

Temperature distributions were analysed on vertical sections spaced at 10-km intervals (Figure 5). In all sections, temperature distributions range from lower temperatures (minimum 10 °C, indicated in blue) to higher temperatures (maximum 715 °C, indicated in yellow). In all scenarios, the highest temperature values were concentrated around the magma chamber (Figure 5). For the 1,000 °C magma chamber scenario, temperature values classified as high (600-700 °C) extend no more than 1 km laterally from the chamber (Figure 5).

A horizontal section was created to assess the temperature distributions within the crust at a depth of 3,814 meter, which corresponds to one of the maximum drilling depths (Figure 6). The temperature distributions were examined for magma chambers with various temperatures at this depth (Figure 6). When a 0 °C magma chamber scenario is considered, only thermal gradient values at this depth are observed, resulting in a temperature of 59 °C in the drilling area (Figure 6a). For a 200 °C scenario, the magma chamber and its surroundings reach a temperature of 127 °C, while the drilling area records 90 °C (Figure 6b). Increasing the magma chamber temperature to 400 °C results in a temperature distribution of approximately 94 °C within the chamber and its surroundings, and 243 °C in the drilling area (Figure 6c). When the magma chamber temperature is set to 600 °C, the temperature rises to 395 °C within a 1-km radius of the chamber and drops to 73 °C around the drilling area (Figure 6d). In the case of an 800 °C magma chamber, the drilling area records a temperature of 82 °C (Figure 6e), and a 1,000 °C magma chamber scenario results in a temperature of 78 °C in the drilling area and its surroundings (Figure 6f).

To provide a comprehensive view of the temperature distribution, 10 parallel profiles, spaced 6 km apart, were examined on a horizontal section at a drilling depth of 3814 m (Figure 7a). Various temperature scenarios ranging

from 0-1,000 °C were simulated within the magma chamber. Across all profiles, the average temperature remains around 100 °C. However, directly above the magma chamber with a 1,000 °C application, the highest recorded temperature reached 600 °C (Figure 7a). For a more detailed analysis of temperature distribution within the drilling area, local temperature distributions were examined along Profile 1 (Figure 7b). The average temperature along this section is approximately 45 °C, with a maximum temperature of 57 °C calculated because of the 1,000 °C magma chamber scenario (Figure 7b).

A series of simulations were conducted by applying temperatures ranging from 0 to 1,000 °C at 100 °C intervals to magma chambers with identical geometry but varying depths (7, 8, 9, and 10 km) at a depth of 3814 m (Figure 8). When temperatures between 0-1,000 °C were applied to the magma chamber located 7 km below the drilling area, the highest temperature recorded was 600 °C (Figure 8a). In the case of an 8 km deep magma chamber, a maximum temperature of 360 °C was observed at a depth of 3,814 m (Figure 8b). The highest temperature, reaching 210 °C, was observed at a depth of 9 km (Figure 8c). For the magma chamber located 10 km below the surface, the average temperature was approximately 70 °C, with the highest temperature estimated to be approximately 150 °C (Figure 8d).

This study aimed to address two fundamental questions: first, the impact of the magma chamber detected using magnetotelluric (MT) data beneath Hasandağı volcano on heat transfer and thermal gradients; and second, the determination of the temperature and depth of the heat source required to explain the temperature values observed in Turkey's deepest boreholes, which were conducted by 3S Kale Energy Company. Through numerical modeling, this study has yielded valuable insights into the thermal properties of a heat source.

Magnetotelluric data have demonstrated the presence of Hasandağı volcano's magma chamber, not just beneath its central cone but extending along its crust, notably towards the southeast (Figure 9; Tank and Karas, 2020). In contrast, under the Çiftlik-Bozköy region, very low resistivity values were detected at depths of 2-4 km, precisely beneath the centre of the depression area, suggesting a caldera structure. However, it is important to highlight that data regarding the magma chamber in this region were not presented in the findings by Hacıoğlu et al. (2023). However, it is evident that the outcomes derived from numerical modeling studies, assuming the presence of a magma chamber beneath this region (Dornadula et al., in press), do not align with recent magnetotelluric results (Hacıoğlu et al., 2023). Furthermore, considering deep drilling activities reaching a depth of approximately 4 km in this region, if there were a magma chamber 5 km below, it would be anticipated to approach the roof of the magma chamber, which is characterized by lithological features displaying viscoelasticity. Consequently, it is necessary to reassess the numerical modeling results (Dornadula et al., in press), which were conducted assuming a magma chamber at a depth of 5 km beneath the Şahinkalesi (Çiftlik-Bozköy) volcanic region, given the current magnetotelluric studies indicating the absence of a magma chamber.

Even under the conditions of an active magma chamber at its highest temperature, i.e., 1000 °C beneath Hasandağı volcano, the crust at a depth of 3,814 m in the Çiftlik-Bozköy region registers an increase of approximately 78 °C. Considering the temperature measurements, which recorded 295 °C at 3814 m and 341 °C at 3,957 m from the boreholes in question, it is improbable for the heat source beneath Hasandağı volcano to account for the high geothermal gradient observed in the Çiftlik-Bozköy region.

Assuming that the magma chamber is situated at a depth of 6-7 km, as suggested by

MT studies, and maintains temperatures between 800 and 1,000 °C, it is theoretically feasible that it may induce a high geothermal gradient (3,814 m) in close proximity to the main cone. Such an elevation might reach temperatures approximately 400-600 °C. However, in the context of planned drilling activities on the plain, modeling studies indicate that, for instance, the Taşpınar region located southwest of Hasandağı volcano would reach temperatures of approximately 120 °C at 3814 m (Figure 1), 90 °C at 3,000 m, 74 °C at 2,000 m, and around 41 °C at 1,000 m.

The depth, geometry, and temperature characteristics of the heat source in this region have vital implications for geothermal drilling in the Çiftlik-Bozköy region and future production planning. While Bilim et al. (2017) reported a buried caldera structure with an approximate diameter of 50 km, Hacıoğlu et al. (2023) proposed a caldera stretching up to 13 km wide (Figure 9). Considering the temperature data obtained from drillings close to 4 km of the commercial enterprise, it is essential to have a heat source with temperatures of 600-700 °C at a depth of 7 km (Figure 8a) and/or 900-1,000 °C at a depth of 8 km to explain these temperature values. This would require the presence of a magma chamber, specifically the magma chamber's roof. Yet, in deeper conditions (9, 10 km, or more), it is plausible to deduce that the magma chamber's depth must be no more than 8 km, as magma chambers located along the crust cannot generate the observed temperature values. When I take into account the results from magnetotelluric studies and numerical modeling, I can infer that the central section of the magma chamber, located at a depth of at least 8 km and representing the hottest region, coexists with the shallower parts of the crust at around 7 km depth. This upper section of the magma chamber, which corresponds to the phase transition zone between molten and solid states, has undergone relatively cooling and gives rise to temperatures between 200 and 300 °C within solid rock at depths of 2-3 km. Taking

into account the presence of a magma chamber with an upper roof situated at a depth of 7-8 km and the drilling activities conducted in solid rocks exhibiting only elastic properties up to a depth of approximately 4 km, it can be asserted that the magma chamber in question possesses a sill-shaped geometry. This geometry is characterised by low thickness (2-3 km) but extends laterally throughout the shallow crustal setting.

Based on field studies and published geophysical measurements, the Bozkurt-Çifilik region has been identified as a substantial eruption centre. Karaoğlu et al. (2005) proposed that the Nemrut Caldera, with a diameter of 8–8.5 km, expelled at least 64 km<sup>3</sup> of pyroclastic material. The formation of a caldera with a diameter of up to 13 km implies the discharge of several hundred km<sup>3</sup> of pyroclastic material. The eruption of such a volume during the Quaternary period could have led to the creation of a significant void, particularly in the upper part of the magma chamber. Considering the depth estimate of 7–8 km for the magma chamber roof in this study and the eruption of extensive volumes of frothy magma, it can be argued that the depth of the magma chamber roof during caldera-forming eruptions may be a few km closer to the surface (3–4 km).

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi tarafından desteklenen projelerle gerçekleştirilmiştir (Proje Numaraları: 201815A203, 202015D10, 201715A215, 201715031, FCD-2023-2795, FHD-2023-2784, FYL-2022-2482). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi BAP Birimine teşekkür ederim. Bu makale, editörlüğünü Oğuz GÖĞÜŞ'ün yaptığı "Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı" için hazırlanmış olup, kendisine teşekkürlerimi sunarım. Dergi Editörü Erdinç YİĞİTBAŞ, hakemlikleriyle makaleye değerli katkılar sunan Alper BABA ve Emin Uğur ULUGERGERLİ'ye içtenlikle teşekkür ederim.

## ORCID

Özgür Karaoğlu  <https://orcid.org/0000-0003-2627-4686>

## KAYNAKLAR / REFERENCES

- Atabey, E. (1989). *1/100.000 ölçekli açınısama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H19 (K33) Paftası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Aydar, E. (1992). *Etude Volcano-Structurale et Magmatologique du Strato-Volcan Hasan Dagi (Anatolie Central-Turquie)*, [Yayınlanmamış Doktora Tezi]. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- Aydar, E. & Gourgaud, A. (1998). The geology of Mount Hasan stratovolcano, central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 129–152.
- Aydemir, A., Bilim, F., Kosaroglu, S. & Buyuksarac, A. (2019). Thermal structure of the Cappadocia region, Turkey: a review with geophysical methods. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 1, 243-254. <https://doi.org/10.1007/s42990-019-00011-7>
- Besang, C., Eckhardt, F. J., Harre, W., Kreuzer, H. & Muller, P. (1977). Radiometrische Altersbestimmungen an Neogenen Eruptivgesteinen der Türkei. *Geologisches Jahrbuch*, 25, 3–36.
- Bilim, F., Kosaroglu, S., Aydemir A. & Buyuksarac, A. (2017). Thermal investigation in the Cappadocia Region, Central Anatolia-Turkey, analyzing the Curie Point Depth, Geothermal Gradient and Heat Flow maps from the aeromagnetic data. *Pure and Applied Geophysics*, 147, 4445–4458.
- Caricchi, L., Annen, C., Blundy, J., Simpson, G. & Pinel, V. (2014). Frequency and magnitude of volcanic eruptions controlled by magma injection and buoyancy. *Nature Geoscience*, 7(2), 126–130. <https://doi.org/10.1038/ngeo2041>
- Chestler, S.R. & Grosfils, E.B. (2013). Using numerical modeling to explore the origin of intrusion patterns on Fernandina volcano, Galapagos Islands, Ecuador. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4565–4569.

- Cosentino, D., Schildgen, T.F., Cipollari, P., Faranda, C., Gliozzi, E., Hudáčková, N., Lucifora, S. & Strecker, M.R. (2011). Late Miocene surface uplift of the southern margin of the Central Anatolian Plateau, Central Taurides, Turkey. *Bulletin of Geological Society of America*, 124(1–2), 133–145.
- de Silva, S. L. & Gregg, P. M. (2014). Thermomechanical feedbacks in magmatic systems: Implications for growth, longevity, and evolution of large caldera-forming magma reservoirs and their supereruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 282, 77–91.
- Deniel, C., Aydar, E. & Gourgaud, A. (1998). The Hasan Dağı stratovolcano (Central Anatolia, 780 Turkey): Evolution from calc-alkaline to alkaline magmatism in a collision Zone. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87, 275–302.
- Dornadula, C., Singh, M., & Baba, A (basımda/in press). Sahinkalesi Massif, a Resurgent Dome and Super-Hot Egs Province: Hasandag Stratovolcanic Province, Central Anatolia. Available at SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4388412>
- Eldursi, K., Branquet, Y., Guillou-Frottier, L. & Marcoux, E. (2009). Numerical investigation of transient hydrothermal processes around intrusions: Heat-transfer and fluid-circulation controlled mineralization patterns. *Earth Planetary Science Letters*, 288(1–2), 70–83.
- Ercan, T., Tokel, S., Can, B., Fişekçi, A., Fujitani, T., Notsu, K., Selvi, Y., Olmez, M., Matsuda, J.I., Ui, T., Yıldırım, T. & Akbaşlı, A. (1990). Hasan Dağı-Karacadağ Orta Anadolu dolaylarındaki Senozoyik yaşlı volkanizmanın kökeni ve evrimi. *Jeomorfoloji Dergisi*, 18, 39–54.
- Froger, J. L., Lenat, J. F., Chrowicz, J., Le Pennec, J. L., Bourdier, J. L., Kose, O., Zimitoğlu, O., Gündoğdu, N. M. & Gaugaud, A. (1998). Hidden calderas evidenced by multisource geophysical data; example of Cappadocian Calderas, Central Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185, 99–128.
- Gelman, S. E., Gutiérrez, F. J. & Bachmann, O. (2013). On the longevity of large upper crustal silicic magma reservoirs. *Geology*, 41(7), 759–762.
- Gerbault, M., Cappa, F. & Hassani, R. (2012). Elasto-plastic and hydromechanical models of failure around an infinitely long magma chamber. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3), Article Q03009. <https://doi.org/10.1029/2011GC003917>
- Gudmundsson, A. (2012). Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237, 19–41.
- Hacıoğlu, Ö., Başokur, A. T., Meqbel, N., Arslan, H. İ. & Efeçinar, T. (2023). Magnetotellurics unveils a hidden caldera complex beneath the Cappadocia Volcanic Province, Central Anatolia, Türkiye. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 442, Article 107877. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107877>
- Jaeger, J. C. (1959). Temperatures outside a cooling intrusive sheet. *American Journal of Science*, 257(1), 44–54.
- Jaupart, C., Mareschal, J.C., Guillou-Frottier, L. & Davaille, A. (1998). Heat flow and thickness of the lithosphere in the Canadian Shield. *Journal of Geophysical Research* 103(B7), 15269–15286.
- Karakas, O., Degruyter, W., Bachmann, O. & Dufek, J. (2017). Lifetime and size of shallow magma bodies controlled by crustal-scale magmatism. *Nature Geoscience*, 10(6), 446–450. <https://doi.org/10.1038/ngeo2959>
- Karaoğlu, Ö. (2021). A numerical approach to verify the reservoir temperature of the Afyon geothermal fields, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(4), 536–550. <https://doi.org/10.3906/yer-2101-21>
- Karaoğlu, Ö., Özdemir, Y., Tolluoğlu, A., Karabiyikoğlu, M., Köse, O. & Froger, J. L. (2005). Stratigraphy of the volcanic products around Nemrut Caldera: implications for reconstruction of the caldera formation. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 14(2), 123–143.

- Karaoğlu, Ö., Browning, J., Bazargan, M., & Gudmundsson, A. (2016). Numerical modelling of triple-junction tectonics at Karlıova, Eastern Turkey, with implications for regional magma transport. *Earth and Planetary Science Letters*, 452, 157-170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.037>
- Kosaroglu, S., Buyuksarac, A. & Aydemir, A. (2016). Modeling of shallow structures in the Cappadocia region using gravity and aeromagnetic anomalies. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.005>
- Kuzucuoğlu, C., Pastre, J.F., Black, S., Ercan, T., Fontugne, M., Guillou, Hatté, C., Karabıyıkoglu, M., Orth, P. & Türkecan, A. (1998). Identification and dating of tephra layers from Quaternary sedimentary sequences of Inner Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 153–172.
- Le Corvec, N., Menand, T. & Lindsay, J. (2013). Interaction of ascending magma with pre-existing crustal fractures in monogenetic basaltic volcanism: an experimental approach. *Journal of Geophysical Research*, 118(3), 968–984. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50142>
- Le Pennec, J. L., Bourdier, J. L., Froger, J. L., Temel, A., Camus, G. & Gourgaud, A. (1994). Neogene ignimbrites of the Nevşehir plateau (Central Turkey): stratigraphy distribution and source constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 59–67.
- Nabelek, P. I., Hofmeister, A. M. & Whittington, A. G. (2012). The influence of temperature dependent thermal diffusivity on the conductive cooling rates of plutons and temperature- time paths in contact aureoles. *Earth and Planetary Science Letters*, 317-318, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.009>
- Okubo, Y., Graf, R. J., Hansen, R. O., Ogawa, K. & Tsu, H. (1985). Cruie Point Depths of the Island of Kyushu and Surrounding Areas, Japan. *Geophysics*, 50, 481–494.
- Pasquare, G., Poli, S., Vezzoli, L. & Zanchi, A. (1988). Continental arc volcanism and tectonic setting in Central Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 146, 217–230.
- Rodriguez, C., Geyer, A., Castro, A. & Villasenor, A. (2015). Natural equivalents of thermal gradient experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.021>
- Rozimant, K., Buyuksarac, A. & Bektas, O. (2009). Interpretation of magnetic anomalies and estimation of depth of magnetic crust in Slovakia. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 471–484.
- Schildgen, T. F., Cosentino, D., Bookhagen, B., Niedermann, S., Yildirim, C., Echtler, H., Wittmann, H. & Strecker, M. R. (2012). Multi-phased uplift of the southern margin of the Central Anatolian plateau, Turkey: a record of tectonic and upper mantle processes, *Earth and Planetary Science Letters* 317–318, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.003>
- Şener M. F., Baba, A., Uzelli, T., Akkuş, İ. & Mertoğlu, O. (2022). *Türkiye Jeotermal Kaynaklar Strateji Raporu*. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1-149 (in Turkish).
- Şener, M. F., Öztürk, M. Z. & Baba, A. (2023). A review of the geothermal system evolution and distribution in the Central Anatolian Crystalline Complex (Türkiye). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(6), 703-720. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1870>
- Tabatabaian, M. (2014). *COMSOL for Engineers*. Mercury Learning and Information, Boston, USA.
- Tank, S. B. & Karaş, M. (2020). Unraveling the electrical conductivity structure to decipher the hydrothermal system beneath the Mt. Hasan composite volcano and its vicinity, SW Cappadocia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 405, Article 107048. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107048>
- Toprak, V. (1998). Vent distribution and its relation to regional tectonics, Cappadocian volcanics, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85, 55–67.



Yildirim, C., Schildgen, T.F., Echtler, H., Melnick, D. & Strecker, M.R. (2011). Late Neogene and active orogenic uplift in the Central Pontides associated with the North Anatolian Fault: implications for the northern margin of the Central Anatolian Plateau, Turkey. *Tectonics*, 30(5). <https://doi.org/10.1029/2010TC002756>

URL 1: <https://3skaleenerji.com.tr/biz-kimiz/>: Eylül 2023.



**A Simple Model for Plate Motion and Topography**  
*Tektonik Levha Hareketiyle Oluşan Topoğrafyanın Fiziksel Modeli*

**Ömer F. Bodur**

*Sydney, NSW 2205, Australia*

• Geliş/Received: 27.03.2024 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 11.07.2024 • Kabul/Accepted: 11.07.2024  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 20.07.2024 • Baskı/Printed: 31.07.2024

*Research Article/Araştırma Makalesi*

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

**Abstract:** The traditional explanation of slow dynamic subsidence and uplift of tectonic plates solely depends on the vertical motion of mantle density anomalies. This has been challenged by observations of rapid and short-lived elevation changes exceeding 100 meters per-million-year in numerous sedimentary basins. Bodur et al., (2023) have shown that relative tectonic plate motion and associated basal shear stress can explain those rapid and short-lived elevation changes. In this paper, I suggest a basic approach to quantify elevation changes resulting from basal shear stress by employing torque-balance calculations. The results confirm the existing flow model solution and offer a more robust formula for estimating the impact of plate motion on changes in Earth's topography. Such functionality may prove invaluable in various applications including interpretation of stratigraphic records.

**Keywords:** Basal shear stress, dynamic topography, Earth's topography, stratigraphy, tectonic plate motion, torque balance.

**Öz:** Kıtaların dinamik olarak yavaşça alçalması ve yükselmesi, Dünya'nın mantosundaki yoğunluk anomalilerinin (alçalan yitmiş levha ya da manto yükselmesi) hareketine dayandırılır. Ancak, birçok sedimanter havzada milyon yıl başına 100 metreyi aşan hızlı ve kısa ömürlü yükseklik değişikliklerinin gözlemleri, sadece bu mekanizmanın dinamik dikey kıta hareketlerini tetiklediği görüşünü sorgulatmıştır. Bodur vd. (2023) tektonik yatay levha hareketinin ve bununla ilintili taban kayma gerilmesinin, gözlemlenen hızlı ve kısa ömürlü kıta yükselme ve alçalmalarını açıklayabileceğini göstermiştir. Bu makalede, taban kayma gerilmesinden kaynaklanan kıtasal yükseklik değişikliklerini nicelendirmek için tork-denge hesaplamalarını kullanarak temel fiziksel bir yaklaşım öneriyorum. Elde ettiğim sonuçlar, mevcut akış modeli çözümünü doğrulamakta ve Dünya'nın topoğrafyasındaki levha hareketinin etkisini tahmin etmek için daha kolay kullanılabilir bir formül sunmaktadır. Bu tür işlevsellik, stratigrafik kayıtların yorumlanması dahil olmak üzere birçok uygulamada faydalı olabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Dünya'nın topoğrafyası, dinamik topoğrafya, kayma gerilimi, stratigrafi, tektonik levha hareketi, tork dengesi.

## INTRODUCTION

Cold and dense slabs sink into the Earth's mantle, pulling down the base of tectonic plates. Simultaneously, the upward movement of the

Earth's hot mantle pushes against the plates, causing them to rise in response. Basins and plateaus can be formed by these processes extending across thousands of kilometres (Morgan, 1965; Pysklywec and Mitrovia, 1997;

Gurnis et al., 1998). The amplitudes of topography predicted by dynamic topography models vary significantly; reaching 2,000 m (e.g., Flament et al., 2013; Steinberger, 2007) or lower than 300 m (Molnar et al., 2015). The viscosity of the mantle limits the rate at which internal mantle flow fields change and nonlinear rheology tends to decrease dynamic topography amplitudes (Bodur and Rey, 2019). Although complex viscosities in the upper mantle can result in higher vertical surface motions, dynamic topography models typically predict vertical motions less than 100 metres per million years (Myr) over a duration of a few tens of Myr (Gurnis et al., 1998; Moucha et al., 2008; Flament et al., 2013). During periods of relative sea-level and tectonic stability, there is direct geological evidence that phases of uplift and subsidence have occurred at rates exceeding  $100 \text{ m Myr}^{-1}$  in less than a few Myr (e.g., Gurnis et al., 2020; Pedoja et al., 2011).

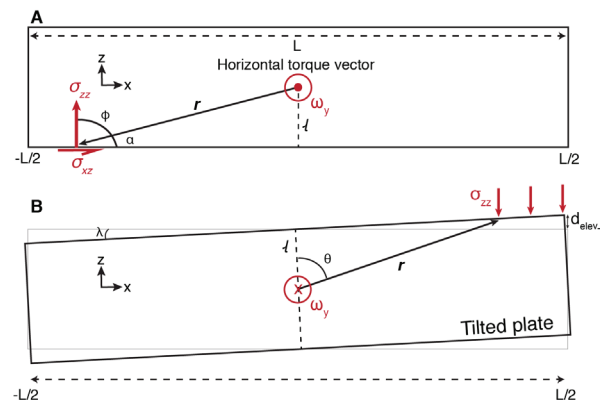
These rates and periods are inconsistent with eustasy (e.g., Miller et al., 2020), and typical estimates of dynamic topography based on mantle convection models (Petersen et al., 2010; Gurnis et al., 2020). That does not rule out the fact that dynamic topography models can predict higher vertical motion rates; however, they have not been shown to explain the brief (lasting for a few Myr) and rapid ( $>100 \text{ m Myr}^{-1}$ ) subsidence of sedimentary basins during tectonic and eustatic stability. Bodur et al. (2023) have shown that variation in basal shear stress of a few MPa due to change in relative horizontal plate motion can induce brief elevation changes equivalent in magnitude to those induced by sea-level changes, and at rates of elevation change comparable to those measured in sedimentary basins. This mechanism can be considered as another type of dynamic topography, although it is driven by shear stress rather than normal stress at the base of tectonic plates.

In this paper, a similar approach is considered but a simpler solution is derived by using torque-

balance calculations for a plate-asthenosphere system to quantify elevation changes driven by basal shear stress. The results confirm the existing flow model solution and offer a simple formula for estimating the impact of plate motions on changes in Earth's topography.

## TILTING of PLATES by BASAL SHEAR STRESS

A plate which is in horizontal motion relative to the underlying asthenosphere will be subject to a basal stress. Figure 1 depicts a rigid lithosphere of length  $L$  experiencing a rotation (i.e., torque) due to applied basal stress from underneath.



**Figure 1.** Free body diagrams for calculating the torque arising from **A)** applied basal shear and normal stress, and **B)** gravitational load of the tilted plate.

**Şekil 1. A)** Levha tabanına etki eden yatay taban kayma gerilimi ve düşey gerilimin meydana getirdiği torkun hesaplanmasında kullanılan serbest cisim diyagramı. **B)** Tork sonucu eğilen levhanın yerçekimsel yükünün oluşturduğu dengeleyici torkun hesaplanmasında kullanılan serbest cisim diyagramı.

The torque  $\omega(\hat{y})$  applied by basal stresses on the lithosphere is calculated by taking the surface integral of the vector product of the distance vector ( $r$ ) and the total stress vector (shear and normal stresses):

$$\omega(\hat{y}) = \int r \times [\tau_{xz}\hat{i} + \sigma_{zz}\hat{z}]da \quad (1)$$

where  $(i)$  and  $(\hat{z})$  are unit normal vectors in x and z directions, respectively. The torque per unit width is:

$$\omega_w(\hat{y}) = \int r \times [\tau_{xz}\hat{i} + \sigma_{zz}\hat{z}]dx = \int r \times (\tau_{xz}\hat{i})dx + \int r \times (\sigma_{zz}\hat{z})dx \quad (2)$$

$$\omega_w = \int r\tau_{xz}\sin(\alpha)dx + \int r\sigma_{zz}\sin(\phi)dx \quad (3)$$

where  $\alpha$  and  $\phi$  are the angles indicated in Figure 1B. The plate extends from  $-L/2$  to  $L/2$ . If I rewrite the harmonic terms, it becomes:

$$\omega_w = \int_{-L/2}^{L/2} \tau_{xz}l dx + \int_{-L/2}^{L/2} \sigma_{zz}x dx \quad (4)$$

where  $l$  is the distance between the base of the plate and its centre of mass. For simplicity, I assume that the lithosphere is homogenous, and the centre of mass lies at the geometrical centre of the plate, therefore  $l$  indicates half of the plate thickness.

I consider a constant basal shear stress, whereas the normal stress varies linearly along the plate, such that  $\sigma_{zz} = \Omega x$  where  $\Omega$  is constant. The horizontal torque per unit width is:

$$\omega_w = l\tau_a L + \Omega \frac{L^3}{12} \quad (5)$$

Once the plate is tilted, there will be counter-balancing torque due to gravitational load of the tilted plate. The amount of tilt will be determined by the arrangement where the net torque will be zero.

I assume the plate is tilted with a slope of  $\lambda$  in radians upward to the right and downward to the left. The increased lithostatic stress applies a torque

in  $-y$  direction (Figure1B). The counter-balancing torque per unit width of the plate becomes:

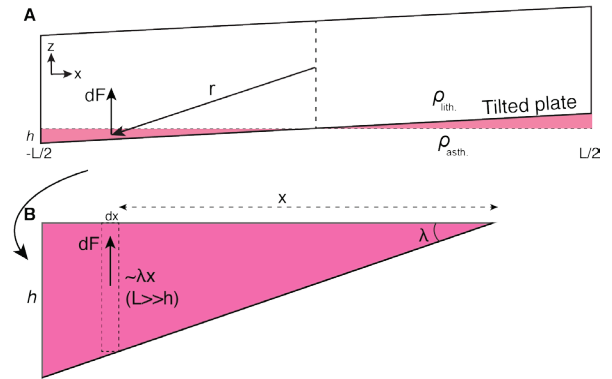
$$\omega_{tilt_w} = -\int r \times (\sigma_{zz}\hat{z})dx \quad (6)$$

$$\omega_{tilt_w} = -\int_{-L/2}^{L/2} rgh(x)\rho_{lith}\sin(\theta)dx \quad (7)$$

where  $h(x)$  is the topography varying with the x coordinate,  $\rho_{lith}$  is the average density of the lithosphere, and  $g$  is the gravitational acceleration. According to Figure1B  $h(x)=\sin(\lambda)\approx\lambda x$  and  $\sin(\theta)=x/r$ .

Therefore:

$$\omega_{tilt_w} = -\lambda\rho_{lith}g \frac{L^3}{12} \quad (8)$$



**Figure 2.** Free body diagrams for calculating the counter-balancing torque applied to a tilted plate due to the buoyancy of the asthenosphere.

**Şekil 2.** Astenosferin kaldırma kuvvetinin eğik bir levha üzerinde oluşturduğu dengeleyici torkun hesaplanmasında kullanılan serbest cisim diyagramı.

According to Archimedes' principle, the tilt of the plate induces a buoyant force applied at the centre of the displaced volume of the asthenosphere, due to the density difference between the average lithospheric density and asthenospheric density (Figure 2). This also contributes to counter-

balancing the torque induced by the basal shear stress. The buoyancy torque per unit width around the centre of mass of the plate can be calculated by the integral below:

$$\omega_{buoy_w} = - \int_{-L/2}^{L/2} -\rho_{asth} g \lambda x^2 dx \quad (9)$$

$$\omega_{buoy_w} = -\rho_{asth} g \lambda \frac{L^3}{12} dx \quad (10)$$

The condition that when the plate reaches equilibrium, the sum of the torques ( $\omega_w + \omega_{tilt_w} + \omega_{buoy_w}$ ) must vanish, giving:

$$-\lambda g \frac{L^3}{12} (\rho_{asth} + \rho_{lith}) + L \tau_a l + \Omega \frac{L^3}{12} = 0 \quad (11)$$

A more accurate calculation can be done by considering all density boundaries within the plate (i.e. crust-air or crust-water, crust-mantle lithosphere and lithosphere-asthenosphere boundaries), but for simplicity, I assume one representative density (i.e.  $\rho_{avg}$ ) for the lithosphere. Equation 5 and 11 indicate that in the absence of normal stress ( $\Omega=0$ ), shear stress ( $\tau_a$ ) on its own can produce topography. If I assume that the average density of the asthenosphere and the lithosphere are equal  $\rho_{avg} = \rho_{asth} = \rho_{lith}$ , I can simplify the contribution of the basal shear stress to the plate's topography ( $h_{basal}$ ) as follows:

$$h_{basal} = \frac{3\tau_a l}{\rho_{avg} g L} \quad (12)$$

where I used the identity ( $\lambda = \frac{2L}{h_{basal}}$ )

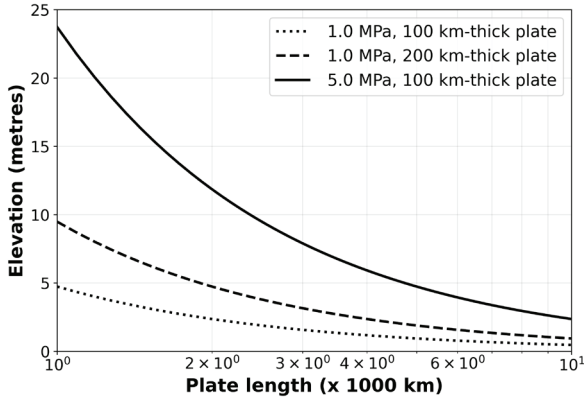
from Figure 1. This shows that the induced plate topography scales linearly with the basal shear stress and the distance between the centre (centre of mass) of the plate and the surface, and it is inversely proportional to the plate length.

## RESULTS

Estimations on basal shear stress vary between  $\sim 0.3$  MPa (van Benthem and Govers, 2010) and  $\sim 30$  MPa (Barba et al., 2008), but this large variation arises from assumptions on the rheology of the plate and asthenosphere (Melosh, 1977). For a conservative shear stress value of 1 MPa acting on the base a 200 km-thick plate, I find that the induced topography is  $\sim \pm 4$  m for a 2,000-km-long plate (dashed line in Figure 3). The induced topography increases to  $\sim \pm 9$  m for a shorter, 1,000-km-long plate with the same amount of shear stress (Figure 3). For the same plate length (i.e., 1,000 km) and same plate thickness (i.e., 100 km-thick plate), an increase in shear stress from 1 MPa (dashed line in Figure 3) to 5 MPa (solid line in Figure 3) increases the amplitude of topography to  $\sim \pm 23$  m. The amplitude of topography predicted by basal shear stress is one to two orders of magnitude smaller than those predicted by dynamic topography models (between 300 m and 2,000 m) and oceanic residual depth anomalies (between 500 m and 1,000 m), (Hoggard et al., 2016), but closer in magnitude (between 20 m and 100 m) to the global sea-level changes (Haq et al., 1987; Haq 2014). These indicate that fluctuations in basal shear stress can trigger elevation changes comparable to changes in sea level over a wide tectonic plate.

Bodur et al. (2023) have shown that the elevation change due to basal shear stress is independent of the lid viscosity for an iso-viscous assumption, although I note that the magnitude of the basal shear stress (and therefore the viscosity) does impact the amplitude of topography. The same study has also shown that the rate of elevation changes can exceed  $100 \text{ m My}^{-1}$ , especially at longer wavelengths ( $>1,000$  km). This rate is strictly determined by the viscosity of the lid, but the viscosity stratification in the lithosphere had a rather small effect ( $\pm 10\%$ ) on the rate of elevation change at long wavelengths. The solution I provided here using the torque-balance

method cannot provide an estimate for the rate of uplift/subsidence due to neglecting the viscosity in the calculations.



**Figure 3.** Elevation change in varying plate lengths for different basal shear stress amplitude and plate thickness.

*Şekil 3. Farklı taban kayma büyüklüğü ve levha kalınlıkları için değişen levha uzunluklarında meydana gelen yükseklik değişimlerinin grafiği.*

## DISCUSSION

The traditional explanation of dynamic subsidence and uplift of tectonic plates through vertical motion of mantle density anomalies has been challenged by observations of rapid and short-lived elevation changes exceeding  $100 \text{ m Myr}^{-1}$ . Bodur et al. (2023) have shown that the relative plate motion and associated basal shear stress can explain rapid vertical motions of plates such as the brief immersion of The Eucla Basin of Australia in the mid-Eocene. In this paper, I derived a simple equation for topography induced by relative horizontal plate motion by employing the torque-balance method. Eqn. 12 and Figure 3 show that small fluctuations in basal shear stress can induce elevation changes that can be significant when considered for various relevant Earth systems.

Brief immersions of plates can trigger hydrothermal activity (Zhu et al., 2011), leading

to the alteration of rocks and the formation of mineral assemblages. The inherited source-to-sink systems can be significantly altered after a rapid regional or plate-scale uplift/subsidence. The Eucla Basin is one of the prime examples of such, and basal shear stress could be responsible for the deposition of 300 m-thick carbonate (Wilson Bluff Limestone) sediments (Li et al. 2003).

The proposed model challenges conventional stratigraphic interpretations by emphasising the role of episodic tectonic events in shaping sedimentary records. While sea-level fluctuations were long considered the primary driver of stratigraphic sequences since the adoption of the Exxon eustatic model (Vail et al., 1977), extensive studies in the Sverdrup Basin in the Canadian Arctic Islands and comparisons with other global regions indicate that tectonic forces play a crucial role in forming sequence boundaries (Embry and Beauchamp, 2019), challenging the dominance of eustatic explanations. Furthermore, numerous studies have suggested that tectonic processes such as plate subduction and the presence of mantle density anomalies could be the primary factor for sedimentation patterns (e.g., Morgan, 1965; Pysklywec and Mitrovica, 1998; Gurnis et al., 1998; Moucha et al., 2008; Molnar et al., 2015), and Bodur et al. (2023) have introduced a novel mechanism for transient topography driven by basal shear stress underneath tectonic plates. Being independent of regional tectonic configuration or its vicinity to a mantle density anomaly, the mechanism I provided here and in Bodur et al. (2023) is based on horizontal tectonic plate motion, which is a common property of all tectonic plates, and therefore could have been driving global episodic tectonics since the inception of plate tectonics. This newly-proposed mechanism may call for a re-evaluation of stratigraphic frameworks and highlights the need for a better understanding of the interplay between tectonics and sedimentation.

## CONCLUSION

Basal shear driven topography challenges the traditional understanding of slow dynamic subsidence and uplift of tectonic plates. Through torque-balance calculations, I have provided a basic yet effective approach to quantify these elevation changes, offering a more robust formula for estimating the impact of horizontal plate motion on Earth's topography. Future research directions could focus on refining and expanding this idea to account for additional factors such as the connectivity of plates and variability of plate-motions on a global scale, and coupling with surface processes. Investigating the implications of rapid elevation changes on the formation of mineral assemblages and interpretation of the stratigraphic record will be critical for advancing our understanding of the Earth's dynamic surface processes.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research presented in this study received funding from the Australian Research Council (grantno. IH130200012) during my doctoral studies at The University of Sydney, but the completion of this article was entirely self-funded. I am indebted to my partner, my parents and my parents-in-law who supported me during the writing phase of this article. I would like to express my gratitude for insightful discussions with my PhD supervisors Patrice F. Rey, Gregory A. Houseman (FRS), and the feedback provided by my PhD thesis reviewers on the early version of the calculations, Robert Moucha and Giampiero Iaffaldano. I am thankful to an anonymous reviewer and Russell Pysklywec for their constructive comments. I am grateful to editors Erdinç Yiğitbaş and Oğuz Göğüş for managing my manuscript and guiding it to publication.

## ORCID

Ömer F. Bodur  <https://orcid.org/0000-0001-6836-0107>

## REFERENCES

- Barba, S., Carafa, M. M. & Boschi, E. (2008). Experimental evidence for mantle drag in the Mediterranean. *Geophysical Research Letters*, 35(6). <https://doi.org/10.1029/2008GL033281>
- Bodur, Ö. F. & Rey, P. F. (2019). The impact of rheological uncertainty on dynamic topography predictions. *Solid Earth*, 10, 2167–2178. <https://doi.org/10.5194/se-10-2167-2019>
- Bodur, Ö. F., Houseman, G. A. & Rey, P. F. (2023). Brief immersion of southern Australia by change in relative plate speed. *Terra Nova*, 35(2), 134–140. <https://doi.org/10.1111/ter.12637>
- Embry, A. & Beauchamp, B. (2019). Sverdrup basin. In *The sedimentary basins of the United States and Canada* (pp. 559-592). Elsevier.
- Flament, N., Gurnis, M. & Müller, R. D. (2013). A review of observations and models of dynamic topography. *Lithosphere*, 5(2), 189-210. <https://doi.org/10.1130/L245.1>
- Gurnis, M., Muller, R. D. & Moresi, L. (1998). Cretaceous vertical motion of Australia and the Australian Antarctic discordance. *Science*, 279(5356), 1499-1504.
- Gurnis, M., Kominz, M. & Gallagher, S. J. (2020). Reversible subsidence on the North West Shelf of Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 534, Article 116070. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116070>
- Haq, B. U., Hardenbol, J. A. N. & Vail, P. R. (1987). Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235(4793), 1156-1167.
- Haq, B. U. (2014). Cretaceous eustasy revisited. *Global and Planetary change*, 113, 44-58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.12.007>
- Hoggard, M. J., White, N. & Al-Attar, D. (2016). Global dynamic topography observations reveal limited influence of large-scale mantle flow. *Nature Geoscience*, 9(6), 456-463.
- Melosh, J. (1977). Shear stress on the base of a lithospheric plate. In C. L. Drake & L. G. Balazs (Eds.), *Stress in the Earth* (pp. 429-439).
- Miller, K. G., Browning, J. V., Schmelz, W. J., Kopp, R. E., Mountain, G. S. & Wright, J. D. (2020). Cenozoic sea-level and cryospheric evolution

- from deep-sea geochemical and continental margin records. *Science Advances*, 6(20), Article eaaz1346. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1346>
- Molnar, P., England, P. C., & Jones, C. H. (2015). Mantle dynamics, isostasy, and the support of high terrain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 1932-1957. <https://doi.org/10.1002/2014JB011724>
- Morgan, W. J. (1965). Gravity anomalies and convection currents: 1. A sphere and cylinder sinking beneath the surface of a viscous fluid. *Journal of Geophysical Research*, 70(24), 6175-6187.
- Moucha, R., Forte, A. M., Mitrovica, J. X., Rowley, D. B., Quéré, S., Simmons, N. A., & Grand, S. P. (2008). Dynamic topography and long-term sea-level variations: There is no such thing as a stable continental platform. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4), 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.056>
- Pedoja, K., Husson, L., Regard, V., Cobbold, P. R., Ostanciaux, E., Johnson, M. E., ... & Delcaillau, B. (2011). Relative sea-level fall since the last interglacial stage: Are coasts uplifting worldwide?. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.05.002>
- Petersen, K. D., Nielsen, S. B., Clausen, O. R., Stephenson, R. & Gerya, T. (2010). Small-scale mantle convection produces stratigraphic sequences in sedimentary basins. *Science*, 329(5993), 827-830. <https://doi.org/10.1126/science.1190115>
- Pysklywec, R. N. & Mitrovica, J. X. (1998). Mantle flow mechanisms for the large-scale subsidence of continental interiors. *Geology*, 26(8), 687-690.
- Pysklywec, R. N., & Mitrovica, J. X. (1997). Mantle avalanches and the dynamic topography of continents. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(3-4), 447-455.
- Steinberger, B. (2007). Effects of latent heat release at phase boundaries on flow in the Earth's mantle, phase boundary topography and dynamic topography at the Earth's surface. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 164(1-2), 2-20.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., Todd, R. G., Widmier, J. M., Thompson, S., Sangree, J. B., ... & Hatlelid, W. G. (1977). Seismic stratigraphy and global changes in sea level. In C. E. Payton (Ed.), *Seismic stratigraphy: Applications to hydrocarbon exploration* (pp. 49-212). AAPG Memoir 26.
- Van Benthem, S. & Govers, R. (2010). The Caribbean plate: Pulled, pushed, or dragged?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B10). <https://doi.org/10.1029/2009JB006674>
- Zhu, Y., An, F. & Tan, J. (2011). Geochemistry of hydrothermal gold deposits: A review. *Geoscience Frontiers*, 2(3), 367-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.006>





## TÜRKİYE JEOLOJİ BÜLTENİ

### AMAÇ ve KAPSAM

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

### YAZILARIN HAZIRLANMASI

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

### MAKALE SUNUM SÜRECİ ve ETİK BİLDİRİMİ

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

## YAZIM KURALLARI

### Yazılar aşağıda verilen düzen çerçevesinde hazırlanmalıdır:

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

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

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

**ÖZ**

**ABSTRACT**

**GİRİŞ**

**ANA BAŞLIK**

**Birinci Derece Alt Başlık**

**İkinci derece alt başlık**

**Üçüncü derece alt başlık**

**SONUÇLAR VE TARTIŞMA**

**EXTENDED SUMMARY**

**KATKI BELİRTME**

**ORCID**

**KAYNAKLAR / REFERENCES**

### **Kapak Sayfası**

Yazıdan ayrı olarak sunulacak kapak sayfasında aşağıdaki bilgiler yer almalıdır:

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

## **Başlık ve Yazarlar**

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

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

Ahmet Ahmetoğlu

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

A. Hüsnü Hüsnüoğlu

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

## **ÖZ**

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

## **Anahtar Kelimeler**

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

## **EXTENDED SUMMARY/GENİŞLETİLMİŞ ÖZET**

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

## **KATKI BELİRTME**

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

## **DEĞİNİLECEK BELGELER**

### **Metin İçinde Atıfların Yazılması**

#### **A. Yayında tek yazar varsa**

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

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

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

Yazar1 (Tarih) **Ör:** Sönmez (1996)

**B. Yayımda 2 yazar varsa**

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

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

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

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

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

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

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

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

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

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

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa:

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

Metin içinde yazılması gerekiyorsa:

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

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

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

Kaynakçada:

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

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

Metin içindeki atıflarda:

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

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

**Kaynaklar Bölümü**

**Aşağıdaki örnekler ile kesinlikle uyumlu olmalıdır**

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

**A. Sürelî yayınlar:**

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

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

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

## A.2. Özel durumlar:

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

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

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

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

## **B. Bildiriler:**

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

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

## **C. Kitaplar:**

### C.1. Kitapların gösterilmesi:

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

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

### C.2. Çeviri Kitapların Gösterilmesi:

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

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

## **D. Kitapta Bölüm ise:**

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

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

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

### E.1. Raporlar:

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

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

### E.2. Tezler:

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

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

#### **F. Kişisel Görüşme:**

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

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

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

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

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

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

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

#### **Eşitlikler ve Formüller**

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

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

#### **Çizelgeler**

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

#### **Şekiller**

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

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

### **MAKALELERİN EDITÖRLÜĞE GÖNDERİLMESİ**

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

### **TÜRKİYE JEOLJİ BÜLTENİ EDITÖRÜ**

Prof. Dr. Erdiñ YİĞİTBAŞ

Tel: 286 2180018-20088

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

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

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

### **PROVA BASKILAR**

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

### **TELİF HAKLARI**

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

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

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

## **Dergi Politikası:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

### **Değerlendirme İşlemi:**

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

**Hakem Değerlendirme Süreci:** Makalelerin tüm bölüm içerikleri incelenip hakem değerlendirmesi için uygun bulunduğu makaleler hakem değerlendirmesine alınır. Ancak, herhangi bir nedenle hakem değerlendirmesine uygun bulunmayan makaleler, editörün değerlendirme raporuyla birlikte reddedilir. Yazara en geç 15 gün içerisinde bilgi verilir. Hakem değerlendirmesinde makaleler, editör tarafından içerik ve uzmanlık alanlarına göre dergi hakem havuzundan ve/veya havuz dışından olmak üzere, en az üç hakeme gönderilir. Makale hakemlerinin belirlenmesinde yukarıda açıklanan çıkar çatışması/çakışması hususlarına özen gösterilir. Hakemler değerlendirme süreciyle ilgili hiçbir kimseyle bilgi ve belge paylaşmayacaklarını garanti etmek zorundadır. Hakem değerlendirme süreci için hakemlere verilen süre 30 gündür. Hakemler veya editörden gelen düzeltme önerilerinin yazarlar tarafından 30 gün içerisinde tamamlanması zorunludur. Hakemler makale için düzeltmelerini inceleyerek uygunluğuna karar verebilir veya 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](mailto:tjbdergi@gmail.com) üzerinden yayın kuruluna iletirler. Yayın Kurulu, geri çekme dilekçesini inceleyerek en geç 15 gün içerisinde cevap verir. Yayın Kurulu tarafından dilekçesi onaylanmayan bir makalenin yazar(lar)ı, makalelerini başka bir dergiye gönderemezler. Yazar(lar)ın yayınlanmış, erken görünüm veya değerlendirme aşamasındaki çalışmasıyla ilgili bir yanlış ya da hatayı fark etmesi durumunda, dergi editörüyle işbirliği yapma yükümlülüğü bulunmaktadır. Yazar(lar), bizzat kendilerine ait olmayan verileri kullanma hakkına sahip olduklarını, araştırma/analiz ile ilgili gerekli olabilecek izinleri gösteren belgelere sahip olmalıdır.

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

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

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



## **GEOLOGICAL BULLETIN OF TURKEY**

### **AIM and SCOPE**

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

### **PREPARATION OF MANUSCRIPTS**

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

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

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

## INSTRUCTIONS FOR CONTRIBUTORS

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

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

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

### Examples for headings:

**ABSTRACT**

**INTRODUCTION**

**PRIMARY HEADING**

**Primary Sub-Heading**

**Secondary sub-heading**

*Tertiary sub-heading*

**CONCLUSIONS**

**GENİŞLETİLMİŞ ÖZET / EXTENDED SUMMARY**

**ANCKNOWLEDGEMENTS**

**ORCID**

**REFERENCES**

### **Cover Page**

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

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

### **Title and Authors**

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

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

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

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

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

**ABSTRACT**

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

**Keywords**

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

**GENİŞLETİLMİŞ ÖZET / EXTENDED SUMMARY**

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

**ACKNOWLEDGEMENTS**

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

**CITATIONS and REFERENCES**

**Citation in the text**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Citations in the text:

Paranthetical citations: (Ahmetoğlu & Hüsünüoğlu, 2022a)

Narrative citations: Ahmetoğlu & Hüsünüoğlu (2022a)

### **References**

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

#### **A. Journals**

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

#### **A.**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **C. Books:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### E.1. Reports:

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

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

#### E.2. Thesis:

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Mathematical Expressions**

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

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

### **Tables**

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

### **Illustrations**

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

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

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

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

### **SUBMISSION OF MANUSCRIPTS**

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

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

*Prof. Dr. Erdinç YİĞİTBAŞ*

*Tel: 286 2180018-20088*

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

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

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

### **PROOFING**

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

### **COPYRIGHT**

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

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

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

#### **Journal Policy:**

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



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

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

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

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

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

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

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

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

### **Evaluation Process:**

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

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

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

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

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

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

# TÜRKİYE JEOLojİ BÜLTENİ

*Geological Bulletin of Turkey*

Temmuz 2024 Cilt 67 Özel Sayı  
July 2024 Volume 67 Special Issue

**Ebru Şengül Uluocak**

**A Discussion on Geodynamic Modeling Methodology:  
Inferences from Numerical Models in the Anatolian Plate**

*Jeodinamik Modelleme Metodolojisi Üzerine Bir Tartışma:*

*Anadolu Levhasındaki Sayısal Modellerden Çıkarımlar ..... 1*

**Ebru Şengül Uluocak, Emin Uğur Uluggerli**

**Yer Bilimlerinde Modellemeye Genel Bir Bakış; Çevre Jeofiziği Uygulamalarından Çıkarımlar**

*An Overview of Modeling in Earth Sciences; Inferences from Environmental Geophysics Applications .... 13*

**Semih Eski, Hasan Sözbilir**

**Gediz (Alaşehir) Grabeni'nde Gelişen A-Sismik Yüzey Deformasyonların Kökeni**

*Origin of a-Seismic Surface Deformations in the Gediz (Alaşehir) Graben ..... 31*

**Özgür Karaoğlu**

**Hasan Dağı Volkanı ve Çiftlik-Bozköy (Orta Anadolu) Gömülü Kalderasını Besleyen Aktif Magma Odalarına İlişkin Isı Transferi Analizleri**

*Heat Transfer Analysis of Active Magma Chambers Feeding Hasan Dağı Volcano and Çiftlik-Bozköy*

*(Central Anatolia) Hidden Caldera ..... 63*

**Ömer F. Bodur**

**A Simple Model for Plate Motion and Topography**

*Tektonik Levha Hareketiyle Oluşan Topoğrafyanın Fiziksel Modeli ..... 85*

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

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

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

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

### **Yazışma Adresi**

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

PK. 464 Yenışehir, 06410 Ankara

Tel: (0312) 434 36 01

Faks: (0312) 434 23 88

E-Posta: tjb@jmo.org.tr

URL: <https://dergipark.org.tr/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>