

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleriyle tetiklenen yüzey deformasyonlarının haritalanması ve analizi

Mapping and analysis of surface deformations triggered by the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes

Serdar Yeşilyurt^{a*} 

^aAnkara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Ankara, Türkiye.

ORCID: S.Y. 0000-0002-2896-9644

BİLGİ/INFO

Geliş/Received: 18.03.2025
Kabul/Accepted: 19.04.2025

Anahtar Kelimeler:

Fotogrametri
Heyelan
Sıvılaşma
Yanal yayılma
Yüzey kırığı

Keywords:

Landslide
Lateral spreading
Liquefaction
Photogrammetry
Surface rupture

*Sorumlu yazar/Corresponding author:
(S. Yeşilyurt) yesilyurt@ankara.edu.tr

DOI: 10.17211/tcd.1660081



Atıf/Citation:

Yeşilyurt, S. (2025). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleriyle tetiklenen yüzey deformasyonlarının haritalanması ve analizi. *Türk Coğrafya Dergisi* (87), 99-114.
<https://doi.org/10.17211/tcd.1660081>

ÖZ/ABSTRACT

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin neden olduğu yüzey deformasyonlarının kış koşulları nedeniyle hızla kaybolmadan önce haritalanması ve analiz edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. 7.7 (Mw) ve 7.6 (Mw) büyüklüğündeki bu depremler, Doğu Anadolu Fay Zonu'nda (DAFZ) geniş yüzey kırıkları, kütle hareketleri ve sıvılaşmalar oluşturmuştur. 16-20 Şubat 2023 tarihleri arasında Kahramanmaraş, Gaziantep, Malatya, Adıyaman ve Hatay illerini kapsayan arazi çalışmaları kapsamında insansız hava aracı (İHA) tabanlı fotogrametri uygulanmış, ayrıca ortofoto ve uydu görüntüleri gibi uzaktan algılama verileri analiz edilerek yüzey deformasyonları haritalanmıştır. Bulgular, toplamda 340 km'yi aşan yüzey kırıkları geliştiğini göstermektedir. En büyük sol yanal ötelenme Pazarcık segmentinde 7.1 metre, Çardak Fayı'nda ise 8 metre olarak ölçülmüştür. Depremler sonucunda 4139 kütle hareketi tespit edilmiş olup, bunların büyük kısmını kaya düşmeleri oluşturmaktadır. Özellikle fay hatlarına yakın engebeli bölgelerde yoğunlaşan bu oluşumlar, ulaşım ve altyapıya ciddi zarar vermiştir. Ayrıca, Asi Nehri taşkın ovası ve Gölbaşı Gölü kıyılarında meydana gelen sıvılaşmaya bağlı yanal yayılmalar nedeniyle akarsu ve göl kıyı çizgisi önemli oranda tahrip olmuştur. Bu çalışma, DAFZ'deki sismotektonik süreçlerin anlaşılmasına katkı sağlayarak yüzey deformasyonlarının mekânsal dağılımını ve etkilerini detaylı şekilde incelemektedir. Bulgular, gelecekteki deprem risk analizleri ve afet yönetim stratejilerine katkı sağlayacaktır.

This study aims to map and analyze the surface deformations caused by the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquakes before they were rapidly diminished due to winter conditions. The Mw 7.7 and Mw 7.6 earthquakes triggered extensive surface ruptures, mass movements, and liquefaction along the East Anatolian Fault Zone (EAFZ). Field investigations were carried out between February 16-20, 2023, covering the provinces of Kahramanmaraş, Gaziantep, Malatya, Adıyaman, and Hatay. During this period, unmanned aerial vehicle (UAV)-based photogrammetry was performed, and surface deformations were mapped using remote sensing data, including orthophotos and satellite imagery. The results indicate that surface ruptures extended over 340 km. The maximum left-lateral displacement was measured as 7.1 meters on the Pazarcık segment and 8 meters on the Çardak Fault. A total of 4139 mass movements were identified, with rockfalls being the most common. These movements were concentrated in steep terrains near faults, causing significant damage to infrastructure and transportation networks. Additionally, due to liquefaction-induced lateral spreading in the Asi River floodplain and along the shores of Lake Gölbaşı, the river and lake shorelines have been significantly damaged. This study enhances understanding the seismotectonic processes of the EAFZ by mapping the spatial distribution and effects of surface deformations. The findings provide critical insights for future earthquake risk assessments and disaster management strategies.

Extended Abstract

Introduction

The East Anatolian region of southeastern Türkiye is profoundly influenced by the northward push of the Arabian Plate, creating intense compressional and strike-slip tectonic regimes (Arpat & Şaroğlu, 1972; McKenzie, 1976; Dewey et al., 1986; Duman & Emre, 2013). Central to this activity is the East Anatolian Fault Zone (EAFZ), a major intracontinental transform fault system. It extends roughly 580 km from Karlıova to the Eastern Mediterranean, characterized by left-lateral slip rates of about 10 mm/year in the north and 4.5 mm/year in the south (Şaroğlu et al., 1992; Westaway, 1996; McClusky et al., 2000; Reilinger et al., 2006; Aktuğ et al., 2016). Historically, large earthquakes have occurred along the EAFZ, including events in 1513 (Ceyhan-Malatya) and 1544 (Göksun-Malatya), indicating its potential for significant seismic activity (Ambroseys, 1989; Taymaz et al., 2021).

On February 6, 2023, two major earthquakes of Mw 7.7 (Pazarcık) and Mw 7.6 (Ekinözü) struck the Kahramanmaraş region, rupturing multiple fault segments and triggering extensive surface deformations. These quakes caused widespread damage across Kahramanmaraş, Gaziantep, Malatya, Adıyaman, and Hatay. Given that the earthquakes occurred in winter, documenting the surface ruptures, mass movements, and liquefaction features before seasonal processes obscured them was a priority. This study aims to (1) map the spatial distribution of primary surface ruptures, (2) identify and characterize mass movements, and (3) evaluate liquefaction-related deformations. By rapidly collecting and analyzing field and remote sensing data, this work provides valuable insights into rupture dynamics and their geomorphological impacts in southeastern Türkiye.

Data and Method

Following the February 6, 2023, earthquakes, high-resolution satellite images, orthophotos, and preliminary Unmanned Aerial Vehicle (UAV) (Mancini et al., 2013; Kasprzak et al., 2018; Jouvett et al., 2019; Groos et al., 2019) surveys were acquired to detect surface ruptures, landslides, and liquefaction. From February 16 to 20, field investigations took place in Kahramanmaraş, Gaziantep, Malatya, Adıyaman, and Hatay. Stereo images from UAVs were processed using Agisoft Metashape to produce orthophotos and Digital Elevation Models (Westoby et al., 2012; Kaufmann et al., 2021). Comparisons with ground measurements indicated a $\pm 5\%$ error margin. In some areas, snow cover hindered the recognition of rupture traces and slide scars. Fault segment lengths were calculated by measuring the distance between the first and last observed breaks. Where feasible, fault displacements were confirmed with compass and inclinometer readings. Landslides and other mass movements were mapped through slope, lithology, and proximity-to-fault analyses (Burbank & Anderson, 2011; Ren et al., 2014). Liquefaction features, particularly lateral spreading and sand boils, were identified in water-saturated alluvial environments such as Lake Gölbaşı shores and the Asi River floodplain.

Results and Discussion

Analysis of the data shows that the Mw 7.7 Pazarcık and Mw 7.6 Ekinözü earthquakes generated more than 340 km of surface ruptures along the EAFZ (Şekil 1, Şekil 2). The Pazarcık event produced roughly 217 km of rupture along the Erkenek, Pazarcık, and Amanos segments, while the Ekinözü earthquake accounted for approximately 125 km of rupturing across the Çardak, Doğanşehir, and Sürgü faults. Peak left-lateral offsets reached 7.1 m on the Pazarcık segment and 8 m on the Çardak Fault. While the Pazarcık segment exhibited a relatively continuous rupture, the Çardak Fault showed more complex faulting patterns, including stepovers and secondary faulting. Elevated aftershock activity near fault terminations, such as around Göksun, suggests that geological barriers influence rupture arrest (Toker et al., 2023). Recent external seismological analyses propose that the fault ruptures may have involved sub-Rayleigh to supershear speeds (Lee et al., 2024; Ding et al., 2023; Zhou et al., 2025). In the Pazarcık earthquake, segment boundaries could have prolonged high-frequency shaking, whereas the Ekinözü event reportedly showed a more uniform, faster rupture process akin to supershear (Ding et al., 2023; Abdelmeguid et al., 2023). These dynamic rupture characteristics may explain local variations in ground shaking and potential clustering of liquefaction or slope failures.

A total of 4139 mass movements were identified, predominantly rockfalls on steep carbonate slopes. Larger landslides included a major slope failure in Değirmencik Valley, which blocked a stream and created a temporary lake. Landslides near Göksun Valley, as well as along the Çardak and Sürgü faults, damaged infrastructure and agricultural lands. Such failures illustrate how ground shaking, geology, and relief interact to shape slope processes (Görüm et al., 2023).

Liquefaction was widespread in low-gradient, water-saturated settings, particularly around Gölbaşı, Türkoğlu, and the Asi River floodplain (Taftsoglou et al., 2023). Lateral spreading along Lake Gölbaşı displaced buildings and railway tracks. The Asi River floodplain experienced extensive bank failures, destroying point bars and natural levees across a 50 km stretch. These modifications altered the river's channel, enhancing future flood risk. According to Taftsoglou et al. (2023), liquefaction-induced ground failures in the Asi River valley comprised nearly 30% of all documented liquefaction features from these earthquakes.

In conclusion, the February 6, 2023 earthquakes had a significant impact on the region's geodynamic processes along the EAFZ by generating large-scale surface deformations and mass movements. The varied rupture speeds, surface faulting, and liquefaction observed during the earthquakes underscore the complexity of local seismotectonic processes. Future research should focus on detailed geodetic and seismological analyses of fault mechanisms to better understand the long-term effects of these large-scale deformations. In particular, examining how lateral spreading, liquefaction, and landslides will shape the region's geomorphology is critical for disaster management and risk-reduction strategies. By systematically documenting these features, this study provides essential data for improving seismotectonic models and enhancing future hazard mitigation efforts in southeastern Türkiye.

1. Giriş

Doğu Anadolu, Afrika ve Arabistan levhalarının sıkıştırma rejimi altında şekillenen, yüksek tektonik aktiviteye sahip bir bölgedir. Arabistan levhasının kuzeye doğru hareketi, Doğu Anadolu'da yoğun deformasyon süreçlerini tetiklemiş ve bölgeyi bindirme ve doğrultu atımlı faylanmaların egemen olduğu bir tektonik rejime dönüştürmüştür. Bu rejim altında şekillenen Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), Doğu Akdeniz'deki en büyük aktif tektonik yapılardan birisidir. Arap ve Anadolu levhaları arasındaki aktif sınırı oluşturan kıta içi bir transform fay niteliğinde ve sol yanal atımlı olan DAFZ, batıya doğru hareket eden Anadolu bloğunu güneyden sınırlandırmaktadır (Arpat & Şaroğlu, 1972; McKenzie, 1976; Dewey vd., 1986; Nalbant vd., 2002; Duman & Emre, 2013; Yönlü vd., 2017 ve içerdiği atflar). DAFZ, Karlıova'dan Akdeniz'e kadar kuzeydoğu-güneybatı (KD-GB) doğrultusunda yaklaşık 580 km boyunca uzanır ve kuzeyden güneye doğru yıllık ortalama 10 mm ile 4.5 mm bir sol yanal kayma hızına sahiptir (Şaroğlu vd., 1992; Westaway, 1996; McClusky vd., 2000; Reilinger vd., 2006; Aksoy vd., 2007; Herece, 2008; Duman & Emre, 2013; Aktuğ vd., 2016). Bu kayma hızının, fayın oluşumundan itibaren 25 km'yi aşan bir yanal yer değiştirmeye sebep olduğu ve Kuvaterner ortalarından günümüze kadar Fırat Vadisi'ni yaklaşık 12 km ötelediği bilinmektedir (Arpat & Şaroğlu, 1972; Seymen & Aydın, 1972; Hempton, 1985; Nalbant vd., 2002; Duman & Emre, 2013; Trifonov vd., 2018).

Tarihsel süreçte, DAFZ büyük depremler üreterek bölgedeki tektonik hareketliliği belirlemiştir. Erkenek, Pazarcık ve Amanos segmentleri, geçmişte önemli sismik aktivitelere sahne olmuş ve tarihsel kayıtlar bu segmentlerin büyük depremler üretebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Arpat & Şaroğlu, 1972; Barka & Kadinsky-Cade, 1988; Taymaz vd., 1991; Guidoboni vd., 1994; Nalbant vd., 2022; Ambraseys, 2009; Duman & Emre, 2013). DAFZ üzerindeki bilinen tarihteki en büyük depremlerden biri, 6 Şubat 2023'te meydana gelmiştir. Saat 04:17 (UTC+3)'te Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde meydana gelen Mw 7.7 büyüklüğündeki ilk depremin odak derinliği Kandilli Rasathanesi'ne göre 5.5 km, AFAD'a göre ise 8.6 km olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık dokuz saat sonra, saat 13:24'te, Ekinözü merkezli ikinci büyük deprem (Mw 7.6) gerçekleşmiştir. Bu ikinci depremin odak derinliği AFAD'a göre 7 km, Kandilli Rasathanesi'ne göre ise 5 km olarak belirlenmiştir. İki büyük deprem, geniş bir bölgede yıkıcı etkilere yol açmış ve on ili doğrudan etkileyerek büyük can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Bu sismik aktivite, Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca enerji birikiminin ve fay mekanizmalarının dinamik karakterini ortaya koymaktadır.

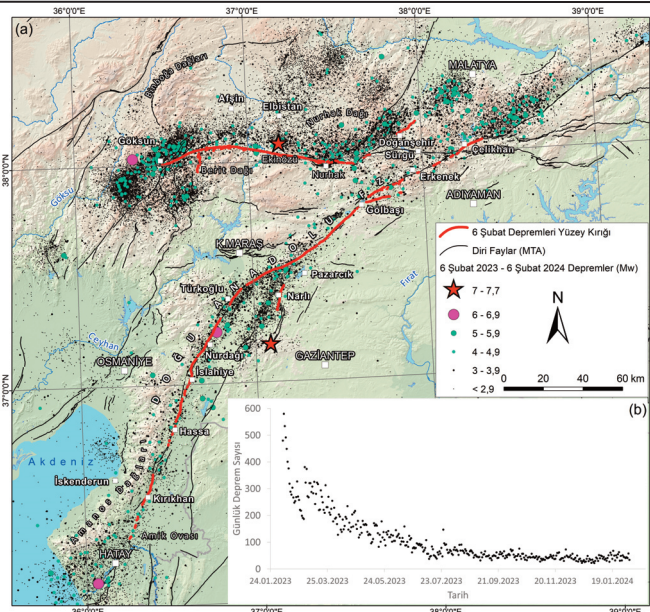
Tektonik olarak aktif bölgelerde topoğrafya, kabuksal hareketler, erozyon ve depolanma süreçlerinin birleşik etkisiyle sürekli değişime uğramaktadır (Burbank & Anderson, 2011; Ren vd., 2014). Büyük depremler, kısa vadede kabuksal deformasyonlar, heyelanlar ve sıvılaşmalar gibi ani değişimlere neden olurken, uzun vadede izostatik geri tepme süreçleriyle topoğrafyanın şekillenmesine katkı sağlar (Lei vd., 2021). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri farklı segmentlerde yüzey kırıkları, yer değiştirmeler, eğimli arazilerde heyelanlar, taş düşmeleri, moloz akıntıları ve alüvyal zeminlerde sıvılaşmaya bağlı oturma ile yanal yayılmalar gibi çeşitli yüzey deformasyonlarını tetiklemiştir. Depremler tarafından tetiklenen deformasyonların kayıt

altına alınması, haritalanması ve analiz edilmesi, hem fay mekanizmasının anlaşılması hem de yüzey kırıklarının dağılımının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, depremlerin meydana geldiği kış ayları nedeniyle yüzey deformasyonlarının hızla silinmeden önce belgelenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, 6 Şubat depremleri tarafından tetiklenen yüzey deformasyonlarını belirlemek, haritalamak ve analiz etmektir. Deprem sonrası topoğrafik değişikliklerin mekânsal dağılımını ve faylarla ilişkisini anlamak için 16-20 Şubat 2023 tarihleri arasında Göksun, Afşin, Elbistan, Ekinözü, Nurhak, Doğanşehir, Çelikhan, Erkenek, Gölbaşı, Çağlayancerit, Pazarcık, Narlı, Kahramanmaraş, Türkoğlu, Nurdağı, İslahiye, Hassa, Kırıkhan ve İskenderun bölgelerini kapsayan bir arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. İnsansız hava aracı (İHA) fotogrametrisi ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak veriler toplanmış, yüzey kırıkları, kütle hareketleri ve sıvılaşmalar haritalanmıştır. Elde edilen bulgular, yüzey deformasyonlarının dağılışı ve dinamik süreçleri üzerine kapsamlı bir veri seti oluşturarak Doğu Anadolu Fay Zonu'ndaki tektonik süreçlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1. Çalışma Alanı

İlk defa Allen (1969) tarafından tanımlanan DAFZ, sürekli bir fay düzlemi yerine, dağlık arazide karmaşık fay segmentleri, yerel çek-ayır havzaları (pull-apart basins) ve yükselim zonları içeren farklı segmentlerden oluşmaktadır (Arpat & Şaroğlu 1972; Şengör vd., 1985; Perinçek & Çemen, 1990; Şaroğlu vd., 1992; Westaway, 1994). DAFZ, kuzeyde Karlıova'dan başlayarak Antakya'ya kadar uzanan sol yanal doğrultu atımlı bir fay sistemidir. Fay, Karlıova'dan Çelikhan'a kadar tek bir ana hat olarak devam ederken, Çelikhan'dan sonra iki kola ayrılmaktadır (Duman & Emre, 2013). Ana kol Karlıova-Antakya arasında 580 km uzanmakta, kuzey kol ise Çelikhan-İskenderun Körfezi arasında 350 km uzanan Sürgü-Misis Fay Sistemi'dir (Duman & Emre, 2013; Taymaz vd., 2021). Ana (güney) kolda 6 şubat depremlerinden etkilenen segmentler kuzeyden güneye doğru, Çelikhan-Gölbaşı arasında Erkenek Segmenti, Gölbaşı-Türkoğlu arasında Pazarcık Segmenti ve Türkoğlu-Antakya arasında Amanos Segmenti'dir. Kuzey kolda ise Çelikhan-Nurhak arasında Sürgü Segmenti, Nurhak-Göksun arasında Çardak Segmenti ve Doğanşehir-Malatya arasında Doğanşehir Fay Zonu bulunmaktadır (Şekil 1).

İlk depremde DAFZ'ın Erkenek, Pazarcık ve Amanos segmentlerine ek olarak çok iyi bilinmeyen Gölbaşı-Tut arasındaki Tut Fayı ile ÖDFZ'deki Narlı'dan güneye doğru uzanan Narlı Segmenti'nin kuzey bölümü kırılmıştır. İkinci depremde ise DAFZ'ın kuzey kolundaki Çardak Fayı'nın tamamı, Sürgü Fayı'nın batı bölümü, Doğanşehir Fay'ı ile Berit Dağı'nın batısında kuzey güney doğrultuda bir fay kırılmıştır. İlk depremde yaklaşık 330 km, ikinci depremde 140 km boyunca yüzey kırığı oluşmuştur (Şekil 1). İki büyük depremin ardından, bir yıl içinde Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca 39.000'den fazla artçı deprem meydana gelmiştir. Bunların 35.895'i Mw ≤ 2.9 (% 92'si), 2.981'i Mw 3-4 arası, 545'i Mw 4-5 arası ve 49'u Mw 5-6 arası büyüklükte kaydedilmiştir (Şekil 1)



Şekil 1. (a) 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri ana şok merkez üssleri ve 1 yıl boyunca takip eden depremlerin dağılışı haritası (Kandilli Rasathanesi, <http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqmap/hgmmap.asp>). Kırmızı çizgiler bu çalışma kapsamında saptanan yüzey kırıklarını göstermektedir. (b) 6 Şubat 2023 – 6 Şubat 2024 tarihleri arasında 1 yıl boyunca günlük deprem sayısındaki değişim grafiği. 6 ay boyunca düzenli olarak azalan artışlar, daha sonra yatay bir seyir izlemektedir.

Figure 1. (a) Epicenters of the main shocks of the February 6 Kahramanmaraş Earthquakes and the distribution of aftershocks recorded over a one-year period (Kandilli Observatory, <http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqmap/hgmmap.asp>). The red lines indicate surface ruptures identified in this study. (b) Graph showing the daily variation in the number of earthquakes recorded between February 6, 2023 – February 6, 2024. The number of aftershocks decreased steadily over six months, followed by a relatively stable trend.

2. Yöntem

6 Şubat depremlerinin ardından, ilk uydu görüntüleri ve ortofotoların yayınlanmasıyla yüzey kırıkları, kütle hareketleri ve sıvılaşma yapıları CBS tabanlı analizlerle hızla haritalanmıştır. Bu süreçte yüzey kırıklarının doğrultu-atım miktarları belirlenmiş, kütle hareketleri ve sıvılaşmalar işaretlenerek incelenmesi planlanan 40 noktalık bir arazi çalışması rotası oluşturulmuştur. Depremden yaklaşık bir hafta sonra belirlenen rota takip edilerek beş günlük arazi çalışması gerçekleştirilmiş ve tüm hedef noktalara ulaşılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında İHA kullanılarak fotoğraf ve video çekimleri yapılmış, sayısal fotogrametri için stereoskopik hava fotoğrafları alınmıştır.

İHA tabanlı fotogrametri, yüksek mekânsal çözünürlükte veri üretme kapasitesi ve düşük operasyonel maliyeti sayesinde, yüzey deformasyonlarının haritalanmasında etkili bir araçtır (Mancini vd., 2013; Kasprzak vd., 2018; Jouvét vd., 2019; Groos vd., 2019). Arazi çalışmalarında elde edilen stereoskopik İHA hava fotoğrafları, fotogrametrik analiz teknikleriyle işlenmiştir. Bu süreçte, her bir görüntünün çekildiği anda kaydedilen konum bilgileri ile birlikte, İHA'nın yatay ve düşey eksenlerdeki yalpalama hareketlerine ilişkin yaw, pitch ve roll açıları; ayrıca kamera sistemine ait odak uzaklığı ve sensör boyutu gibi dış yönelme parametreleri analizde dikkate alınmıştır (Uysal vd., 2015; Hendrickx vd., 2019). İlk aşamada blok dengeleme işlemi gerçekleştirilmiş, ardından yoğun nokta bulutu üretimiyle birlikte 10 cm'den daha yüksek çözünürlüğe sahip sayısal yüzey modelleri (SYM) ve ortofoto görüntüler oluşturulmuştur (Wes-

toby vd., 2012; Kaufmann vd., 2021). Fay yüzey kırıklarındaki atımlar, hem İHA ortofotoları hem de Harita Genel Müdürlüğü'ne (HGM) ait yüksek çözünürlüklü ortofotolar üzerinden dijital olarak ölçülmüştür. Segment uzunlukları ise kırığın başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki mesafe esas alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, arazide mira ve şerit metre kullanılarak yapılan ölçümlerle karşılaştırılmış; bu karşılaştırmalar sonucunda fotogrametrik ölçümlerin $\pm 5'$ 'lik bir hata payına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu hata oranı, başlıca üç faktörden kaynaklanmaktadır: (i) kar örtüsü nedeniyle deformasyon izlerinin bazı bölgelerde net şekilde seçilememesi, (ii) yüzey morfolojisinin heterojenliği ve (iii) fotogrametrik çözünürlüğün sınırlamaları. Özellikle yüksek rakımlı alanlarda kar örtüsünün varlığı, hem yüzey kırığı çizgisinin takibini hem de detaylı morfometrik ölçümleri zorlaştırmıştır (Şekil 2).

Kütle hareketleri ve sıvılaşma yapıları, HGM ortofotoları kullanılarak haritalanmıştır. Büyük ölçekli heyelanlar, taş düşmeleri, moloz akıntıları ve alüvyal zeminlerdeki yanal yayılma alanları belirlenmiştir. Kar örtüsü bazı alanlarda gözlem zorlukları yaratmış olsa da, genel deformasyon dağılımı güvenilir şekilde haritalanmıştır.

3. Bulgular

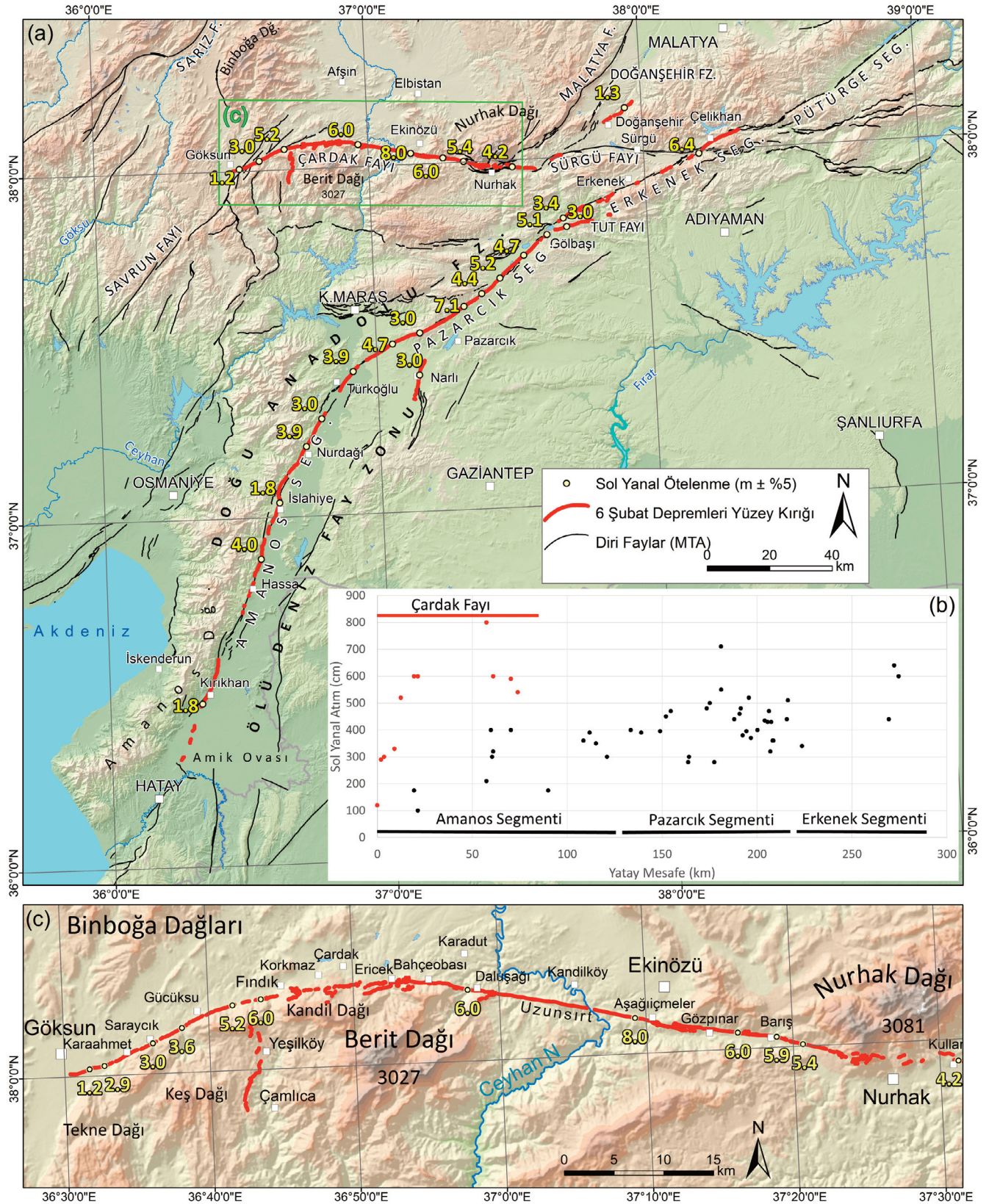
3.1. Deprem Yüzey Kırığı

3.1.1. Ekinözü Depremi Yüzey Kırığı (6 Şubat 2023 13:24 7.6 Mw)

6 Şubat tarihli Ekinözü Depremi'nde Göksun ile Doğanşehir arasında 4 farklı fay hattı boyunca (160 km) 125 km yüzey kırığı oluşmuştur (Şekil 2). Bu depremde Çardak Fayı boyunca tam kırılma meydana gelmiştir. Yüzey kırığı, Göksun ilçe merkezinin güneyinde, Göksun Ovası'nın ortasından başlayarak doğuda Nurhak ilçe merkezine kadar uzanmaktadır. Bu doğrultuda, Çardak Fayı'nın 85 km uzunluğundaki segmenti boyunca toplamda 100 km'lik yüzey kırığı haritalanmıştır (Şekil 2c).

Göksun Ovası içinde, alüvyal zeminde yaklaşık 5 km boyunca izlenen yüzey kırığı, 1.2 ila 2.9 metre arasında değişen sol yanal ötelenme göstermektedir. Bu yüzey kırığı, Yantepe Mahallesi'nin güneyinden itibaren Kaman Dağı'nın kuzey yamacını takip ederek doğuya doğru 19 km boyunca uzanmaktadır. Bu kesimde doğuya doğru sırasıyla 3.0, 3.6 ve 5.2 metre sol yanal ötelenmeler ölçülmüştür. Fındık Mahallesi'nin güneyinde Çardak Fayı'na dik olarak güney yönünde 12 km'lik bir doğru boyunca 9 km yüzey kırığı haritalanmıştır. Karanlıkoyak Dağı'nı kuzey-güney yönünde kesen bu yüzey kırığı 1 km genişlikteki bir zon boyunca bir birine paralel uzanan parçalardan oluşmakta, daha sonra Yeşilköy Mahallesinden itibaren çoğunlukla dar bir zonda ancak kıvrımlı bir uzanış göstermektedir. Fındık Mahallesi'nin güneyinde, güneye doğru uzanan başka bir yüzey kırığı izlenmektedir. Bu kırık, Kandil Dağı ile Keş Dağı arasında, Yeşilköy ve Çamlıca yerleşimlerinin batısı boyunca ilerlemekte ve Çardak Fayı'nın ana uzanış yönüne yaklaşık 90 derecelik bir açıyla güneye doğru yönelmektedir. Kıvrımlı bir yapıya sahip olan bu yüzey kırığı düzensiz bir izlenim sunmaktadır.

Fındık Mahallesi'nden itibaren doğuya doğru yüzey kırığı, Kandil ve Berit Dağları'nın kuzey yamaçlarını keserek Ekinözü ilçesinin güneyine kadar 38 km boyunca dağ yamacını izlenmektedir. Bu bölgede ölçülen sol yanal ötelenme miktarları 6 ile 8 metre arasında değişmektedir. Ekinözü ilçesinin Aşağı İç-



Şekil 2. (a) 6 Şubat Depremlerinin oluşturduğu yüzey kırıkları ve ölçülen doğrultu atımları (m). (b) DAFZ segmentlerinde ve Çardak Fayı'nda yüzey kırıklarında ölçülen sol yanıl ötelenme (cm). Grafikte DAFZ için başlangıç noktası Amanos Segmenti'nde Kırıkhan güneyinde görülen ilk yüzey kırığından başlanarak kuzeydoğu istikametinde Erkenek Segmenti'nde yüzey kırığının son bulunduğu yere kadar alınmış, Çardak Fayı'nda ise Göksun güneyinden, Nurhak'a kadar olan bölüm baz alınmıştır. Ölçülen doğrultu atımları başlangıç noktası olan mesafedir. (c) Çardak Fayı yüzey kırıkları detay haritası.

Figure 2. (a) Surface ruptures and measured strike-slip displacements (m) caused by the February 6 Earthquakes. (b) Measured left-lateral offset (cm) along the surface ruptures in the segments of the East Anatolian Fault Zone (EAFZ) and the Çardak Fault. In the graph, measurements for the EAFZ were taken starting from the first observed surface rupture south of Kırıkhan in the Amanos Segment, extending northeast to the endpoint of the surface rupture in the Erkenek Segment. For the Çardak Fault, measurements were taken from south of Göksun to Nurhak. The horizontal axis represents the distance from the starting point of the measurements. (c) Detailed surface rupture map of the Çardak Fault.

meler Mahallesi'nin doğusundan itibaren Çardak Fayı'nın yüzey kırığı 19 km boyunca devam ederek Barış Mahallesi'nin doğusunda Nurhak Dağı'nın güney yamaçlarında sıçramalar yaparak Sürgü Fayı'na geçmektedir. Bu kesimde sol yanal ötelenme miktarları doğuya doğru sırasıyla 6, 5.9 ve 5.4 m olarak ölçülmüştür. Nurhak ilçe merkezinin kuzeyindeki bu bölüm, bindirmelerle karakterize olup, Çardak, Sürgü ve Malatya faylarının kesiştiği bölgeye karşılık gelmektedir.

Çardak Fayı, Göksun Ovası'ndan kuzeydoğuya doğru yaklaşık 20 km boyunca ilerleyerek Tekne, Kaman, Gücük ve Karanlık-koyak dağlarının kuzey eteklerini katetmekte ve Göksun Çayı havzasını güneyden sınırlayan dağlık alanı belirgin bir şekilde ayırmaktadır. 6 Şubat 2023 depremi sırasında oluşan yüzey kırığı, belirgin fay yamacı karakteri taşıyan bu hat boyunca Fındık

Mahallesi'ne kadar izlenmiştir. Fındık Mahallesi'nden itibaren doğuya doğru ilerleyen fay, 1 km genişlikte bir zon boyunca Kandil Dağı'nın kuzey yamacında kireçtaşı anakayada sıçramalı bir yüzey kırığı geometrisi göstermektedir. Bu bölgede gözlemlenen dik kaya yüzeyleri ve bunların altında birikmiş olan taluslar, Çardak Fayı'nın jeomorfolojik göstergeleri olup, 2023 depremi sırasında belirgin şekilde gençleşmiştir. Fıyn yüzey kırığı, Kandil ve Berit dağlarının kuzey yamaçları boyunca doğuya doğru ilerleyerek, Uzunsırt başta olmak üzere topoğrafik sırt hatlarını paralel olarak kesmektedir. Özellikle Uzunsırt'ta, Aşağııçmeler Mahallesi'ne kadar doğuya doğru sırt hattının tepe noktası boyunca izlenmektedir (Fotoğraf 1). Uzunsırt'ta yüzey kırığındaki sol yanal ötelenmeye ek olarak güney levhada belirgin yükselme de gözlenmektedir (Fotoğraf 1j).



Fotoğraf 1. (a, b, c, d, e, f, g, h ve j) Çardak Fayı'ndaki, (k) Sürgü Fayı'ndaki ve (l ve m) Erkenek Segmenti üzerindeki yüzey kırıklarının İHA görüntüleri. (a, b ve c) Çardak Fayı'nın Uzunsırt üzerindeki yüzey kırığı; (d ve e) Çardak Fayı'nın Ekinözü Aşağııçmeler Mahallesi batısında ikinci depremin merkez üssünde ölçülen maksimum yer değiştirme ve yamaç eğimi nedeniyle oluşan büyük eğim kırıklığı; (f ve j) Çardak Fayı'nın uzunsırt batısında Gözükaralarobası Mahallesi yakınlarında yüzey kırığı; (g) Ekinözü Aşağııçmeler Kırkgöz Pınarı mevkiinde gerilmeye bağlı olarak oluşan yarık ve 10 metreyi bulan oturma, potansiyel heyelan alanı; (h) Ekinözü güneydoğusunda Gözpinar yakınlarında tektonik çöküntüler görüldüğü Kurtgediği Tepeleri mevki; (k) Sürgü Çayı Vadisi'nde Küçüklü Mh. yakınlarında Sürgü Fayı'nın doğudaki son yüzey kırığı; (l ve m) DAF'ın Erkenek Segmenti'nde 6 metrelik yanal ötelenme, Çelikhan güneydoğusunda Merk Düzü; fotoğrafın (e) sağ üst köşesinde görülen sulak alan, fayın dere yatağını kesmesi nedeniyle krevas oluşumu ve taşkını göstermektedir.

Photo 1. (a, b, c, d, e, f, g, h, j) UAV images showing the surface ruptures on the Çardak Fault, (k) on the Sürgü Fault, and (l and m) on the Erkenek Segment. (a, b, c) Uzunsırt; (d, e) west of Ekinözü Aşağııçmeler Mahallesi at the epicenter of the second earthquake, where the maximum displacement was recorded, accompanied by a large scarp due to slope inclination; (f, j) near Gözükaralarobası Mahallesi, west of Uzunsırt; (g) a tensile crack and up to 10 meters of subsidence at Ekinözü Aşağııçmeler Kırkgöz Pınarı, suggesting a potential landslide area; (h) the Kurtgediği Tepeleri area near Gözpinar, southeast of Ekinözü, where vertical movement/subsidence was observed; (k) the easternmost surface rupture of the Sürgü Fault near Küçüklü Mahallesi in the Sürgü Çayı Valley; (l and m) six meters of left-lateral offset in the Erkenek Segment of the EAFZ at Merk Düzü, southeast of Çelikhan. The wetland visible in the upper right corner of (e) indicates crevasse formation and flooding caused by the fault crossing the stream channel

Aşağııçmeler ile Nurhak arasında Çardak Fayı, Nurhak Dağı'nın güney eteğini kateder (Fotoğraf 2). Aşağııçmeler'in doğusundan Barış Mahallesi'nin doğusuna kadar, Nurhak Dağı'nı güneyden sınırlayan fay üzerinde basınç sırtları ve gerilmeye bağlı oturma yapıları baskın olarak gözlemlenmektedir (Fotoğraf 1g, 1h). Aşağııçmeler ile Kırkgöz Pınarı ve Koçboğaz Tepesi arasında, gerilmeye bağlı olarak yamaçta meydana gelen oturma sonucu 10 metreyi bulan eğim kırıklıkları oluşmuştur (Fotoğraf 1g). Bu eğim kırıklığı, ilk bakışta fayda meydana gelen düşey atım olarak değerlendirilse de, 850 m uzunluğunda gerilmeye bağlı oluşan bir çatlak/açılma ve oturma yapısı olarak yorumlanmış olup, gelecekte heyelan oluşturma potansiyeline sahiptir. Nurhak ilçe merkezinin kuzeyinde ve kuzeybatısında, Nurhak Dağı'nın yamaçlarında Çardak Fayı'nın önce güneydoğu yönünde ilerlediği, ardından dirsek yaparak kuzeydoğu ve doğu yönünde kısa mesafeli (100-300 m) sıçramalar şeklinde bağımsız yüzey kırıkları oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Nurhak'ın doğusunda yüzey kırıkları, güneydoğu yönünde Bıçakçı Mahallesi'ne kadar izlenebilmekte olup, bu bölgedeki yüzey kırıkları Sürgü Fayı üzerinde gelişmiştir. Nurhak ilçe merkezinin kuzeyinden doğuya doğru uzanan Sürgü Fayı boyunca 26 km'lik kesimin 12 km'sinde yüzey kırığı gelişmiştir. Kullar Mahallesi'nin doğusunda, Sürgü Fayı üzerinde 4.2 metrelik maksimum sol yanal ötelenme ölçülmüştür. Bu alanda, Sürgü Fayı üzerinde Tatlar Çayı vadisinde 2 km'lik ötelenme mevcuttur. Bıçakçı Mahallesi güneyinde yüzey kırığı son bulurken, 5 km kuzeydoğuda Sürgü Fayı'nın yüzey kırığı tekrar ortaya çıkmakta ve kuzeydoğu yönünde Sürgü Çayı Vadisi'nin güney yamacında 3.5 km boyunca izlenebilmektedir (Fotoğraf 1k). Sürgü Fayı'nda 6 Şubat depreminde yüzey kırığının olduğu en doğudaki bölüm Küçükli Mahallesi'nin güneydoğusunda sonlanmaktadır. Ancak, doğuya doğru ilerleyen fay boyunca Çelikhhan'ın güneyinde Erkenek Segmenti ile kesişim noktasına kadar herhangi bir yüzey kırığı gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte, Sürgü Çayı Vadisi içerisindeki bu yüzey kırığının 17 km kuzeydoğusunda, Doğanşehir ilçe merkezinin batısında, Doğanşehir Fay Zonu'nda yüzey kırıkları başlamaktadır ve kuzeydoğu yönünde kesintili olarak izlenebilmektedir. Doğanşehir ilçe merkezinin batısından kuzeydoğusuna kadar 12 km'lik bir hat boyunca, toplamda 6 km'lik yüzey kırığı haritalanmıştır. Bu bölgede 1.3 metre sol yanal ötelenme tespit edilmiştir. Doğanşehir Fay Zonu'ndaki yüzey kırıkları, mevcut MTA haritalarında gösterilmeyen bir hat boyunca ilerlemektedir.

Çardak, Sürgü ve Doğanşehir fayları genel olarak dağlık bölgedeki engebeli sahaları ve havza sınırlarını izlemektedir. Bu nedenle Ekinözü depreminde Çardak Fayı'nda oluşan yüzey kırıkları üzerinde sol yanal doğrultu atımı baskın olmakla birlikte düşey bileşenler de izlenebilmektedir. Sıkıştırma ve gerilmelere bağlı olarak yırtılma yapıları, basınç sırtları ve yamaçlarda eğim kırıklıkları yaygın olarak gözlenmektedir. Ekinözü depreminin merkezüssünün batısında Çardak Fayı, Ceyhan ve Göksun havzaları ile güneydeki dağlık saha arasında sınırı oluşturmaktayken, doğuda Nurhak Dağı ile güneyindeki havzalar arasında sınır oluşturmaktadır.

3.1.2. Pazarcık Depremi Yüzey Kırığı (6 Şubat 2023 4:17 7.7 Mw) 6 Şubat 2023 tarihli ilk depremde DAFZ'nin Erkenek, Pazarcık ve Amanos segmentlerinde tam kırılma, ÖDFZ'nin Narlı Segmenti'nde kısmi kırılma, Tut Fayı'nın ise batı bölümünde kırılma meydana gelmiştir. 5 Segmentte kırılan bölüm uzunluğu 350 km olup, 217 km yüzey kırığı haritalanmıştır. Erkenek Segmenti,

Çelikhhan ile Pütürge ilçeleri arasında, Akdağ'ın (Türk Dağı) güney eteklerinden başlayarak güneybatı doğrultusunda Gölbaşı'na kadar 83 km boyunca uzanmaktadır. Çelikhhan Segmenti'nin başlangıç bölümü, Çardak-Sürgü-Malatya faylarının kesişim bölgesi olan Nurhak Dağı'nın güney yamaçlarındakine benzer şekilde sıçramalı-çatallı bir yapıda olup Pütürge Segmenti'nden ayrılmaktadır. 6 Şubat depremiyle oluşan yüzey kırığı, Çelikhhan'ın 10 km kuzeydoğusundaki Yeşilyayla Köyü'nde başlayarak Gilisi Dağı ve Akdağ'ın kuzey yamacını sınırlayıp Çelikhhan Ovası'na (Mestan Yazısı ve Merk Düzü) ulaşmaktadır. Ova tabanında ölçülen sol yanal ötelenmeler kuzeydoğudan güneybatıya doğru 6.0 m, 6.4 m ve 4.4 olarak belirlenmiştir (Fotoğraf 1l ve 1m). Ovada ilerleyen yüzey kırığı, dağlık bölgeyi kat ederek Göksu Çayı Vadisi'nin güney yamaçlarını izleyip Gölbaşı Gölü'nde son bulmaktadır. Gölbaşı'nın kuzeydoğusunda sol yanal ötelenme 3.4 m olarak ölçülmüştür.

Gölbaşı Gölü, Erkenek ve Pazarcık segmentleri ile Tut Fayı'nın kesiştiği bir çek-ayır havzası olup, burada Pazarcık Segmenti'nin yüzey kırığı başlamaktadır. Bu kırık, güneybatı yönünde Türkoğlu'na kadar 86 km boyunca devam etmektedir. Pazarcık Segmenti boyunca ölçülen sol yanal ötelenmeler, Gölbaşı ilçe merkezinde 4.4-5.1 m, Azaplı Gölü güneyinde 3.2-4.7 m, İnekli Gölü güneyinde 4-4.3 m, Aksu Çayı Vadisi'nde (Göynük Mahallesi güneyi) sırasıyla 3.7, 5.5, 3.9, 3.8, 4.8, 4.6 ve 4.4 m olarak belirlenmiştir. Pazarcık ilçe merkezinin 10 km kuzeyinde, Kocadere Vadisi içinde Kocadere Mahallesi yakınlarında ölçülen 7.1 m sol yanal ötelenme, ilk depremde tespit edilen en büyük yer değiştirmedir (Fotoğraf 2). Bu noktadan sonra Karataşlık Mahallesi batısındaki sırt üzerinde 2.8 m, Gökdere Vadisi içerisinde sırasıyla 5 m ve 4.8 m ötelenmeler ölçülmüştür. Bu vadinin güney yamacını takip eden yüzey kırığı Kartal Mahallesi doğusunda, tepe üzerinde 3 m ve 2.8 m sol yanal ötelenme tespit edilmiştir. Güneybatıya doğru ilerleyen fay, engebeli araziye terk ederek Çiğli Mahallesi yakınlarında Kahramanmaraş-Gaziantep karayolunun geçtiği ova tabanında izlenmektedir. Buradaki ötelenmeler, sırasıyla 4.7 m, 4.5 m, 4 m, Tevekkeli Mahallesi doğusunda 3.95 m, Kuyumcular Mahallesi ile Türkoğlu tren istasyonu arasında ise 3.9 m ve 4 m olarak belirlenmiştir (Fotoğraf 2).

Pazarcık Segmenti'nin yüzey kırığı, genellikle sıçrama yapmayan, basit ve tek bir hat olarak izlenmektedir. Ancak, Pazarcık ilçe merkezinin kuzeyinde, Kocadere Mahallesi'nin batısındaki sırt üzerinde kısa mesafede çatallanmış bir yüzey kırığı görülmektedir. Gölbaşı Gölü'nden İnekli Gölü'nün güneyine kadar alüvyal zeminlerde izlenen yüzey kırığı, buradan itibaren Kahramanmaraş şehir merkezinin güneyine kadar engebeli dağlık alanı katetmektedir. Daha sonra, Türkoğlu ilçe merkezine kadar yeniden alüvyal zemini keserek ilerlemektedir. İnekli Gölü'nün güneyinde, Göynük Mahallesi yakınlarında alüvyal zeminde 5.5 m sol yanal ötelenmeye ek olarak güneydeki levhada - 0.6 m düşey bileşen, bu alanın güneybatısında Aksu Vadisi'nde 4 m sol yanal ötelenmeye güneydeki levhada + 0.5 m yükselme gözlemlenmiştir (Fotoğraf 2a). Batıya doğru ilerleyen yüzey kırığı, Kısık Deresi'nin yatağını keserek 4.7 m'lik sol yanal ötelenmeye neden olmaktadır (Fotoğraf 2b). Kocadere Mahallesi yakınlarında, Pazarcık Segmenti'nin yüzey kırığı maksimum ötelenme sergilemektedir. Burada, tarla sınırlarını dikine kesen yüzey kırığı, Pazarcık Depremi'nin en büyük yer değiştirmesi olan 7.1 m sol yanal ötelenmeyi barındırmaktadır (Fotoğraf 2c ve 2d). Bu alanın 500 m yakınında, sırt hattında açılmalı bir yüzey kırığı geometrisi izlenmektedir (Fotoğraf 2e ve 2f).



Fotoğraf 2. DAF'ın Pazarcık ve Amanos segmentlerindeki yüzey kırıkları. (a) Pazarcık Göynük Mh. güneyi; (b) Pazarcık Sakarkaya Mahallesi yakınlarında Aksu Çayı yatağındaki ötelenme; (c ve d) İlk depremin merkez üssüne yakın olan ve en yüksek yanıl ötelenmenin ölçüldüğü yer olan Kocadere Mahallesi yakınları; (e ve f) en yüksek ötelenmenin ölçüldüğü lokasyonun yakınındaki bir sırtta meydana gelen yırtılma; (g) Pazarcık Segmenti'nin Kahramanmaraş şehrinin güneyindeki bölümü; (h) Pazarcık Segmenti'nin Türkoğlu ilçesi doğusunda yüzey kırığı boyunca tektonik çöküntü ve göllenme; (j) Nurdağı'nın kuzeyinde Yeşilyurt Mahallesi yakınlarında Amanos Segmenti'nin yüzey kırığı; (k) Türkoğlu Şekeroba Mahallesi içindeki bir parkta Amanos Segmenti'nin yüzey kırığı; (l) Hassa İlçesi'nde Atatürk İlkokulu yakınlarında Amanos Segmentinde 3.2 m yanıl ötelenme ve (m) fayın düşey bileşeni.

Photo 2. Surface ruptures in the Pazarcık and Amanos Segments of the East Anatolian Fault Zone. (a) 5.5 m of left-lateral offset south of Göynük Mahallesi, Pazarcık; (b) displacement in the Aksu River channel near Sakarkaya Mahallesi, Pazarcık; (c, d) the area close to the first earthquake's epicenter near Kocadere Mahallesi, where the highest lateral offset was measured; (e, f) a rupture on a ridge near the site of the maximum offset; (g) 4 m of left-lateral offset observed in the southern section of the Pazarcık Segment near Kahramanmaraş city; (h) ponding in agricultural fields along the surface rupture east of Türkoğlu in the Pazarcık Segment; (j) the Amanos Segment's surface rupture near Yeşilyurt Mahallesi, north of Nurdağı; (k) the Amanos Segment's surface rupture within a park in Şekeroba Mahallesi, Türkoğlu; (l) 3.2 m of left-lateral offset in the Amanos Segment near Atatürk Primary School in Hassa; (m) the fault's vertical component.

Kahramanmaraş şehrinin güneyinde, Çiğli, Kapiçam, Tevekkeli, Öksüzlü ve Kuyumcular mahallelerini takip eden Pazarcık Segmenti'nin yüzey kırığı, Türkoğlu tren istasyonunun güneyinde son bulmaktadır. Alüvyal zemindeki tarım arazileri üzerinde rahatlıkla izlenebilen bu kırık hattında, sol yanıl ötelenmeler 3.9 ila 4.7 metre arasında değişmektedir (Fotoğraf 2g ve 2h). Bu bölgede, yüzey kırığının çevresinde çok sayıda sivilaşma örneği gözlemlenmiştir. Başta kum fıskırma/kaynama yapıları olmak üzere, gerilmeye bağlı çökme ve oturmalar nedeniyle yeraltı suyunun yüzeye çıkması sonucu geçici göllerin oluştuğu alanlar dikkat çekmektedir. Özellikle, Türkoğlu'nun Varto Köyü güneyinde meydana gelen bu oluşum, bölgedeki sivilaşmanın en belirgin örneklerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Fotoğraf 2h). Türkoğlu ilçe merkezi güneydoğusunda Pazarcık Segmenti son bulmakta olup, bu noktadan itibaren 8.5 km boyunca yüzey kırığı izlenmemektedir. Amanos Segmenti'nin yüzey kırığı ilk ola-

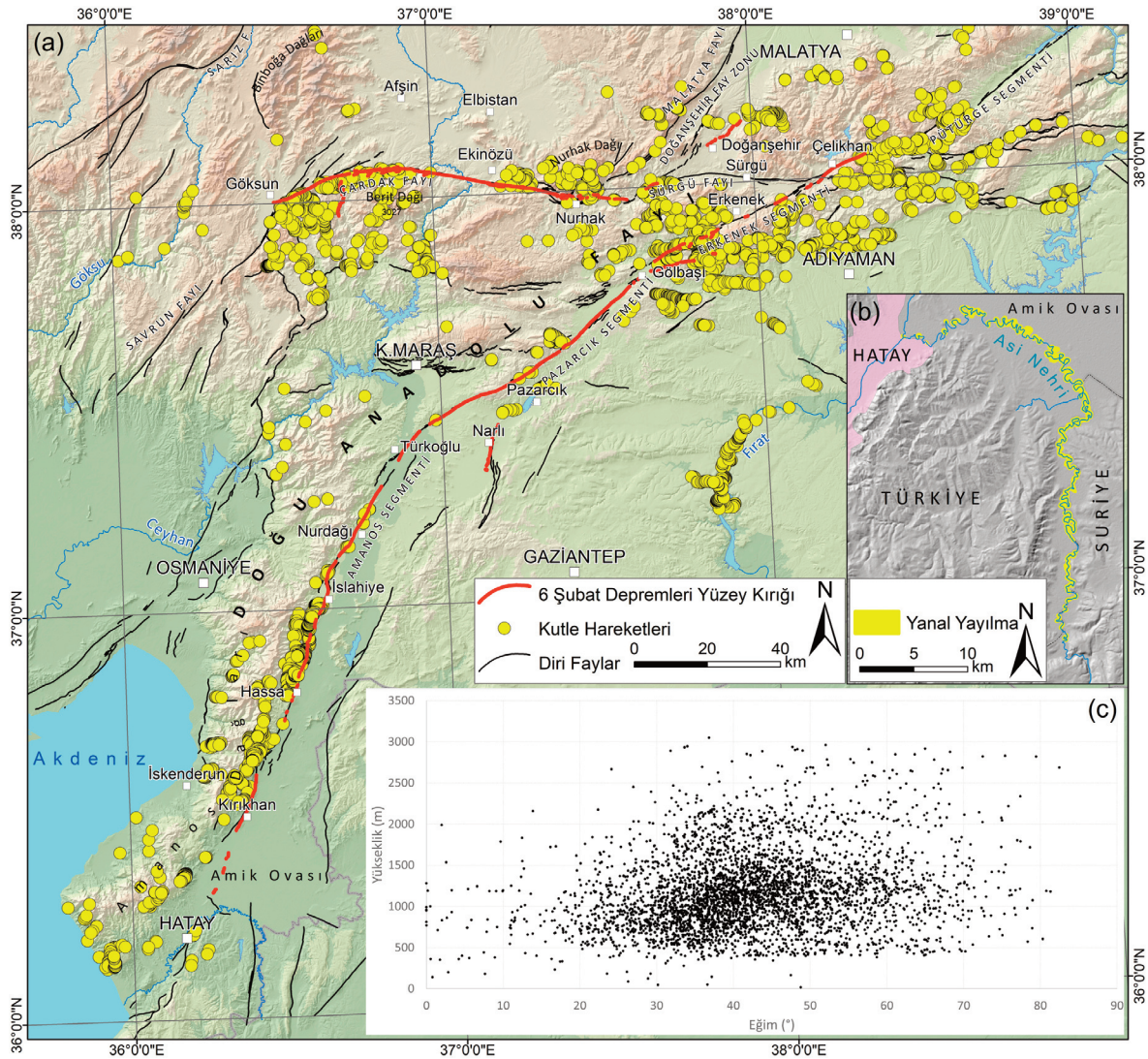
rak Beyoğlu Mahallesi doğusunda ova tabanında gözlemlenmiş ve 3 m sol yanıl atım oluşturmuştur. Şekeroba Mahallesi içinde 3.5 m, Yeşilyurt Mahallesi güneyinde 3.5 m, Nurdağı ilçe merkezinin kuzeyinde 3.9 m, batısında 3.6 m, İslahiye'de 1.75 m, Hassa yönüne doğru güneyde sırasıyla 4 m, Hassa ilçe merkezinde ise 2.7 m, 3.2 m, 2.95 m, 3 m, 4 m ve 2.1 m ötelenmeler ölçülmüştür (Fotoğraf 2). Kırıkhan güneyinde ise 1 m ve 1.75 m sol yanıl ötelenme belirlenmiş olup Amik Ovası'nda fayın sönümlendiği görülmüştür. Amanos Segmenti, Amanos Dağları'nın doğu sınırını oluşturmakta, yer yer ova tabanında, yer yer yamaçlar üzerinde yüzey kırığı oluşturmıştır. Bu segment boyunca yüzey kırığında ötelenme 1-4 m arasında değişmektedir. Hassa Atatürk İlkokulu'nun kenarında 3.2 m sol yanıl ötelenmeye ek olarak güney levhada yaklaşık 1 m yükselme kaydedilmiştir (Fotoğraf 2l ve 2m).

ÖDFZ'nin Narlı Segmenti'nde 13 km boyunca yüzey kırığı haritalanmıştır. Pazarcık ilçesinin Narlı Mahallesi doğusunda kuzey-güney doğrultusunda uzanan fayın yüzey kırığı, sıçramalı bir yapı sergileyerek ova tabanını katetmiştir. Mahallenin doğusunda kuzeyden güneye doğru sırasıyla 2.7 m, 3 m, 2.6 m ve 2.1 m sol yanal ötelenmeler ölçülmüştür. İlk depremde kırılan diğer bir fay ise MTA diri fay haritasında yer almayan Tut Fayı'dır. Gölbaşı Gölü'nün doğusunda başlayarak kuzeydoğu yönünde Tut ilçesinin kuzeyine kadar 25 km'lik bir segment boyunca 12.5 km yüzey kırığı saptanmıştır. Gölbaşı Gölü'nün 4 km doğusunda 3 m sol yanal ötelenme ölçülmüştür.

3.2. Kütle Hareketleri

6 Şubat depremlerinde deprem anında (ko-sismik, İng. co-seismic) oluşan kütle hareketlerinden 4139'u haritalanmıştır. Bu sayı yalnızca ortofotolarda saptanabilen büyüklükteki oluşumları kapsamaktadır. Kütle hareketleri en çok Erkenek Segmenti

çevresinde, Göksun güneydoğusunda ve Amanos Dağları'nda meydana gelmiştir (Şekil 3). Anakaya heyelanları, taş/kaya düşmeleri, toprak akmaları, yanal yayılmalar, döküntü/debris akışları gibi kütle hareketi türlerinden pek çoğu deprem sırasındaki sarsıntılar nedeniyle geniş bir alanda meydana gelmiştir. Ancak bu sayı içerisinde yanal yayılma yapıları dahil edilmemiş olup, çok düşük eğimlerde ve alüvyal zeminlerde meydana gelen bu yapılar sınırlama yapılarıyla birlikte ele alınmıştır. Sedimanter kayalarda daha fazla (2541 adet) kütle hareketi görülmekle birlikte özellikle kabuksal deformasyonun yoğun olduğu bölgelerde ve fayların kestiği engebeli topoğrafya kütle hareketlerinin oluşumunda etkili olmuştur. Kütle hareketlerinin % 60'ı kireçtaşı ve mermer gibi karbonatlı kayalarda, % 20'si volkanik ve ofiyolitik kayalarda, geriye kalanlar ise karasal kırınrılar, yamaç örtüleri ve alüvyal alanlarda meydana gelmiştir. Kütle hareketlerinin yamaç eğiminin 20°'yi aştığı yerlerde yoğunlaştığı, 30°-60° aralığındaki eğimli yamaçlarda oluşumların toplam içinde % 80'lik orana sahip olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3c).



Şekil 3. (a) Depremlerin tetiklediği kütle hareketlerinin dağılışı haritası. (b) Asi Nehri'nin Türkiye-Suriye sınırından Hatay'a kadar olan bölümünde yanal yayılmalar. (c) Kütle hareketlerinin yükseklik ve eğim ilişkisini gösteren grafik.

Figure 3. (a) Distribution map of mass movements triggered by the earthquakes. (b) Lateral spreading along the Asi River between the Turkey-Syria border and Hatay. (c) Graph showing the relationship between mass movements, elevation, and slope.

Kütle hareketleri nedeniyle yerleşmeler, karayolları, demiryolları, enerji nakil hatları gibi yapılar başta olmak üzere tarım ve orman arazileri zarar görmüştür. Amanos Dağları'nın doğu yamaçları ile Berit ve Nurhak dağlarının fay yamaçlarında mey-

dana gelen kütle hareketleri nedeniyle yerleşim alanlarında önemli hasarlar gözlenmiştir (Fotoğraf 3). Bazı kütle hareketleri doğrudan fay yüzey kırığı üzerinde oluşmuştur (Fotoğraf 3c, 3d ve 3e).



Fotoğraf 3. Deprem anında meydana gelen kütle hareketlerine örnekler. (a) İslahiye Değirmencik heyalanı ve set gölü; (b) İslahiye kuzeyi; (c) Ekinözü güneybatısında Çardak Fayı'nın yüzey kırığı üzerinde meydana gelen ve bazı evlerde hasara neden olan heyelan; (d) Sürgü Fayı'nın kısa bir bölümünde oluşan yüzey kırığı üzerinde oluşan heyelan; (e) Erkenek Segmenti'nin Göksu Vadisi'nin güney yamaçlarını kesmesi sonucu oluşan yarıklar; (f) Pazarcık kuzeyinde Pazarcık Segmenti'nin 200 m yakınında oluşan sığ toprak akması; (g, h, j) Pazarcık kuzeyinde kaya düşmeleri; (k) Çağlayancerit güneyinde kaya düşmeleri; (l) Nurhak doğusunda ve (m) İslahiye kuzeyinde kaya düşmeleri.

Photo 3. Examples of mass movements triggered during the earthquake. (a) The Değirmencik landslide and its landslide-dammed lake in İslahiye; (b) north of İslahiye; (c) a landslide on the surface rupture of the Çardak Fault southwest of Ekinözü, causing damage to several houses; (d) a landslide on a short section of the surface rupture along the Sürgü Fault; (e) fractures, rockfalls, and debris flows resulting from the Erkenek Segment crossing the southern slopes of Göksu Valley; (f) a shallow earth flow located about 200 m from the Pazarcık Segment, north of Pazarcık; (g, h, j) north of Pazarcık; (k) south of Çağlayancerit; (l) east of Nurhak; and (m) north of İslahiye, where rockfalls have occurred.

İslahiye Değirmencik Mahallesi yakınlarında Değirmencik Vadisi'nin kuzey yamacında oluşan heyelan (600 m x 230 m) Değirmencik Deresi'nin akışını durdurduğu için set gölü meydana gelmiştir (Fotoğraf 5a). Benzer ancak daha küçük bir heyelan (210 m x 95 m) Tut'un İncekoz Mahallesi'nde meydana gelmiş olup geçici bir set gölü oluşturmuştur. Çelikhan doğusunda İzci Köyü'nün batısında Kara Çay vadisinin kuzey yamacında Şifrin Hidroelektrik Santrali'nin (HES) hidromekanik aksam ve yüklem havuz bağlantıları deprem sırasında hasar almış ve dik yamaçta oluşan çamur akıntısı 270 metrelik düşüş yaparak vadi tabanına doğru taşkın gerçekleşmiştir. Taşkın nedeniyle bir fan (400 m x 250 m) meydana gelmiş ve vadi tabanındaki yol, sulu tarım arazileri ve meyve bahçeleri kalın bir döküntü katmanıyla örtülmüştür. Bütün kütle hareketleri içerisinde en büyük paya sahip olanı kaya düşmeleridir. Kaya düşmeleri çoğunlukla yüksek eğimli kayalık yamaçlarda ve özellikle de kireçtaşı litolojinin eğim kırıklığı oluşturduğu yamaçlarda meydana gelmiştir (Fotoğraf 3). Kara ve demiryolları başta olmak üzere yerleşim alanları kaya düşmeleri nedeniyle birçok yerde hasar almıştır.

3.3. Sivilaşmalar

6 Şubat depremlerinde, az eğimli suya doygun alüvyal zeminlerde gözenek suyu basıncının artması sonucu meydana gelen sivilaşmalar, geniş çaplı deformasyonlara yol açmıştır. Bu deformasyonlar arasında en yaygın olarak gözlemlenenler yanal yayılma ve kum fışırma/kaynama (kum volkanları) yapılarıdır. Yanal yayılmanın en çok görüldüğü alanlar Gölbaşı Gölü'nün kıyıları, İskenderun'un Akdeniz kıyısı ve Asi Nehri'nin taşkın ovasıdır (Şekil 3). Ayrıca, Azaplı Gölü ve İnekli Gölü çevresi ile Kahramanmaraş-Antakya arasında, özellikle fay hatlarına yakın ova tabanlarında sivilaşma olayları yaygın olarak meydana geldiği saptanmıştır. Yanal yayılmanın en belirgin örneklerinden biri Gölbaşı Gölü kıyılarında, diğeri ise Asi Nehri'nin Türkiye sınırları içerisinde kalan taşkın ovasında görülmüştür. Gölbaşı Gölü'nün doğu ve güney kıyılarında yaklaşık 4 km uzunluğunda bir sahil şeridinde yanal yayılma gelişmiş olup, bu olay maksimum 300 m genişliğinde bir alanı (1 km²) etkilemiştir. Adıyaman Üniversitesi Gölbaşı Meslek Yüksekokulu'na ait bazı bina

ve yapılar, gölün içine doğru yaklaşık 10 m kaymıştır. Bu bölgede tarım arazilerinde kıyıya paralel çatlaklar oluşmuş ve bu çatlaklar boyunca kayma ve oturmalar meydana gelmiştir. Ayrıca, göl kıyısına paralel uzanan demiryolunda sıvılaşmaya bağlı belirgin deformasyonlar gözlemlenmiştir (Fotoğraf 4).

Sıvılaşmanın geniş çaplı arazi deformasyonlarını oluşturduğu en dikkat çekici bölge Asi Nehri'nin taşkın ovasıdır. Suriye sınırında bulunan boğazdan çıktıktan sonra Türkiye-Suriye sınırı boyunca uzanan Asi Nehri taşkın ovasında yoğun yanal yayılma deformasyonları oluşmuştur (Şekil 3b). Antakya şehir merkezine kadar menderesli bir akış pateni sergileyen Asi Nehri'nde (50 km uzunluktaki vadi bölümünde), özellikle burun setlerinde (point bar) büyük ölçekli deformasyonlar meydana gelmiştir.

Yanal yayılma sonucu oluşan bu deformasyonlar, nehir banklarını büyük ölçüde tahrip etmiş, burun setlerindeki tarım arazilerini kısmen veya tamamen parçalamıştır. Bu bölgede ekili ve dikili tarım arazileri ciddi hasar almış ve birçok noktada Asi Nehri'nin mevcut yatağına doğru kaymıştır (Fotoğraf 4). Ayrıca Asi Nehri'nin taşkın ovasında üzeri alüvyon ve toprakla örtülerek tarım arazisi olarak kullanılan kopmuş menderes gibi eski akarsu yatağına ait bölümlerde sıvılaşmaya bağlı olarak eski yatak paternini yansıtan kum çıkışları ve çatlaklar gelişmiştir (Fotoğraf 4h). Asi Nehri'nin taşkın ovasında meydana gelen yanal yayılma alanının toplam yüzölçümü 6 km²'dir. Ayrıca, tarım arazileri içerisinde bulunan çiftlik yapıları ve yollar da büyük zarar görmüştür.



Fotoğraf 4. Sıvılaşmaya bağlı olarak Gölbaşı, Erkenek, Türkoğlu yakınlarında ve Asi Nehri taşkınovasında meydana gelen yüzey deformasyonları. (a, b, c, d) Gölbaşı Gölü'nün kıyılarında yanal yayılma nedeniyle göle doğru kayan ve çöken bina, göl kıyısında yarılmalara ve demiryolu raylarında deformasyon; (e) Erkenek yakınlarında Göksu Çayı Vadisi'nde sıvılaşmaya bağlı olarak karayolunda meydana gelen deformasyon; (f) Kahramanmaraş güneyinde, Türkoğlu doğusunda Pazarcık Segmenti çevresinde oluşan kum fıçırmaları; (g, j, k, l ve m) Asi Nehri'nin taşkın ovasındaki menderesler arasında çoğunlukla burun setlerinde (point bar) meydana gelen yanal yayılma nedeniyle hem akarsu yatağının bankları zarar görmüş, hem ekili-dikili arazilerde ciddi deformasyonlar oluşmuştur; (h) Asi Nehri'nin sediman örtülü eski yatağının sıvılaşma nedeniyle belirginleşmesi ve kum çıkışları.

Photo 4. Surface deformations caused by liquefaction near Gölbaşı, Erkenek, Türkoğlu, and within the Asi River floodplain. (a, b, c, d) Lateral spreading along the shores of Lake Gölbaşı, leading to subsidence of buildings, agricultural land, and railway tracks; (e) deformation in the roadway near Erkenek in Göksu Valley caused by liquefaction; (f) sand eruptions southeast of Kahramanmaraş, east of Türkoğlu, around the Pazarcık Segment; (g, j, k, l, m) lateral spreading predominantly affecting point bars in the meanders of the Asi River floodplain, resulting in bank erosion and severe deformation in cultivated areas; (h) liquefaction reactivating the sediment-covered paleo-channel of the Asi River, revealed by sand eruptions.

4. Tartışma

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, Türkiye’de bilinen en büyük depremler arasında yer almakta olup, Doğu Anadolu Fay Zonu’nun (DAFZ) sismotektonik süreçlerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Deprem öncesi araştırmalar, bölgede önemli bir stres birikimi olduğunu ve özellikle Pazarcık segmentinin büyük bir deprem üretme potansiyeli taşıdığını göstermiştir (Nalbant vd., 2002; Aktuğ vd., 2016). DAFZ’daki ortalama sol yanal hareket hızının kuzey segmentlerde 10 mm/yıl, güney segmentlerde ise 4.5 mm/yıl düzeyinde olduğu bildirilmekte (Şaroğlu vd., 1992; McClusky vd., 2000; Reilinger vd., 2006; Aktuğ vd., 2016) ve bu hareketin tarihsel süreçte 1513 Ceyhan-Malatya depremi, 1544 Göksun-Malatya depremi gibi büyük depremler ürettiği bilinmektedir (Ambraseys, 1989; Taymaz vd., 2021). Nitekim 6 Şubat 2023’te meydana gelen iki büyük deprem (Mw 7.7 ve Mw 7.6), bölgede birikmiş enerjinin aniden açığa çıkmasına neden olmuştur. Yaklaşık 500 yıllık sismik durgunluk sonrası meydana gelen iki depremde yüzey kırıkları boyunca ölçülen yer değiştirmeler DAFZ’nın bazı segmentlerinde tahmin edilenden daha yüksek bir kayma hızına sahip olduğunu göstergeleri olabilir.

Çardak Fayı’nın yaklaşık 85 km’lik bir kesimi boyunca gözlemlenen yüzey kırıklarının ayrıntılı incelenmesi, fayın sıçramalar yaparak 98 km’ye ulaşan yüzey kırığı oluşturduğunu göstermiştir. Ekinözü-Aşağıçmeler batısında sıkıştırma rejime bağlı yükselmeler (Fotoğraf 1a, 1b, 1c, 1d, 1j), doğusunda ise gerilmeye bağlı açılma ve oturma yapıları (Fotoğraf 1g ve 1h) tespit edilmiştir. Bu bulgu Bayrakdar vd.’nin (2023) sonuçlarıyla uyumludur. Bu durum, fayın hem doğrultu atımlı hem de düşey bileşenli hareketlere sahip olduğunu ve sıkıştırma-gerilme rejimlerinin topoğrafik şekillenme üzerindeki etkisini göstermektedir. Nitekim Balkaya vd. (2021) tarafından Çardak ve Sürgü faylarında yapılan morfometrik indis hesaplamaları sonuçlarına göre bu sahadaki tektonik aktivitenin denüdasıyondan yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Başka bir deyişle Çardak Fayı çok iyi bilinmemesine rağmen oldukça aktif bir fay olduğu fayın takip ettiği tepe ve sırt sistemlerini kesmesine rağmen bu alanlarda akarsu aşındırmasının fay aktivitesine göre daha zayıf kalması nedeniyle bölgedeki topoğrafik yapıların belirgin olarak tektonik kontrol altında geliştiği anlaşılmaktadır.

Çardak Fayı’nın yüzey kırığı üzerinde görülen büyük eğim kırıklıkları, ilk bakışta düşey atım olarak yorumlansa da çoğu durumda fayın dik yamaçları keserek iki yamacı yanal yönde uzaklaştırmasıyla ilişkilidir. Örneğin Aşağıçmeler yakınlarında 2-3 metreyi bulan eğim kırıklıklarının asıl nedeni, yamacın 8 metre ötelenmesidir (Fotoğraf 1d). Benzer şekilde, Aşağıçmeler doğusundaki Kırkgöz pınarı ile Koçboğazı tepesi arasında oluşan 800 metrelik yarık ve 10 metre dolayında eğim kırıklığı gerilmeye bağlı oturmadan kaynaklanmıştır (Fotoğraf 2c). Bununla birlikte, fayların düşey atıma sahip olmadığı söylenemez; düz alanlarda veya stratigrafik ilişki kurulabilen yüzey kırığı kesitlerinde dikey bileşen tespit edilebilmektedir (Fotoğraf 1b, 1j, 2a, 2h, 2l ve 2m).

Jeodezik ve sismolojik verilerin analizi, büyük depremler sırasında yırtılma dinamiklerini anlamada kritik rol oynamaktadır. Fay segmentlerindeki düzensizlikler ve jeolojik bariyerler, yırtılmanın belirli bölgelerde durmasına veya sıçramalar yapmasına yol açabilir (Toker vd., 2023). 6 Şubat 2023

Kahramanmaraş depremlerine yönelik bazı çalışmalar, yırtılma sürecinin klasik modellerden farklı olarak, ana yırtılma cephesi ulaşmadan önce başlayan ve S dalgası hızını aşan “süpershear yırtılmalar” içerdiğini ortaya koymaktadır (Lee vd., 2024). Ekinözü depreminde hızlı ve düzgün ilerleyen bir süpershear yırtılma gözlemlendiği raporlanmıştır (Ding vd., 2023; Zhou vd., 2025). Buna karşılık Pazarcık depreminde, kopuk segment bağlantıları ve karmaşık fay geometrisi nedeniyle yırtılmanın daha uzun sürdüğü, yüksek frekanslı sismik dalgaların çeşitli yönlerde sıçrayarak yapı hasarını artırmış olabileceği düşünülmektedir (Ding vd., 2023; Zhou vd., 2025). Narlı Fayı’nda başlayan bu yırtılmanın, DAFZ boyunca büyük kırılmaları tetiklediği ve farklı segmentlere sıçradığı da belirtilmektedir (Abdelmeguid vd., 2023; Melgar vd., 2023; Ren vd., 2024). Süpershear yırtılmaların Hatay çevresinde yüksek ivmeli yer hareketlerine yol açtığı, bu nedenle yıkımın arttığı ifade edilmektedir (Abdelmeguid vd., 2023; Ding vd., 2023; Melgar vd., 2023; Ren vd., 2024). Ayrıca, yırtılma hızlarının yüksek olduğu kesimlerde deformasyonun ana fay hattı üzerinde toplandığı, hızın azaldığı yerlerde ise fay dışı deformasyonların arttığı raporlanmıştır (Xi vd., 2025). Bu süreçlerin yalnızca yapı hasarını değil, yüzey deformasyonlarını ve artçı sarsıntı sıklığını da etkilediği tahmin edilmektedir (Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3). Bir yıl içinde oluşan yaklaşık 40 bin artçı sarsıntının dağılımına bakıldığında, yüzey kırıklarının sonlandığı noktalarda sismik aktivitenin yoğunlaştığı, özellikle Göksun civarının artçıların en fazla görüldüğü bölge olduğu anlaşılmaktadır.

Kütle hareketlerinin dağılımı da yırtılma dinamikleri, faya yakınlık, topoğrafik engebe ve litolojiyle ilişkilidir. Örneğin Erkenek Segmenti çevresindeki volkanik, bazik ve ultrabazik kayalar ile metamorfik karbonatların dokanaklarında yoğun heyelan gözlenmektedir. Ayrıca, fay tarafından kesilen yamaçlarda oluşan heyelanlar Çardak, Erkenek ve Sürgü faylarında dikkat çekicidir. Bütün kütle hareketleri içerisinde en büyük paya sahip olanlar kuşkusuz kaya düşmeleridir. 6 Şubat depremlerinde kırılan faylara yakın olan eğimli kireçtaşı yamaçlarda özellikle de kireçtaşı bantlarda kaya düşmelerinin yoğun olduğu görülmektedir. Bölgede meydana gelen kütle hareketlerinin % 75’i sedimanter kayalar üzerinde gelişmiş olup, kireçtaşı ve mermer başta olmak üzere karbonatlı kayalar üzerinde oluşanların oranı % 62’dir. Ofiyolit ve volkanik kayalar üzerinde meydana gelen kütle hareketlerinin oranı % 20’dir. Görüm vd. (2023) yaptıkları çalışmada saptadıkları 3673 kütle hareketinden büyük bölümünün kaya düşmelerinden olduğunu ortaya koymuşlardır. Kaya düşmeleri başta olmak üzere kütle hareketleri konutlar, bölgesel ulaşım ağları, hidroelektrik santraller (HES) ve demiryollarında ciddi hasarlara yol açmıştır. Kütle hareketlerinin büyük çoğunluğu faylara 30 km mesafede gerçekleşmiştir. Ancak, faya 60 km uzaklıktaki Fırat Vadisi’de (Halfeti yakınları) bile yoğun kaya düşmelerinin gözlenmesi, yalnızca faya yakınlığın değil, litolojik ve topoğrafik faktörlerin de önemli olduğunu göstermektedir (Şekil 3).

Deprem sonrası yaygın olarak gözlenen deformasyon türlerinden biri sıvılaşmadır ve bu durum özellikle düşük eğimli alüvyal zeminlerde yoğunlaşmıştır. Gölbaşı, İslahiye ve Hatay gibi yerleşim alanlarında sıvılaşma sonucu binalarda, karayollarında, demiryolu hatlarında ve altyapı sistemlerinde ciddi yapısal hasarlar meydana gelmiştir. Özellikle Gölbaşı Gölü çevresi ve Asi Nehri’nin kıyı kesimlerinde yanal yayılma yapıları dikkat çekicidir. Bu bölgelerde, tarım arazilerinde geniş çatlaklar oluşmuş,

göl ve akarsu yönüne doğru olan yanal yayılmalar sonucunda ciddi toprak kayıpları yaşanmıştır.

Asi Nehri'nin Suriye sınırından başlayarak Antakya'ya kadar uzanan yaklaşık 50 km uzunluğundaki menderesli vadi segmenti (akarsuyun bu alandaki uzunluğu 100 km'dir), yanal yayılmanın en belirgin gözlemlendiği alanlardan biridir. Tafsoglou vd. (2023), bu kesimde meydana gelen sivilaşma kaynaklı deformasyonların sayısını 563 olarak belirlemiş ve bu miktarın toplam sivilaşma olaylarının yaklaşık %30'unu oluşturduğunu raporlamıştır. Burada Asi Nehri'nin doğal menderes paternini koruyan burun setleri büyük ölçüde yıkıma uğramış, doğal akarsu bankları ve leveler ise çökmüştür. Bu durum yalnızca morfolojik değişimlere değil, aynı zamanda hidrolojik rejimde de bozulmalara yol açmıştır. Özellikle taşkın ovası içinde sivilaşma kaynaklı deformasyonlar, Asi Nehri'nin yatak stabilitesini azaltarak akarsu kanalının daha düzensiz ve değişken bir yapıya bürünmesine neden olmuştur. Doğal leveelerin tahrip olması, taşkın kontrolünün zayıflamasına ve gelecekteki taşkınlara karşı bölgenin daha savunmasız hale gelmesine neden olmuştur. Bu süreç aynı zamanda tarım arazilerinin ve kırsal yerleşimlerin taşkın riski altına girmesine yol açmıştır. Ayrıca, sismik şokun etkisiyle eski akarsu yataklarında kum çıkışlarının oluşması, tarımsal faaliyetler nedeniyle zamanla belirsizleşen paleokanalların yeniden belirginleşmesine neden olmuştur. Bu durum, nehir havzası morfolojisinin geçmiş akarsu ağlarıyla birlikte yeniden değerlendirilmesini de gerekli kılmaktadır. 1999 Gölcük, Düzce ve 2020 Elazığ (Sivrice) depremleriyle karşılaştırıldığında, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında gözlemlenen sivilaşma yapıları hem yaygınlık hem de etkileri açısından daha çarpıcıdır. 1999 depremlerinde İzmit körfezi kıyılarında, Adapazarı ve Sapanca çevrelerinde lokal olarak gelişen sivilaşma ve yanal yayılmalar ciddi yapı hasarlarına neden olmuştur (Cetin vd., 2002; Mollamahmutoğlu vd., 2003; Kanıbir vd., 2006). Elazığ depreminde ise yüzey kırığı olmamasına rağmen Pütürge çevresinde geniş çatlaklar ve yer değişimleri rapor edilmiştir (Köküm, 2022). Kahramanmaraş depremlerinde, özellikle Asi Nehri vadisinde gelişen yanal yayılmalar ise çok daha geniş bir alanda kesintisiz olarak deformasyonlara yol açmıştır. Bu durum, Kahramanmaraş depremlerinde sivilaşma etkisinin önceki büyük depremlere kıyasla daha yaygın ve yıkıcı olduğunu göstermektedir. Bu durumun oluşmasında çok sayıda fay segmentinin kırılması ve geniş alüvyal sahaların varlığı etkili olmuş olabilir. Öte yandan Gölcük depremi sırasında İzmit Körfezi güney kıyılarında meydana gelen yanal yayılmalar, Kahramanmaraş depremlerinde Gölbaşı Gölü ile Asi Nehri kıyılarında meydana gelen yanal yayılmalarla benzerlik göstermektedir.

5. Sonuç

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, Türkiye'deki en büyük ve yıkıcı depremler arasında yer almakta olup, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerindeki sismotektonik süreçleri anlamak açısından önemli veriler sunmuştur. İlk gerçekleşen Pazarcık Depreminde Erkenek, Pazarcık ve Amanos segmentleri tamamen kırılmış, Tut Fayı'nın batı ve Narlı Fayı'nın kuzey bölümü kısmen kırılmıştır. Bu bölümde depremden etkilenen 350 km'lik segmentte 217 km'yi aşan yüzey kırığı haritalanmıştır. İkinci büyük depremden Çardak Fayı tamamen kırılmış, Doğanşehir Fayı büyük oranda kırılmış ve Sürgü Fayı'nın batı ucu kırılmıştır. Bu zonda depremden etkilenen 160 km'lik segment boyunca 125 km yüzey kırığı haritalanmıştır.

Her iki deprem çok geniş bir alanda etkili olmuş, yüzey kırıkları, sivilaşma, yanal yayılma, heyelan ve kaya düşmeleri gibi çeşitli yüzey deformasyonları meydana gelmiştir. DAFZ'in farklı segmentleri boyunca değişen yırtılma dinamikleri, yüksek zemin ivmeleriyle birlikte yapı hasarlarını artırmış ve yüzey deformasyonlarının dağılımını doğrudan etkilemiştir. Transform fay geometrisinin, geçtiği zemin türleri ve topoğrafyaya bağlı olarak farklı morfolojik tepkiler verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle Asi Nehri kıyıları, Gölbaşı Gölü çevresi ve İskenderun sahil kesiminde meydana gelen sivilaşmalar, altyapı ve yerleşim alanlarında ciddi hasarlara neden olmuştur. Asi Nehri boyunca gelişen yanal yayılmalar, akarsu bankalarını tahrip ederek, nehir morfolojisini değiştirmiş ve bölgeyi gelecekteki taşkın risklerine karşı daha kırılgan hale getirmiştir. DAFZ'a yakın eğimli alanlarda meydana gelen kütle hareketleri ise ulaşım ve enerji altyapısını doğrudan etkilemiştir. Geniş bir bölgenin güçlü sismik aktivite nedeniyle sarsılması topoğrafya yüzeyinin bütünlüğünü bozarak erozyona duyarlı hale getirmiştir.

Bu çalışma, yalnızca mevcut yüzey deformasyonlarını belgelemekle kalmamakta, aynı zamanda bu deformasyonların gelecekteki deprem riski modellemeleri ve mühendislik uygulamaları açısından da temel oluşturacak veriler sağlamaktadır. Eğimli yamaçlardaki kütle hareketleri ile alüvyal zeminlerde yaygın görülen sivilaşma ve yanal yayılma gibi ikincil afet mekanizmaları, kentsel planlama açısından da dikkate alınmalıdır. Bu oluşumlar yapı stoku ve altyapı üzerindeki etkileri; zemin türü, topoğrafik eğim ve yeraltı suyu seviyesinin bir arada değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda sivilaşma riski yüksek alanlarda yapılaşma düzenlemeleri ve zemin iyileştirme uygulamaları öncelikli olarak ele alınmalıdır. Geniş alanlarda tespit edilen yıkıcı deformasyon örüntüleri, afet yönetimi planlamalarında yerel mikro-bölgeleme çalışmaları ve risk haritalarının güncellenmesinin gerekliliğini göstermektedir. Ayrıca, yüzey deformasyonlarının uzun vadeli izlenmesi büyük önem taşımaktadır. GNSS tabanlı deformasyon ağları, radar interferometri (InSAR) analizleri ve tekrarlı UAV ölçümleri gibi yöntemlerin entegrasyonu, bölgedeki yüzey hareketlerinin sürekli olarak izlenmesine olanak sağlayabilir. Bu tür entegre izleme sistemleri, özellikle kütle hareketleri ve sivilaşma potansiyelinin yüksek olduğu alanlarda erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sunacaktır.

Sonuç olarak, 6 Şubat depremleri sırasında oluşan farklı kırılma dinamikleri ve yüzey deformasyonları, bölgenin jeodinamik süreçlerini etkileyerek Türkiye'nin aktif tektoniği ve jeomorfolojik evrimi üzerinde kalıcı etkiler bırakmıştır. Gelecek araştırmalar, bu tür çok segmentli kırılmaların yarattığı karmaşık yüzey deformasyonlarının daha iyi anlayabilmek için hem yüksek çözünürlüklü jeodezik ve sismolojik verilere odaklanmalı hem de disiplinler arası analizlere dayalı olarak yürütülmelidir. Böylelikle, yalnızca bilimsel bilgi birikimi artırılmakla kalmayacak, aynı zamanda afet risklerinin azaltılmasına yönelik daha etkin planlama ve müdahale stratejileri geliştirilebilecektir.

Çıkar Çatışması/Conflict of Interest: Yazar herhangi bir çıkar çatışması yaşamadıklarını beyan ederler./The author declare that they have no conflicting interest.

Etik Kurulu Onayı/ Ethics Committee Approval: Bu çalışma için Etik Kurul Onay Belgesi gerekmemektedir. /Ethics Committee Approval is not required for this study.

Katkı Belirtme ve Teşekkür/Acknowledgements: Bu çalışma 123D019 numaralı TÜBİTAK “1002-C Doğal Afetler Odaklı Saha Çalışması Acil Destek Programı” kapsamında desteklenmiştir. Makalenin değerlendirme aşamasında katkı sunan editörlere ve hakemlere teşekkür ederim. /This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant Number 123D019. I am grateful to the editors and reviewers for their valuable contributions during the peer-review process of this manuscript.

Kaynakça

- Abdelmeguid, M., Zhao, C., Yalcinkaya, E., Gazetas, G., Elbanna, A., & Rosakis, A. (2023). Dynamics of episodic supershear in the 2023 M7.8 Kahramanmaraş/Pazarcık earthquake, revealed by near-field records and computational modeling. *Communications Earth & Environment*, 4, 456. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01131-7>
- AFAD - Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2023). 06 şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw: 7.7 – Mw: 7.6) depremleri raporu.
- Aksoy, E., İncegöz, M., & Koçyiğit, A. (2007). Lake Hazar Basin: A negative flower structure on the East Anatolian Fault System (EAFS), SE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 319–338.
- Aktuğ, B., Özener, H., Doğru, A., Sabuncu, A., Turgut, B., Halıcıoğlu, K., Yılmaz, O., & Havazlı, E. (2016). Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field. *Journal of Geodynamics*, 94–95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001>
- Ambraseys, N. (2009). Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A multidisciplinary study of seismicity up to 1900. Cambridge University Press.
- Ambraseys, N. N. (1989). Temporary seismic quiescence: SE Türkiye. *Geophysical Journal International*, 96, 311–331.
- Arpat, E., & Saroglu, F. (1975). Some recent tectonic events in Turkey. *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 18, 91–101.
- Arpat, E., & Şaroğlu, F. (1972). Doğu Anadolu fayı ile ilgili bazı gözlemler ve düşünceler. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 78, 44–50.
- Balkaya, M., Özden, S., & Akyüz, H. S. (2021). Morphometric and morphotectonic characteristics of Sürgü and Çardak faults (East Anatolian Fault Zone). *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(3), 375–392. <https://doi.org/10.28979/jarnas.939075>
- Barka, A. A., & Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics*, 7(3), 663–684.
- Bayrakdar, C., Halis, O., Canpolat, E., Döker, M.F., & Keserci, F. (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Ekinözü depremi (Mw 7.6) ile ilişkili Çardak Fayı yüzey kırığının tektonik jeomorfolojisi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 83, 7-22. <https://doi.org/10.17211/tcd.1281680>
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. (2024). Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. <http://www.koeri.boun.edu.tr/>
- Bulut, F., Bohnhoff, M., Eken, T., Janssen, C., Kılıç, T., & Dresen, G. (2012). The East Anatolian Fault Zone: Seismotectonic setting and spatiotemporal characteristics of seismicity based on precise earthquake locations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(7), B07304. <https://doi.org/10.1029/2011JB008966>
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology* (2nd ed.). Blackwell Science.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., & Tokimatsu, K. (2002). SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(2), 131–145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:2(131))
- Cubas, N., Agard, P., & Tissandier, R. (2022). Earthquake ruptures and topography of the Chilean margin controlled by plate interface deformation. *Solid Earth*, 13, 779–792. <https://doi.org/10.5194/se-13-779-2022>
- Dewey, J. F., Hempton, M. R., Kidd, W. S. F., Şaroğlu, F., & Şengör, A. M. C. (1986). Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of eastern Anatolia: A young collision zone. In M. P. Coward & A. C. Ries (Eds.), *Collision tectonics* (Geological Society of London Special Publication 19, pp. 3–36). Geological Society of London.
- Ding, H., Zhou, Y., Ge, Z., Taymaz, T., Ghosh, A., Xu, H., Irmak, T. S., & Song, X. (2023). High-resolution seismicity imaging and early aftershock migration of the 2023 Kahramanmaraş (SE Türkiye) Mw7.9 & 7.8 earthquake doublet. *Earthquake Science*, 36(6), 417–432. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2023.06.002>
- Duman, T. Y., & Emre, Ö. (2013). The East Anatolian Fault: Geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications*, 372, 495–529.
- Görüm, T., Tanyas, H., Karabacak, F., Yılmaz, A., Girgin, S., Allstadt, K. E., Süzen, M. L., & Burgi, P. (2023). Preliminary documentation of coseismic ground failure triggered by the February 6, 2023 Türkiye earthquake sequence. *Engineering Geology*, 327, 107315. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2023.107315>
- Groos, A. R., Bertschinger, T. J., Kummer, C. M., Erlwein, S., Munz, L., & Philipp, A. (2019). The potential of low-cost UAVs and open-source photogrammetry software for high-resolution monitoring of alpine glaciers: A case study from the Kanderfirn (Swiss Alps). *Geosciences*, 9(8), 356. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080356>
- Guidoboni, E., Comastri, A., & Traina, G. (1994). *Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean area up to the 10th century*. Istituto Nazionale di Geofisica.
- Hempton, M. R. (1985). Structure and deformation history of the Bitlis suture near Lake Hazar, southeastern Turkey. *Geological Society of America Bulletin*, 96, 233–243.
- Hendrickx, H., Vivero, S., De Cock, L., De Wit, B., De Maeyer, P., Lambiel, C., Delaloye, R., Nyssen, J., & Frankl, A. (2019). The reproducibility of SfM algorithms to produce detailed Digital Surface Models: The example of PhotoScan applied to a high-alpine rock glacier. *Remote Sensing Letters*, 10(1), 11–20. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1519641>
- Herece, E. (2008). *Doğu Anadolu Fayı (DAF) atlası* (Serial No. 13). General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publications.
- İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2023). *6 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık ve Elbistan) depremleri saha çalışmaları ön değerlendirme raporu*.
- Jouvet, G., Weidmann, Y., van Dongen, E., Lüthi, M. P., Vieli, A., & Ryan, J. C. (2019). High-endurance UAV for monitoring calving glaciers: Application to the Inglefield Bredning and

- Eqip Sermia, Greenland. *Frontiers in Earth Science*, 7, 206. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00206>
- Kanıbir, H., Tönük, G., & Gülerce, Z. (2006). Assessment of liquefaction and lateral spreading based on field investigations in Adapazarı (Turkey) after 17 August 1999 earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 1013–1024. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-1013-2006>
- Kasprzak, M., Jancewicz, K., & Michniewicz, A. (2018). UAV and SfM in detailed geomorphological mapping of granite tors: An example of Starościeńskie Skały (Sudetes, SW Poland). *Pure and Applied Geophysics*, 175, 3193–3207. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1769-0>
- Kaufmann, V., Kellerer-Pirklbauer, A., & Seier, G. (2021). Conventional and UAV-based aerial surveys for long-term monitoring (1954–2020) of a highly active rock glacier in Austria. *Frontiers in Remote Sensing*, 2, 732744. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.732744>
- Köküm, M. (2022). Sivrice (Elazığ) Earthquake (Mw:6.8) on January 24, 2020 and the evaluation of earthquake-induced liquefaction phenomena. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 166, 49–67. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1131666>
- Lee, S.-J., Liu, T.-Y., & Lin, T.-C. (2024). Abnormal apparent supershear rupture with discontinuous jumping propagation during the 2023 Türkiye M7.8 earthquake. *Communications Earth & Environment*, 5, 331. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01481-w>
- Lei, J., Ren, Z., Oguchi, T., Zhang, P., & Uchiyama, S. (2021). Topographic evolution involving co-seismic landslide, deformation, long-term folding and isostatic rebound: A case study on the 2004 Chuetsu earthquake. *Remote Sensing*, 13(1073). <https://doi.org/10.3390/rs13061073>
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2021). Yerbilimleri Harita Görüntüleyici. <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/ana-sayfa.aspx>
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5, 6880–6898. <https://doi.org/10.3390/rs5126880>
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., ... & Veis, G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B3), 5695–5719.
- McKenzie, D. P. (1976). The East Anatolian fault; A major structure in eastern Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 29, 189–193.
- Melgar, D., Taymaz, T., Ganas, A., Crowell, B. W., Öcalan, T., Kahraman, M., ... Altuntaş, C. (2023). Sub- and super-shear ruptures during the 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6 earthquake doublet in SE Türkiye. *Seismica*, 2(3). <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.387>
- Mollamahmutoğlu, M., Yılmaz, Y., & Güler, E. (2003). Liquefaction-related ground deformations in Adapazarı during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 62, 87–95. <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0163-2>
- Nalbant, S. S., McCloskey, J., Steacy, S., & Barka, A. A. (2002). Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(3–4), 291–298. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00592-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00592-1)
- Perinçek, D., & Çemen, İ. (1990). The structural relationship between the East Anatolian and Dead Sea fault zones in southeastern Turkey. *Tectonophysics*, 172, 331–340.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Çakmak, 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, 1–26.
- Ren, C., Wang, Z., Taymaz, T., Hu, N., Luo, H., Zhao, Z., ... & Ding, H. (2024). Supershear triggering and cascading fault ruptures of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake doublet. *Science*, 383(6680). <https://doi.org/10.1126/science.adi1519>
- Ren, Z., Zhang, Z., Dai, F., Yin, J., & Zhang, H. (2014). Topographic changes due to the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake as revealed by the differential DEM method. *Geomorphology*, 217, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.020>
- Seymen, I., & Aydın, A. (1972). The Bingöl earthquake fault and its relation to the North Anatolian fault zone. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute*, 79, 1–8.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., & Kuşçu, İ. (1992). Active fault map of Turkey. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey, 2.
- Şengör, A. M. C., et al. (1985). Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In K. T. Biddle & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation* (Special Publication of the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists 37, pp. 227–264).
- Taftoglou, M., Valkaniotis, S., Papathanassiou, G., & Karantanellis, E. (2023). Satellite imagery for rapid detection of liquefaction surface manifestations: The case study of Türkiye–Syria 2023 earthquakes. *Remote Sensing*, 15(4190). <https://doi.org/10.3390/rs15174190>
- Taymaz, T., Eyidoğan, H., & Jackson, J. (1991). Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey). *Geophysical Journal International*, 106, 537–550.
- Taymaz, T., Yolsal-Çevikbilen, S., Karasözen, E., & Erman, C. (2021). Source mechanism and rupture process of the 24 January 2020 Mw 6.7 Doğanlı–Sivrice earthquake and seismotectonics of the East Anatolian Fault Zone (EAFZ), Turkey. *Tectonophysics*, 811, 228856. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228856>
- Toker, M., Yavuz, E., Utkucu, M., & Uzunca, F. (2023). Multiple segmentation and seismogenic evolution of the 6th February 2023 (Mw 7.8 and 7.7) consecutive earthquake ruptures and aftershock deformation in the Maras triple junction region of SE-Anatolia, Turkey. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 345, 107114. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.107114>
- Trifonov, V., Çelik, H., Simakova, A., Bachmanov, D., Frolov, P., Trikhunkov, Y., ... Sychevskaya, E. (2018). Pliocene–Early Pleistocene history of the Euphrates valley applied to Late Cenozoic environment of the northern Arabian Plate and its surrounding, eastern Turkey. *Quaternary International*, 493, 137–165.
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler Hill. *Measurement*, 73, 539–543.

- <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>
- Westaway, R. (1994). Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research*, 99, 12071–12090. <https://doi.org/10.1029/94JB00335>
- Westaway, R., Arger, J. (1996). The Gölbaşı basin, southeastern Turkey: A complex discontinuity in a major strike-slip fault zone. *Journal of Geological Society*, 153, 729-743.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Xi, X., Li, C., Li, T., Wei, Z., Ma, Z., Zhang, G., Qu, C., He, H., & Shan, X. (2025). Fault geometry and rupture speed as controls on off-fault deformation in the 2023 Turkey–Syria earthquakes. *Communications Earth & Environment*, 6, 103. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02089-4>
- Yönlü, Ö., Altunel, E., & Karabacak, V. (2017). Geological and geomorphological evidence for the southwestern extension of the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, 469, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.03.034>
- Zhou, J., Xu, Y., Zhang, Y., Feng, W., Taymaz, T., Chen, Y.-T., & Huang, Q. (2025). Geometric barriers impacted rupture processes and stress releases of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake doublet. *Communications Earth & Environment*, 6, 56. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02004-x>