



## 26 Eylül 2019 (M5.8) ve 23 Nisan 2025 (M6.2) depremleri sonrasında Ana Marmara Fayı'nın sismik tehlikesinin yeniden değerlendirilmesi

### *Reassessment of the seismic hazard of the Main Marmara Fault following the 26 September 2019 (M5.8) and 23 April 2025 (M6.2) earthquakes*

EŞREF YALÇINKAYA <sup>1</sup>, MURAT UTKUCU <sup>2</sup>, ETHEM GÖRGÜN <sup>1</sup>, HANDE AYKURT VARDAR <sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Geliş (*received*): 16 Ekim (*October*) 2025 Kabul (*accepted*): 25 Şubat (*February*) 2026

#### ÖZ

Orta Marmara'da gerçekleşen orta büyüklükteki iki deprem (26 Eylül 2019, M5.8 ve 23 Nisan 2025, M6.2), dünyada iyi bilinen sismik boşluklardan biri olan Marmara Denizi'nde sismik tehlikenin yeniden değerlendirilmesine yol açmıştır. Bu çalışmada 2025 depremi sonrası bilim insanları arasında çokça gündeme gelen beş tartışma maddesi çerçevesinde uzman görüşlerine dayalı bir değerlendirme yapılmıştır. Her iki depremin de Marmara Denizi'ndeki genel deprem tehlikesini değiştirecek ölçüde olmadığı düşünülmekle birlikte, gelecekte kırılması beklenen komşu fay segmentleri üzerinde oluşturdukları gerilme değişimlerinin göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmıştır. Ana Marmara Fayı (AMF) gerilme birikimi, deprensellik örüntüleri, gerilme eksen yönelimleri, odak mekanizmasındaki değişimler, fay geometrisi, kabuksal sismik hız yapısı gibi çeşitli faktörlerden etkilenen parçalı bir yapı sergilemekteyken, tarihsel büyük depremler yeterli gerilme birikimine sahip parçalı fay sistemlerinin M7 ve üzeri büyüklükte deprem üretebilme potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir. Artan sayılardaki kara ve deniz tabanı gözlem istasyonları, üç boyutlu kabuk hız yapısı araştırmaları ve makine öğrenmesine dayalı deprem algılama eşik değerlerinin düşürülmesi, Marmara Denizi'ndeki veri kapasitesinin artırılması açısından kritik bir katkı sağladığı değerlendirilmiştir. Deprenselliğin izlenmesi, depremler arası gerilme etkileşimlerinin anlaşılması ve açığa çıkan sismik enerjinin nicel olarak takibi, güncel deprem tehlikesinin değerlendirilmesi açısından son derece kritik öneme sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Deprensellik, İstanbul, Marmara, Sismik Boşluk, Sismik Tehlike

#### ABSTRACT

*Two moderate-size earthquakes that occurred in the Central Marmara region (26 September 2019, M5.8 and 23 April 2025, M6.2) have led to a renewed assessment of the seismic hazard in the Sea of Marmara, one of the well-known seismic gaps in the world. In this study, an expert-based assessment is presented within the framework of five key discussion topics that emerged among scientists following the 2025 earthquake. Although both earthquakes are considered unlikely to have significantly altered the overall seismic hazard in*

*the Sea of Marmara, it is emphasized that the stress changes they produced on neighboring fault segments expected to rupture in the future should not be neglected. The Main Marmara Fault (MMF) exhibits a segmented and heterogeneous structure controlled by various factors, including stress accumulation, seismicity patterns, orientations of the stress axes, variations in focal mechanisms, fault geometry, and the crustal seismic velocity structure; nevertheless, historical large earthquakes demonstrate that segmented fault systems with sufficient accumulated strain are capable of generating earthquakes of M7 and larger. The increasing number of onshore and seafloor seismic stations, advances in three-dimensional crustal velocity structure studies, and the application of machine-learning-based earthquake detection methods that lower detection thresholds are considered to provide a critical contribution to improving the observational data capacity in the Sea of Marmara. Continuous monitoring of seismicity, improved understanding of stress interactions among earthquakes, and quantitative tracking of released seismic energy are of critical importance for the assessment of the current seismic hazard.*

**Keywords:** Seismicity, Istanbul, Marmara, Seismic Gap, Seismic Hazard

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1804662>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: eyalcin@iuc.edu.tr

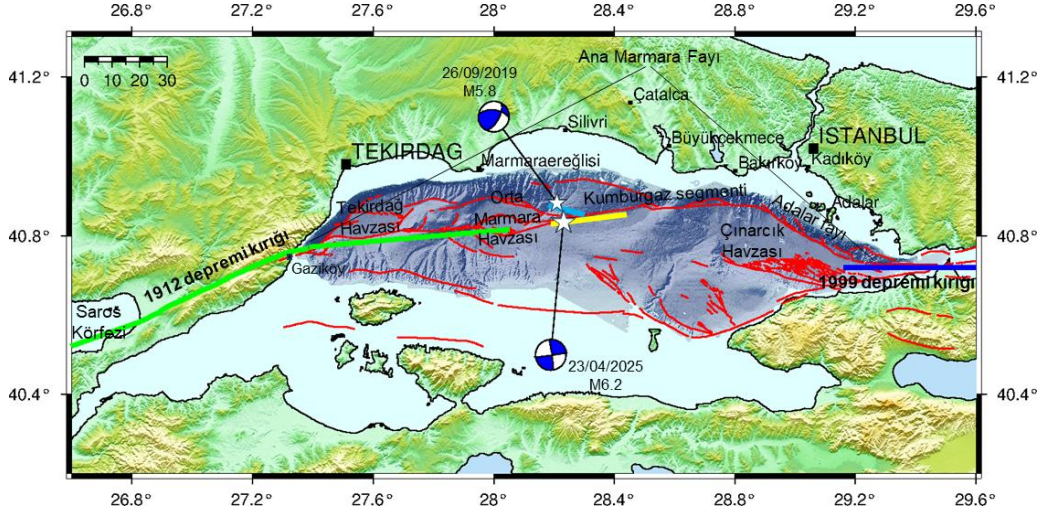
## GİRİŞ

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Anadolu levhasının Avrasya levhasına göre batıya doğru hareketini denetleyen, Karlıova'dan başlayarak Marmara Denizi'ne ve Kuzey Ege'ye kadar uzanan, yüksek sismik etkinliğe sahip bir fay zonudur. KAFZ'nin doğu ve orta kesimleri, tek ve belirgin bir fay izi boyunca gelişen, baskın olarak doğrultu atımlı hareketin gözlemlendiği görece basit bir yapıya sahiptir (Barka, 1996). Batı kesiminde ise fay zonu, kuzey ve güney kollarına ayrılmakta olup, kuzey kol İzmit Körfezi'ni izleyerek İstanbul'un güneydoğusunda Marmara Denizi'ne girmektedir (Şekil 1). Bu hat, Marmara Denizi boyunca uzandıktan sonra Ganos Fayı ile birleşerek Saros Körfezi üzerinden Ege Denizi'ne uzanmaktadır (Le Pichon ve diğ. 2001, Armijo ve diğ. 2005).

KAFZ boyunca meydana gelen büyük depremler, 1939 Erzincan (M7.9), 1999 İzmit (M7.4) ve 1999 Düzce (M7.2) örneklerinde görüldüğü üzere, M7 ve üzeri büyüklüklere

ulaşabilen ve tarihsel süreçte doğudan batıya doğru göç eden kırılma dizileri ile karakterizedir. Bu özellik, Ana Marmara Fayı (AMF) için yüksek sismik tehlikenin temel nedenlerinden birini oluşturmaktadır.

1912 Mürefte-Şarköy ve 1999 İzmit depremleri sonrasında KAFZ'nin kuzey kolu üzerinde kırılmadan kalan AMF'nin, M7+ büyüklüğünde deprem üretebilme potansiyeli nedeniyle dünyanın önde gelen sismik boşluklarından biri olarak bilinmektedir (Hubert-Ferrari ve diğ. 2000, Parsons 2004, Bohnhoff ve diğ. 2013, Ergintav ve diğ. 2014, Karabulut ve diğ. 2021, Öztürk ve diğ. 2025). Bu fay üzerinde meydana gelen irili ufaklı tüm depremler büyük dikkat çekmekte ve beklenen büyük depremin zamanlamasına ilişkin tartışmaları yeniden gündeme getirmektedir. Bunun en son örnekleri 26 Eylül 2019 tarihli M5.8 Silivri ve 23 Nisan 2025 tarihli M6.2 Silivri Açıkları depremleridir. Her iki deprem sınırlı düzeyde hasara yol açmalarına karşın, toplumda geniş yankı uyandırmıştır.



**Şekil 1.** Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun Marmara Denizi içindeki uzanımı ve ana yapısal unsurlar. 2019 yılı M5.8 ve 2025 yılı M6.2 depremlerinin yerleri, kırık alanları (açık mavi ve sarı kalın çizgiler) ve mekanizma çözümleri şekil üzerinde gösterilmiştir. 1912 yılı Mürefte-Şarköy ve 1999 yılı İzmit depremleri kırıkları şekil üzerinde işaretlenmiştir. Fay haritası Armijo ve diğ. (2005)'ten alınmıştır.

**Figure 1.** The extension of the North Anatolian Fault Zone within the Sea of Marmara and its main structural elements. The locations, rupture lengths and mechanism solutions of the 2019 M5.8 and 2025 M6.2 earthquakes are shown in the figure. The ruptures from the 1912 Mürefte-Şarköy and 1999 İzmit earthquakes are marked on the figure. The fault map is taken from Armijo et al. (2005).

Bu çalışma, 23 Nisan 2025 tarihli M6.2 Silivri Açıkları depremi sonrası bilim insanları arasında gündeme gelen bazı tartışma başlıklarının 5 ana madde altında toplanması ve geniş katımlı bir fikir geliştirme (beyin fırtınası) süreci sonucunda oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı, yaşanan son depremler ışığında durum değerlendirmesi yapmak ve geleceğe yönelik araştırma alanları ve iş birliklerinin önünü açabilmektir. Bu kapsamda, konunun uzmanı yaklaşık 20 araştırmacıdan 5 başlık altında görüş alınmış ve bu görüşler ışığında AMF'nin güncel sismik tehlikesi değerlendirilmeye çalışılmıştır. Çalışmaya görüşleriyle katkı sunan tüm araştırmacıların isimleri Teşekkür bölümünde verilmiştir.

Çalışmanın devamında, her bir tartışma başlığı ayrı alt bölümler halinde ele alınacaktır.

## ÇALIŞMA MADDELERİ ve DEĞERLENDİRMELER

**Madde 1:** Orta Marmara'da oluşan M6.2 büyüklüğündeki deprem, Ana Marmara Fayı'nın (AMF) doğu kesimiyle batı kesimi arasındaki bağlantıyı kopararak fayın tek parça halinde kırılma olasılığını ortadan kaldırmış mıdır? Bu durum genel olarak Marmara Denizi'ndeki sismik tehlikenin azaldığı şeklinde yorumlanabilir mi?

"Tek parça kırılma" ifadesi genel olarak, 1999 İzmit depremi kırığının Çınarcık Havzası'na ulaşan batı ucundan başlayarak Tekirdağ Havzası'nın batı kenarına kadar uzanan, KAFZ'nun kuzey kolunun Marmara Denizi altındaki yaklaşık 160 km'lik kısmının kırılması senaryosunu ifade etmek için kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu kısım aynı zamanda, Ana Marmara Fayı (AMF) olarak da adlandırılır (Le Pichon ve diğ. 2001, Armijo ve diğ. 2005).

Ayrıntılı depremsellik dağılımı ve 3B sismik hız yapısından, AMF'nin ayırt edilebilir iki segmentten oluştuğu ve bu segmentler arasındaki sınırın Orta Marmara Havzası'ndan (28,10° doğu boylamı civarında) geçtiği ileri sürülmektedir (Şekil 1) (Yamamoto ve diğ. 2017; 2020). Deprem kaynak mekanizması çözümlerinden belirlenen gerilme eksen yönlerinin Doğu ve Batı Marmara için farklılık göstermesi (Pınar ve diğ. 2003, Wollin ve diğ. 2019) ile Marmara Denizi için hesaplanan düşük b-değerleri (Utkucu ve diğ. 2011) de bu yorumu desteklemektedir. Yamamoto ve diğ. (2020), AMF'nin batı segmentinin yaklaşık düşey, doğudaki segmentinin ise güneye eğimli olduğunu belirlemiştir. Bu bulgular, AMF'nin Orta Marmara Havzası kesiminde (28,10° doğu boylamı civarında) fay geometrisi açısından belirgin bir süreksizliğin bulunduğu işaret etmektedir.

Orta Marmara Havzası'nı oluşturan fay segmentleri arasındaki basamak genişliğinin yaklaşık 5 km olduğu, 3-4 km ve üzerindeki fay basamaklarının deprem kırılmalarını durdurabildiği (Wesneousky 2006), ayrıca AMF boyunca normal gerilmelerin çokça değişken olması (Hergert ve Heibach 2011) ve tarihsel deprem verileri (Ambraseys 2002) birlikte değerlendirildiğinde, AMF boyunca "tek parça kırılma" senaryosunun geçerliliği daha da zayıflamaktadır.

Bu bağlamda, AMF batı segmentinin, doğu segmenti üzerinde başlayacak bir kırılmanın devamında birlikte kırılma olasılığının düşük olduğu ve bu durumun esas olarak Orta Marmara Havzası civarındaki yapısal süreksizlikle ilişkili bulunduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, 23 Nisan 2025 tarihli M6.2 depreminin Kumburgaz segmentinin batı ucunda meydana gelmiş olması, doğu ve batı segmentleri arasındaki bu yapısal ayrımı ortadan kaldıran bir etki yaratmamaktadır. Bu nedenle, söz konusu

deprem temelinde Marmara Denizi'ndeki sismik tehlikenin bu bağlamda azaldığını söylemek mümkün değildir. Bununla birlikte, M6.2 büyüklüğündeki depremin Kumburgaz segmenti üzerinde birikmiş deformasyonun sınırlı bir bölümünü serbestleştirmiş olması nedeniyle, yerel ölçekte sismik tehlikeyi kısmen azaltmış olabileceği değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, AMF'nin batı segmenti boyunca son yıllarda yapılan gözlemler, sismik tehlike açısından dikkate alınması gereken bazı yeni belirsizlikler ortaya koymaktadır. Bunlardan ilki; 1912 depremi kırığının deniz içinde kalan kesiminde sünme deformasyonları görülüyorsa (Yamamoto ve diğ. 2019, Becker ve diğ. 2023), aslında kırığın bu kesiminin 1912 depreminden bu yana bütüncül bir kilitlenme geliştirmemiş olabileceği ve yerel ölçekte sünme davranışının günümüzde de devam edebileceği olasılığını gündeme getirmektedir. Ancak bu aşamada bu yorum, mevcut verilerle doğrulanmış bir sonuç değil, bir hipotez niteliğindedir. Gözlenen sünmenin sürekli (steady), dönemsel (episodic) ya da geçici (transient) karakterde olup olmadığı, kalın çökeller altında sismojenik zon derinliklerine kadar devam edip etmediği ve 1912 depreminden bu yana zamansal olarak değişim gösterip göstermediği konularında yeterli gözlemsel kanıt bulunmamaktadır. Başka bir deyişle, batı segmenti üzerinde günümüzde gözlenen deformasyonların bir bölümü halen 1912 depreminin artçı deformasyon süreçleriyle ilişkili olabilir.

Öte yandan, bir fay segmenti üzerinde sünme davranışının gözlenmesi, bu segment boyunca gerilme birikiminin tamamen ortadan kalktığı anlamına gelmemektedir. Nitekim Orta Marmara Havzası içerisinde yalnızca 10 km'lik dar bir zon boyunca sünmeye ilişkin kanıtlarının bulunmuş olması (Schmittbuhl ve diğ. 2016), tüm segmentin sünme davranışı sergilediği şeklinde yorumlanamaz. Yamamoto

ve diğ. (2019), gözlenen toplam deformasyonun yaklaşık yarısının (10 mm/yıl) kalınlığı 8 km'ye ulaşan çökeller içerisinde sünme yoluyla serbestlendiğini, geri kalan bölümünün ise birikmeye devam ettiğini ifade etmişlerdir. Ancak söz konusu değerlendirme, görece kısa süreli gözlemlere dayanmaktadır. Yamamoto ve diğ. (2020) bu durumu, sismojenik zonun çökeller içerisinde de devam ettiği şeklinde yorumlamışlardır. Dolayısıyla fay yüzeyi boyunca bazı alanların kısmi sünme sergilerken, bazı alanların tamamen kilitli kalması olasıdır. Benzer bir davranış, Kaliforniya'da Hayward Fayı üzerinde de gözlenmiştir (Schmidt ve diğ. 2005). Ayrıca, büyük depremler sonrasında kırılan fayın bazı kesimlerinde, genliği zamanla azalan post-sismik sünme deformasyonlarının gelişebildiği bilinmektedir. Bu duruma, 1944 Bolu–Gerde depremi sonrasında İsmetpaşa'da gözlenen ve genliği zamana bağlı olarak üstel biçimde azalarak 5 cm/yıl mertebesinde 2000'li yıllarda 1 cm/yılın altına düşen sünme hızları örnek verilebilir (Çakır ve diğ., 2005).

AMF'nin batı kesiminin 1912 yılında kırılmış olması, sismik tehlike açısından değerlendirilmesi gereken bir başka önemli soruyu daha gündeme getirmektedir. Bu segmentin, daha önce 1766 yılında meydana gelen Marmara depremlerinden biri sırasında kırılmış olduğu yönünde literatürde yaygın bir görüş bulunmaktadır (Rockwell ve diğ. 2001, Meghraoui ve diğ. 2012, Armijo ve diğ. 2005). 1766 yılında Marmara Denizi'nde meydana gelen iki ayrı depremden biri çoğunlukla Ganos segmenti ile ilişkilendirilmektedir (Meghraoui ve diğ. 2012). Eğer Ganos segmenti daha önce 1766 yılında kırılmış ise, 1912 depremi ile arasındaki süre yalnızca 146 yıl olmaktadır. Bu süre, Ganos segmenti için önerilen ortalama yaklaşık 323 yıllık tekrarlanma aralığına (Meghraoui ve diğ., 2012) ve Marmara Denizi geneli için önerilen yaklaşık 250 yıllık ortalama

deprem döngüsüne (Utkucu ve diğ., 2009; Bohnhoff ve diğ., 2013) kıyasla oldukça kısadır.

Bununla birlikte, aynı fay segmenti üzerinde deprem tekrarlanma aralıklarının önemli ölçüde değişiklikler gösterebileceği, San Andreas Fayı'nın Parkfield segmentindeki gözlemlerle açık biçimde ortaya konmuştur (Bakun ve Lindh 1985). Parkfield segmenti üzerinde aynı fay kesimi 1857, 1881, 1901, 1922, 1934, 1966 ve 2004 yıllarında yaklaşık M6 büyüklüğündeki depremlerle kırılmış ve tekrarlanma aralıklarının 12 ile 38 yıl arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değişimin, kısmen yakın civarda meydana gelen depremlerin oluşturduğu gerilme transferleriyle ilişkili olduğu gösterilmiştir (Toda ve Stein 2002).

1912 depreminin büyüklüğü M7.4 olup, karadaki parçası üzerinde ölçülen maksimum yer değiştirmeler 5,5 m civarındadır (Aksoy ve diğ. 2010). Ayrıca Armijo ve diğ. (2005) Marmara Denizi içerisindeki kesimde 1912 depremi ile ilişkilendirdikleri 3-6 m arasında değişen sağ yanal yer değiştirmeler belirlemiştir. 1766 depremi için de benzer bir büyüklük ve yer değiştirme değerlerinin önerilmiş olması (Armijo ve diğ. 2005, Rockwell ve diğ. 2001, Meghraoui ve diğ. 2012), iki büyük depremin yalnızca 146 yıl arayla aynı segment üzerinde bu ölçekte kaymalar üretmiş olabileceği ihtimalini dikkatle değerlendirmeyi gerektirmektedir.

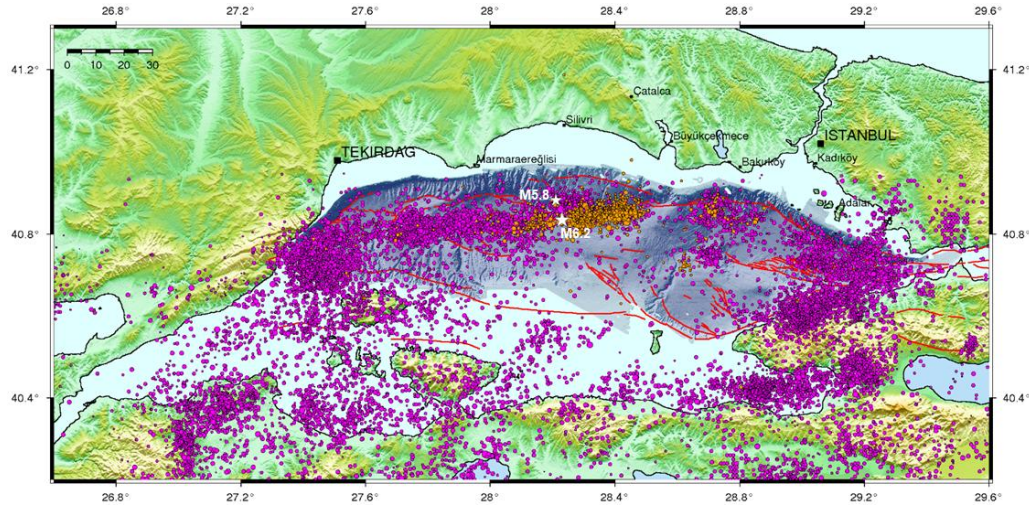
Ganos segmentiyle ilgili sismolojik açıdan değerlendirilmesi gereken bir diğer önemli husus, 1912 kırığının Marmara Denizi içerisindeki kesimiyle karadaki parçası arasında görülen belirgin deprensellik ve kayma birikimi farklılıklarıdır (Şekil 1 ve Şekil 2). 1912 depremi kırığının karadaki ve Saros Körfezi içindeki parçası büyük ölçüde kilitli (Ergintav ve diğ. 2014) ve asismik davranış gösterirken, Marmara Denizi içindeki parçası görece yüksek deprensellik (Karabulut ve diğ. 2006, Yalçınkaya ve diğ. 2023) ve sünme

işaretleri gösterir (Yamamoto ve diğ. 2019, Becker ve diğ. 2023).

1912 kırığınının kara ve deniz kesimleri arasındaki bu davranış farklarının, yapısal ve litolojik farklılıklarla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Fayın Marmara Denizi'nden karaya çıktığı Gaziköy kesiminde (Şekil 1), kuzey bloğunu, güney bloğa göre nispeten daha yaşlı Ganos dağları oluşturur (Tüysüz ve diğ. 1998). Fay bu kesimde, yüksek sismik hızlı kuzey blok ile düşük sismik hızlı güney blok arasında bimateriyal (iki malzemeli) bir ara yüzey oluşturur (Görgün ve diğ. 2025, Yalçinkaya ve diğ. 2023). Buna karşılık, Marmara Denizi içerisindeki kesimde fay, Tekirdağ Havzası'nı oluşturan genç ve kalın

çökelleri keserek doğuya ilerler. Bu alanda fay zonu boyunca yoğun sıvı ve gaz çıkışları gözlenmektedir (Geli ve diğ., 2018). Diğer taraftan, fayın karadaki doğrultusu K70D iken, Tekirdağ Havzası içerisinde doğu-batı doğrultusuna yaklaşmakta ve bu geçiş sırasında fay zonu daha parçalı bir geometri sergilemektedir. Buna karşın karadaki kesimde fay geometrisi görece daha süreklidir.

Mevcut veriler, 1766 ve 1912 depremleri sırasında bu geçiş zonunun, kara ve deniz kesimleri arasında bir kırılma engeli oluşturmadığını ve her iki depremde de karadaki ve deniz içindeki kesimlerin birlikte kırılmış olabileceğini göstermektedir.



**Şekil 2.** Marmara bölgesi 2000-2025 yılları arası deprem etkinliği (mor noktalar). 2019 yılı M5.8 ve 2025 yılı M6.2 depremlerinin yerleri şekil üzerinde yıldız simgeleriyle gösterilmiştir. M6.2 depremi artçıları turuncu renkte gösterilmektedir. Fay haritası Armijo ve diğ. (2005)'ten, deprem katalog listesi Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nden alınmıştır.

**Figure 2.** Seismic activity (purple dots) in the Marmara Region between 2000 and 2025. The locations of the 2019 M5.8 and 2025 M6.2 earthquakes are shown with stars in the figure. Aftershocks of the M6.2 earthquake are shown in orange. The fault map is from Armijo et al. (2005), and the earthquake catalog list is from Boğaziçi University Kandilli Observatory Earthquake Research Institute.

Sonuç olarak, 23 Nisan 2025 tarihinde meydana gelen M6.2 büyüklüğündeki depremin, büyüklüğü, oluşturduğu kırılma alanı ve olası kayma miktarları dikkate alındığında, AMF'nin doğu ve batı segmentleri arasındaki yapısal ve mekanik süreksizliği ortadan kaldıracak ya da bu iki segment arasındaki bağı koparabilecek nitelikte bir olay olarak değerlendirilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, söz konusu depremin Marmara Denizi'ndeki sismik tehlikeyi kayda değer ölçüde azalttığı yönünde bir sonuca varılamaz. Bununla birlikte, bu deprem AMF boyunca öngörülen parçalı kırılma davranışının güncel bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

**Madde 2:** *M6.2 büyüklüğündeki deprem, kilitli olduğu bilinen ve en son 1766 yılında kırıldığı kabul edilen Kumburgaz segmenti üzerinde meydana gelmiştir. Jeodezik ve jeolojik gözlemlerden belirlenen yaklaşık 2 cm/yıl kayma hızına göre, 250 yılda birikmiş olması beklenen toplam yer değiştirme yaklaşık 5 m'dir. Buna karşın, M6.2 büyüklüğündeki deprem için hesaplanan maksimum kayma miktarı yaklaşık 30 cm düzeyindedir. Bu durumda, söz konusu parça kalan kayma açığı nedeniyle yeniden kırılabilir mi? Yoksa bu segment üzerindeki kayma birikimi tahminleri hatalı mıdır ya da bir bölümünün sünme yoluyla serbestlenmiş olması söz konusu olabilir mi?*

AMF'nin Kumburgaz segmenti yaklaşık 70 km uzunluktadır. Bu segment üzerinde doğrudan gerçekleştirilen jeodezik ölçümler, fayın büyük ölçüde kilitli olduğunu göstermektedir (Sakic ve diğ. 2016, Yamamoto ve diğ. 2017, Lange ve diğ. 2019). Buna paralel olarak, Kumburgaz segmenti düşük düzeyde deprensellik sergileyen, görece asismik bir karaktere sahiptir (Şekil 2). Daha doğuda yer alan Adalar Fayı ise, tam tersi şekilde yoğun bir deprensellik göstermektedir. Bu iki fayın temsil ettiği kesim, literatürde iyi tanımlanmış bir sismik boşluk olarak kabul edilmektedir (Hubert-Ferrari ve diğ. 2000, Ambraseys 2002, Pondard ve diğ. 2007, Utkucu ve diğ. 2009).

Bölgesel jeodezik ölçümlerden Kumburgaz segmenti için 17-27,9 mm/yıl arasında değişen kayma hızları hesaplanmıştır (Meade ve diğ. 2002, Flerit ve diğ. 2004, Pondard ve diğ. 2007). Hergert ve diğ. (2011), fayın karmaşıklığını da hesaba katan 3B jeomekanik bir model yardımıyla GPS verilerinden, Kumburgaz segmenti ve Adalar Fayı boyunca kayma hızlarının 12,8-17,8 mm/yıl arasında değiştiğini belirlemiştir. Bu durumda, 1766 depreminden bu yana biriken toplam kayma 3,35-4,6 m civarında olup, M7 ve üzeri büyüklükte bir deprem üretebilecek kapasitededir (Utkucu ve diğ. 2024). Bulut ve diğ. (2019)'un, MS 500-2000 yılları arasındaki büyük depremlerle serbestlenen sismik momentlerin toplamından, AMF'nin doğu kesimi üzerinde yaklaşık 4 m'lik bir kayma açığı hesaplanmış olması da bu yorumu desteklemektedir.

Kumburgaz segmentinin batı ucunda meydana gelen M6.2 büyüklüğündeki depremin yalnızca küçük bir asperiteyi (pürüz) kırdığı ve homojen kayma varsayımıyla en fazla 30 cm civarı bir kaymayı serbestlediği kabul edilirse (Wells ve Coppersmith 1994), söz konusu segment üzerinde birikmiş olan yaklaşık 4 m düzeyindeki kayma açığının büyük bölümünün halen korunmakta olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durumda, Kumburgaz segmenti üzerinde kalan asperitelerin veya daha geniş ölçekte birikmiş kaymanın, ileride meydana gelebilecek daha büyük bir deprem sırasında açığa çıkması olasıdır. Nitekim 1940 Imperial Valley depreminde (M7.0) kırılmış olan bir parçasının, 1979 Imperial Valley depreminde (M6.4) yeniden kırıldığı bilinmektedir (Sieh 1996). Dolayısıyla, M6.2 büyüklüğündeki son depremle kırılan fay alanının, daha büyük bir deprem sırasında tekrar kırılması olasılığı göz ardı edilemez.

Bununla birlikte, AMF'nin Kumburgaz-Çınarcık kesimiyle ilgili literatürde tartışılan bir diğer önemli olasılık, blok hareketinin tamamının tek bir segment üzerinde değil, bu segmente paralel uzanan birkaç fay kolu arasında

paylaşıyor olmasıdır (Yalçınkaya ve diğ. 2015, Şahin ve diğ. 2022). Bu yaklaşıma göre, en kuzeyde yer alan Kumburgaz kolu toplam blok hareketinin sadece %20'sini, orta kol yaklaşık %15'ini ve Çınarcık çukurunun güney sınırını oluşturan güney kol ise yaklaşık %65'ini karşılamaktadır. Söz konusu kolların varlığının ve kayma paylaşımının, sismik yansıma kesitleri ve batimetri verileri üzerinde izlenebildiği ileri sürülmektedir (Yalçınkaya ve diğ. 2015, Şahin ve diğ. 2022). Blok hareketinin bu bölgede birden fazla segment tarafından paylaşılması durumunda, mevcut sismik tehlike değerlendirmelerinin yeniden ele alınması gerekeceği açıktır.

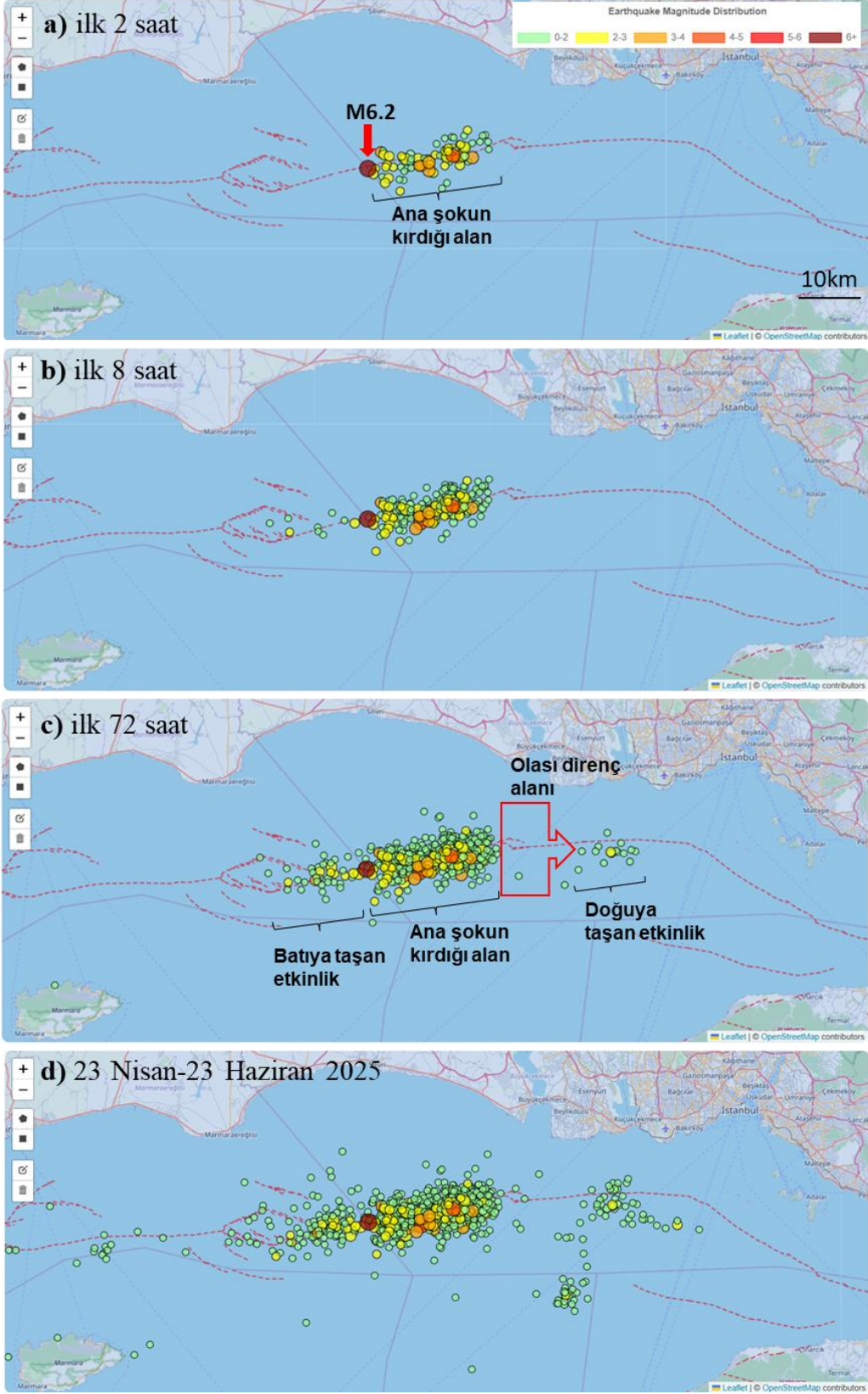
Bununla birlikte, Hergert ve Heidbach (2010), bu kesimde kollar arasında bir kayma paylaşımı olsa dahi, toplam kaymanın büyük bölümünün kuzeydeki Kumburgaz segmenti tarafından karşılandığını ileri sürmektedir. Söz konusu çalışmada, Kumburgaz segmenti ve Adalar Fayı boyunca 12,8–17,8 mm/yıl aralığında kayma hızları hesaplanırken, güneyde uzanan diğer fay kolları için yalnızca 0–3 mm/yıl mertebesinde kayma hızları elde edilmiştir.

**Madde 3:** *M6.2 büyüklüğündeki depremin batıdan başlayarak doğuya doğru ilerleyen bir kırılma karakteri sergilediği ve kırılmanın doğu ucunda artçı depremlerin ani biçimde sonlandığı gözlenmektedir. Bu durum, kırılmanın doğu sınırında bir direnç alanı olarak düşünülürse, direnci oluşturan nedir? Kabuk yapısındaki farklılaşma, fay geometrisi, kayma dağılımı, kırılma enerjisinin tükenmesi ya da yeterli gerilme taşınamaması gibi olası mekanizmalar nasıl değerlendirilebilir?*

Ana şok sonrası ilk saatler içerisinde oluşan artçı depremlerin dağılımının, kırılmanın genel geometrisini yansıttığı kabul edilmektedir. Buna göre, M6.2 depreminin odak izdüşümü

(episantr) kırık alanının en batısında olup, ilk saatler içinde kaydedilen yaklaşık 200 artçı depremin dağılımı, doğuya doğru uzanan yaklaşık 15-20 km'lik bir kırık alanına işaret etmektedir (Şekil 3). Bu büyüklükteki bir deprem için, bu kırık alanı öngörülen beklentilerle uyumludur (Wells ve Coppersmith 1994).

İzleyen saatler ve günler içerisinde artçıların bir kısmı, öngörülen kırık alanının batısına doğru taşarak, muhtemel gerilme yüklemesi bölgesi içerisinde yoğun olmayan bir etkinlik sergilemiştir (Şekil 3). Buna karşılık, kırılmanın doğu ucunda, artçılar kırık alanıyla ani biçimde sınırlanmakta ve olası gerilme yüklemesi alanı içerisinde belirgin bir artçı etkinliği ortaya çıkmamıştır. Artçıların doğu ucunda bu şekilde keskin bir biçimde sınırlanması, fay heterojenitesi ile ilişkili bir direnç alanı olarak yorumlanmış ve olası tetiklenme alanı şüphesi doğurmuştur. Guvercin ve Barbot (2025) tarafından gerçekleştirilen sayısal simülasyonlarda, yüksek sıcaklık ve kalın sediment örtüsünün, AMF boyunca kırılmanın ilerlemesini durdurabilecek bir bariyer oluşturabileceği gösterilmiştir. Diğer taraftan, ana şoktan sonraki ilerleyen günlerde, artçı etkinliğinin kırılmanın doğu ucunda yaklaşık 10 km genişliğinde olduğu izlenen söz konusu direnç alanını atlayarak, segmentin daha doğusunda 20–30 adet depremden oluşan ikincil bir etkinlik kümesi oluşturduğu görülmektedir (Şekil 3). Kumburgaz segmentinin bu kesiminde geçmiş depremselliğin yok denecek kadar az olması göz önünde bulundurulduğunda, bu ikincil etkinliğin, tamamen M6.2 deprem kırığının aktardığı gerilme yükü nedeniyle tetiklenmiş bir artçı dizisi olduğu rahatlıkla söylenebilir.



**Şekil 3.** 23 Nisan 2025 M6.2 depremi sonrası artçıların zamansal dağılımı. a) Ana şok sonrası ilk iki saat içinde oluşan artçı dağılımı. Grafik üzerinde tahmini ana şok kırılma alanı işaretlenmiştir. b) Ana şok sonrası ilk 8 saat içinde oluşan artçı dağılımı. c) Ana şok sonrası ilk 72 saat içinde oluşan artçı dağılımı. Artçı dağılımının sismotektonik yorumu grafik üzerinde işaretlenmiştir. d) Ana şok sonrası ilk iki aylık dönem içinde oluşan artçı dağılımı. Grafikler Çomoğlu (2026) web uygulamasında çizdirilmiştir.

**Figure 3.** Temporal distribution of aftershocks after the April 23, 2025, M6.2 earthquake. a) The distribution of aftershocks that occurred within the first two hours after the main shock. The estimated main shock rupture area is marked on the graph. b) The distribution of aftershocks that occurred within the first 8 hours after the main shock. c) The distribution of aftershocks that occurred within the first 72 hours after the main shock. The seismotectonic interpretation of the aftershock distribution is marked on the graph. d) The distribution of aftershocks that occurred within the first two months after the main shock. Graphs were drawn in web application (Çomoğlu, 2026).

M6.2 büyüklüğündeki depremin, yaklaşık 259 yıldır gerilme biriktirdiği kabul edilen Kumburgaz segmentinin batı ucunda meydana gelmiş olması ve bu segment üzerinde belirgin bir sünme davranışına işaret eden herhangi bir bulgunun olmaması nedeniyle, fay boyunca kırılmanın doğuya ilerlemesini durdurabilecek bir gerilme birikimi yetersizliğinden söz edilemez. Benzer şekilde, fayın bu kesiminde kırılmayı durdurabilecek belirgin bir doğrultu değişimi ya da segment ölçeğinde geometrik bir süreksizlik de tanımlanamamaktadır. Öte yandan, M6.2 depremine ait sonlu fay modeli çözümü, kayma vektörlerinin kırılmanın doğu ucunda, olası bir yüksek dayanımlı zonda, sınırlandığına işaret etmektedir (Eken ve diğ. 2025).

Kırılmanın doğuya doğru ilerlemesini durdurabilecek, bir direnç alanı oluşturabilecek önemli bir etken kabuk yapısındaki farklılaşma olabilir. Marmara Denizi altındaki kabuk yapısına ilişkin tomografik ve sismolojik çalışmalar, Kumburgaz segmentinin doğu ucunun, yüksek hızlı bir kabuksal anomali ile çakıştığını göstermektedir (Yamamoto ve diğ. 2017; 2022, Turunçtur ve diğ. 2023). Bu tür yüksek hızlı alanlar, fay zonu boyunca mekanik davranışın değiştiği yapısal süreksizliklerin bir

göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Yeats ve diğ. 1997).

Ayrıca, artçı depremlerin ani biçimde sonlandığı ve fay heterojenitesi ile ilişkili olduğu düşünülen bu direnç alanı içerisinde, yüksek normal gerilme değerlerinin belirlenmiş olması (Hergert ve Heidbach, 2011), söz konusu bölgede kırılmaya karşı mekanik bir engelin bulunduğunu desteklemektedir. Bu çerçevede, M6.2 deprem kırığının doğu ucunda ani biçimde durmasının, AMF üzerinde yer alan ve kırılmaya direnç gösteren büyük ölçekli bir asperitenin varlığıyla ilişkili olması olasıdır. Bu durum aynı zamanda, söz konusu alanın daha fazla gerilme taşıyabileceği ve daha büyük bir deprem üretebileceği sonucunu da doğurur. Nitekim, Adalar Fayı'nın da kilitle bir davranış sergilediği ve yaklaşık 18,9 mm/yıl kayma hızı ile deformasyon biriktirdiği düşünüldüğünde, bu kesimdeki sismik tehlikenin büyüklüğü daha açık biçimde ortaya çıkmaktadır (Hergert ve Heidbach 2010, Ergintav ve diğ. 2014, Diao ve diğ. 2020).

**Madde 4:** M6.2 depremi 2019 yılında oluşan M5.8 Silivri depreminin tetiklediği bir deprem midir? Marmara Denizi için bir tetikleme modeli oluşturulabilir mi?

Marmara Denizi'nde birbirine çok yakın lokasyonlarda ve M7+ büyüklükte bir depremler kırılma ihtimali çok yüksek olan bir segment üzerinde gerçekleşen iki orta büyüklükteki depremin (2019 yılı M5.8 ve 2025 yılı M6.2) etkileşimi, hem depremler arası statik ve zamana bağlı gerilme transferinin hem de AMF üzerindeki güncel gerilme durumunun anlaşılması açısından son derece değerlidir. Bunun yanında, her iki deprem de öncüleri olan depremlerdir. Tüm bu nedenlerle, söz konusu depremler arasındaki etkileşimlerin ortaya konması, gelecekteki Marmara depremlerinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

2019 yılı M5.8 Silivri depremi, AMF'ye yaklaşık paralel uzanan ve ana koldan kuzeye sıçrayan ikincil bir fay kolu üzerinde meydana gelmiştir (Yamamoto ve diğ. 2020, Karabulut ve diğ. 2021, Şahin ve diğ. 2022). Odak mekanizması çözümü yaklaşık D-B yönelimli ve baskın olarak ters faylanma karakteri gösterir. Buna karşın, 2025 yılı M6.2 depremi doğrudan AMF üzerinde gelişmiş olup, D-B yönelimli doğrultu atımlı bir faylanma mekanizmasına sahiptir.

Toda ve Stein (2019), M5.8 depremiyle ilgili yaptıkları Coulomb gerilme değişimi analizinde, söz konusu depreminin ana kol üzerinde yaklaşık 10 km<sup>2</sup>'lik bir alanda, 1 bar'a ulaşan bir statik gerilme artışı oluşturduğunu hesaplamışlardır. Bu artışın gerçekleştiği alan, M6.2 depreminin ana şok lokasyonu ile örtüşmektedir (Stein ve Sevilgen, 2025). Aynı çalışmada, M5.8 depreminin ana kol üzerinde bir yıl içinde M6.5 ve üzeri büyüklükte bir depremi tetikleme olasılığını, deprem öncesi duruma göre 3-4 kat arttırdığını öne sürmüşlerdir.

Karabulut ve diğ. (2021) çalışmasında, M5.8 için hesaplanan kırık doğrultusunun biraz daha KB-GD yönelimli olduğu ve artçı dağılımıyla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen odak mekanizması çözümünde

doğrultu atım bileşeninin daha belirgin olduğu görülmektedir. Artçı dağılımı ve kullanılan kırık modeline bağlı olarak, kırığın doğu ucunda bazı artçıların kırık alanı dışına taşarak ana kol üzerinde bazı deprem tetiklenmeleri oluşturduğu ifade edilmiştir. Yapılan Coulomb gerilme değişimi analizleri, ana kol üzerinde yaklaşık 2 bar'lık bir gerilme artışına işaret etmektedir.

Şahin ve diğ. (2022) M5.8 depremi için birden fazla KD-GB yönelimli kırılma modeli kullanarak yaptıkları Coulomb gerilme değişimi analizlerinde, AMF üzerinde yer yer 3.4 bar'a varan gerilme artışları hesaplamış ve bu artışların M7+ büyüklükte bir depremin tetiklenmesi açısından anlamlı olabileceğini ileri sürmüşlerdir. Utkucu ve diğ. (2024) ise, 2019 depremi odağı civarında 1999 İzmit depremi kaynaklı viskoelastik gerilme artışının halen devam ettiğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, 2025 yılı M6.2 depreminin, 2019 yılı M5.8 Silivri depremi tarafından tetiklenmiş olma olasılığı bulunduğu söylenebilir. Mevcut çalışmalar, M5.8 depreminin AMF üzerinde bir gerilme artışı oluşturduğuna işaret etmektedir. Bununla birlikte, 1999 İzmit depreminin M6.2 depremi odağı civarında yaklaşık 0,067 bar kosmik ve 2019 yılı itibarıyla 0,122 bar viskoelastik gerilme artışı oluşturduğu hatırlanmalıdır. Benzer şekilde M6.2 depreminin de kırık geometrisi ve kayma dağılımına bağlı olarak çevredeki fay segmentleri üzerinde hem statik hem de zamana bağlı gerilme değişimleri oluşturacağı açıktır. Bu nedenle, Marmara Denizi'nde meydana gelen tüm orta ve büyük ölçekli depremler için ortak bir çerçevede Coulomb gerilme değişimi ve viskoelastik gerilme transferi hesaplarının yapılması, bu hesapların zamana bağlı olarak güncellenmesi ve tarihsel-aletsel deprem dizileriyle birlikte değerlendirilmesi, Marmara Denizi için

bütüncül ve operasyonel bir tetiklenme modeli geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

**Madde 5:** *AMF asismik ve yüksek sismisite gösteren farklı parçalardan oluşur. Sismik tehlike açısından bu farklı davranışlar nasıl değerlendirilebilir?*

AMF farklı deprensellik davranışlarına sahip, başka bir ifadeyle asismik (deprem üretmeyen/çok az deprem üreten) veya yüksek deprem aktivitesi gösteren ve deprem aktivitelerinin farklı derinliklerde kümelenmeler gösterdiği segmentlerden oluştuğu bilinmektedir (Schmittbuhl ve diğ. 2015, Bohnhoff ve diğ. 2013, Karabulut ve diğ. 2006, Yamamoto ve diğ. 2017; 2020, Wollin ve diğ. 2018, Becker ve diğ. 2023). Ancak AMF'nin bu davranış şeklinin, sadece son 30 yıl içindeki hata miktarları nispeten daha düşük sismolojik izlemelere dayandığını belirtmek gerekir. Bunun yanında, AMF boyunca gelişen sıkışma (basınç) sırtları ve açılma düzlükleri (Hergert ve Heidbach 2011, Bulkan ve diğ. 2020), kabuk boyunca yanall yönde değişen sismik hız yapıları (Yamamoto ve diğ. 2017; 2022, Becel ve diğ. 2009, Turunçtur ve diğ. 2023), değişen fay doğrultuları ve süreksizlikler, sürtünme özelliklerindeki olası farklar, dönen gerilme eksen yönleri (Pınar ve diğ. 2003, 2016) ve ortaya çıkan farklı faylanma mekanizmaları (Wollin ve diğ. 2018) bütünüyle karmaşık bir tektonik ve mekanik yapıya işaret eder.

Bu tür bir yapısal ve mekanik karmaşıklık, genel olarak uzun ve sürekliliği yüksek tekil kırılmaların gelişme olasılığını azaltıcı bir etki yaratabilir. Ancak Marmara Denizi ve çevresinde tarihsel dönemde meydana gelen büyük depremler ile, yakın zamanda gerçekleşen 2023 Kahramanmaraş depremlerinde görüldüğü üzere, karmaşık ve çok parçalı fay sistemlerinin dahi uygun koşullar altında tek bir büyük deprem dizisi içinde birlikte kırılabilirdiği gerçeği göz ardı edilmemelidir.

Bir fay segmentinin asismik davranış sergilemesi, çoğu durumda fayın kilitli olması ile ilişkilendirilmektedir (Lange ve diğ. 2019). Aynı zamanda asismik davranış, fay zonunun homojen yapısıyla (eşit sürtünme direncine sahip) ve fay düzlemi üzerinde kayma gerilmesinin homojen dağılmış olmasıyla da ilişkilendirilebilir. Hergert ve Heidbach (2011), AMF üzerindeki asismik davranışın bir bölümünü fay geometrisinin görece daha sade olmasına bağlamıştır. Buna karşılık, sürekli sünme (steady creep) gösteren fay zonlarında, kaymanın çok sayıda küçük ölçekli kırılma ile gerçekleşmesi nedeniyle daha yoğun mikrodeprensellik gözlenebildiği de bilinmektedir (Bakun ve Lindh 1985). Dolayısıyla, yüksek deprensellik her zaman yüksek kilitlenme derecesini, asismik davranış ise her zaman düşük tehlikeyi temsil etmemektedir.

Ayrıca bir fay segmentinin deprensellik karakterinin, sismik döngü süresince zamana bağlı olarak değişebileceğini öngörmek de mümkündür. Büyük bir deprem sonrasında, fay zonunun yeniden yüklenmesi sürecinde ve kırılmaya yaklaşılana evrede, sürtünme koşulları ve mikro hasar birikimi ile ilişkili olarak deprensellik özellikleri belirgin biçimde farklılaşabilir (Ohnaka 2004). Bu çerçevede sismik tehlike açısından en kritik sonuç, AMF boyunca gözlenen asismik ve yüksek sismisite gösteren segmentlerin yalnızca güncel deprem üretme oranlarına bakılarak "daha güvenli" ya da "daha tehlikeli" olarak sınıflandıramayacağıdır.

Tüm bu nedenler doğrultusunda, AMF'nin deprensellik karakterinin anlaşılması ve fiziksel mekanizmayla ilişkisinin oluşturulabilmesi, daha uzun süreli ve daha yüksek çözünürlüklü izlenmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu konuda son yıllarda artan karasal ve denizel sismolojik gözlem istasyonları, üç boyutlu kabuk hız yapısı

araştırmaları ve makine öğrenmesine dayalı deprem tanıma ve sınıflandırma uygulamaları, bu açıdan son derece olumlu ve umut verici gelişmeler olarak değerlendirilmektedir.

## SONUÇLAR

Sonuç olarak, dünyada iyi bilinen sismik boşluklardan biri olarak kabul edilen Marmara Denizi'nde oluşan orta büyüklükteki iki depremin (M5.8 ve M6.2), bölgenin genel sismik tehlikesini anlamlı ölçüde değiştirebilecek nitelikte depremler olarak görülmemektedir. Bu depremlerin oluşturduğu kırılma alanları ve kayma miktarları, söz konusu sismik boşluğu oluşturan fay alanı ve üzerinde biriktiği düşünülen toplam kayma açığı ile karşılaştırıldığında oldukça sınırlı kalmaktadır. Ancak bu depremlerin dahi, asıl kırılması beklenen segmentler üzerinde oluşturabilecekleri statik ve zamana bağlı gerilme değişimlerinin, yerel ölçekte dikkate değer olabileceği göz ardı edilmemelidir.

AMF gerilme biriktirme, depremsellik düzeyi, gerilme eksen doğrultuları, mekanizma değişimleri, fay geometrisi ve kabuk sismik hız yapısı gibi birçok etken açısından parçalı yapı görüntüsü sergilerken, tarihte yaşanmış büyük depremler ve yeterli gerilme birikimine sahip bu tür parçalı yapının dahi M7+ deprem potansiyeline sahip olduğu gerçeği göz önünde bulundurulmalıdır.

AMF'nin depremsellik karakterinin güvenilir biçimde anlaşılabilmesi ve fiziksel mekanizmalarla ilişkisinin oluşturulabilmesi, uzun süreli ve yüksek çözünürlüklü gözlemlerle desteklenen bütünlüklü bir izleme yaklaşımını zorunlu kılmaktadır. Bu konularda son yıllarda artan karasal ve denizel sismolojik gözlem ağları, üç boyutlu kabuk sismik hız yapısı araştırmaları ve makine öğrenmesine dayalı deprem tanıma ve sınıflandırma uygulamaları, Marmara Denizi için sismik tehlikenin daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayan son derece önemli gelişmeler olarak

değerlendirilmektedir. Önümüzdeki yıllarda, depremler arasındaki etkileşimlerin ortaya konulması, statik ve zamana bağlı gerilme aktarımının nicel olarak izlenmesi ve açığa çıkan sismik enerji miktarlarının takibi, güncel sismik tehlikenin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle ana fay ve kolları arasında ortaya çıkan kayma paylaşımları, sünme ve kilitleme alanlarının ayrıntılı biçimde haritalanması, fay segmentleri arasında olası kırılma sıçramalarının koşullarının araştırılması, kabuk hız yapısındaki heterojenitelerin kırılma dinamiği ile ilişkilendirilmesi, kümelenen deprem alanlarının detaylandırılması potansiyel araştırma başlıkları olarak öne çıkmaktadır.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışmaya görüşleriyle ışık tutan tüm araştırmacılara teşekkürlerimizi sunarız. Katkı verenler isim sırasıyla: Ahu KÖMEÇ MUTLU, Ali Özgür KONCA, Ali PINAR, Aynur DİKBAŞ, Cengiz ZABCI, Cenk YALTIRAK, Hakan ALP, Haluk EYİDOĞAN, Hayrullah KARABULUT, Mümtaz HİSARLI, Nurcan Meral ÖZEL, Onur TAN, Ryusuke YAMAMOTO, Semih ERGİNTAV, Şakir ŞAHİN, Şerif BARIŞ, Yasemin KORKUSUZ ÖZTÜRK.

## KAYNAKLAR

- Aksoy, M.E., Meghraoui, M., Vallée, M., Çakır, Z. 2010. Rupture characteristics of the AD 1912 Mürefte (Ganos) earthquake segment of the North Anatolian fault (western Turkey), *Geology* 38(11), 991-994. <https://doi.org/10.1130/G31447.1>
- Ambraseys, N. 2002. The seismic activity of the Marmara Sea region over the last 2000 years, *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, 1-18. <https://doi.org/10.1785/0120000843>
- Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Uçarkus, G., de Lépinay, B.M., Malavieille, J., Dominguez, S., ve diğ. 2005. Submarine

- fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (north Anatolian fault): Implications for seismic hazard in Istanbul, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, Q06009.  
<https://doi.org/10.1029/2004GC000896>
- Bakun, W.H., Lindh, A.G. 1985. The Parkfield, California, Earthquake Prediction Experiment, *Science*, 229, 619-624.  
<https://doi.org/10.1126/science.229.4714.619>
- Barka, A. 1996. Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with large earthquakes of the period 1939–1967, *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, 1238–1254.  
<https://doi.org/10.1785/BSSA0860051238>
- Bécel, A., Laigle, M., Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., Galvé, A., Shimamura, H., Murai, Y., Lépine, J.C, Sapin, M., Özalaybey, S. 2009. Moho, crustal architecture and deep deformation under the North Marmara Trough, from the SEISMARMARA Leg 1 offshore–onshore reflection–refraction survey, *Tectonophysics* 467(1–4) 1-21,  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.10.022>.
- Becker, D., Martínez-Garzón, P., Wollin, C., Kılıç, T., Bohnhoff, M. 2023. Variation of fault creep along the overdue Istanbul-Marmara seismic gap in NW Türkiye, *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101471.  
<https://doi.org/10.1029/2022GL101471>.
- Bohnhoff, M., Bulut, F., Dresen, G., Malin, P.E., Eken, T., Aktar, M. 2013. An earthquake gap south of Istanbul, *Nat. Commun.*, 4.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms2999>
- Bulkan, S., Vannucchi, P., Gasperini, L., Polonia, A., Cavozi, C. 2020. Modelling tectonic deformation along the North-Anatolian Fault in the Sea of Marmara, *Tectonophysics* 794, 228612.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228612>
- Bulut, F., Aktuğ, B., Yaltrak, C. ve diğ. 2019. Magnitudes of future large earthquakes near Istanbul quantified from 1500 years of historical earthquakes, present-day microseismicity and GPS slip rates, *Tectonophysics* 764:77–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.05.005>
- Çakır, A., Akoglu, M., Belabbes, S., Ergintav, S., Meghraoui, M. 2005. Creeping along the Ismetpasa section of the North Anatolian fault (Western Turkey): Rate and extent from InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.* 238, 225–234, doi:10.1016/j.epsl.2005.06.044.
- Çomoğlu, M. 2026. <https://deprem.comoglu.com/afad-koeri/statistics.html>. Son erişim tarihi: 10.02.2026.
- Diao, F., Walter, T.R., Solar, G., Wang, R., Bonano, M., Manz, M. 2016. Fault locking near Istanbul: indication of earthquake potential from InSAR and GPS observations, *Geophys. J. Int.* 205, 477–485. doi: 10.1093/gji/ggw048
- Eken, T., Taymaz, T., Yolsal-Çevikbilen, S. et al. 2025. Source and rupture properties of the 23 April 2025 Mw 6.3 Silivri High-Kumburgaz basin earthquake threatening İstanbul, NW Türkiye. *J Seismol* 29, 1727–1755. <https://doi.org/10.1007/s10950-025-10342-8>
- Ergintav, S., ve diğ. 2014. Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap, *Geophys. Res. Lett.*, 41 (16), 5783–5788. doi:10.1002/2014GL060985
- Flerit, F., Armijo, R., King, G., Meyer, B. 2004. The mechanical interaction between the propagating North Anatolian Fault and the back-arc extension in the Aegean, *Earth*

- Planet. Sci. Lett. 224, 347-362.  
Doi:10.1016/j.epsl.2004.05.028
- Géli L., Henry P., Grall C., ve diğ. 2018. Gas and seismicity within the Istanbul seismic gap, Sci Rep 8, 6819.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23536-7>
- Görgün, B., Yalçinkaya, E., Görgün, E., Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Alp, H., 2025. Investigation of fault zone head waves along the 1912 MW7.4 Şarköy–Mürefte (Ganos) earthquake rupture zone in NW Türkiye, Geophysical Journal International 242(1), 1-18,  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaf148>
- Guvercin, S.E., Barbot, S. 2025. Persistent rupture segmentation of the Main Marmara Fault. Commun Earth Environ 6, 1028.  
<https://doi.org/10.1038/s43247-025-03007-4>
- Hergert, T., Heidbach, O. 2010. Slip-rate variability and distributed deformation in the Marmara Sea fault system. Nature Geoscience, 3(2), 132–135.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo739>
- Hergert, T., Heidbach, O., Bécél, A., Laigle, M. 2011. Geomechanical model of the Marmara Sea region—I. 3-D contemporary kinematics, Geophysical Journal International 185(3), 1073–1089,  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04991.x>
- Hergert, T., Heidbach, O. 2011. Geomechanical model of the Marmara Sea region—II. 3D contemporary background stress field, Geophysical Journal International 185(3), 1090-1102,  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04992.x>
- Hubert-Ferrari, A., Armijo, R., King, G., Meyer, B., Barka, A. 2002. Morphology, displacement, and slip rates along the North Anatolian Fault, Turkey. J. Geophys. Res. 107 (B10), 2235.  
doi:10.1029/2001JB000393
- Karabulut, H., Roumelioti, Z., Benetatos, C., Mutlu, A.K., Özalaybey, S., Aktar, M., Kiratzi, A. 2006. A source study of the 6 July 2003 (M w 5.7) earthquake sequence in the Gulf of Saros (Northern Aegean Sea): Seismological evidence for the western continuation of the Ganos fault, Tectonophysics 412(3), 195-216.  
DOI:10.1016/J.TECTO.2005.09.009
- Karabulut, H., Güvercin, S.E., Eskiköy, F., Konca, A.Ö., Ergintav, S. 2021. The moderate size 2019 September Mw 5.8 Silivri earthquake unveils the complexity of the Main Marmara Fault shear zone, Geophysical Journal International 224(1) 377–388,  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa469>.
- Lange, D., Kopp, H., Royer, J.Y., Henry, P., Cakir, Z., Petersen, F., Geli, L. 2019. Interseismic strain build-up on the submarine North Anatolian Fault offshore Istanbul, Nat. Commun. 10(1),  
doi:10.1038/s41467-019-11016-z.
- Le Pichon, X., Sengor, A.M.C., Demirbag, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R., Gorur, N., Cagatay N. 2001. The active Main Marmara Fault, Earth Planet. Sci. Lett., 192, 595–616.  
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00449-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00449-6)
- Meade, B.J., Hager, B.H., McClusky, S.C., Reilinger, R.E., Ergintav, S., Lenk, O., ve diğ. 2002. Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by global positioning system measurements, Bulletin of the Seismological Society of America 92, 208–215.  
<http://dx.doi.org/10.1785/0120000837>

- Meghraoui, M., Aksoy, M.E., Akyüz, H.S., Ferry, M., Dikbaş, A., Altunel, E. 2012. Paleoseismology of the North Anatolian Fault at Güzelköy (Ganos segment, Turkey): Size and recurrence time of earthquake ruptures west of the Sea of Marmara, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 13, Q04005, <https://doi.org/10.1029/2011GC003960>
- Ohnaka, M. 2004. Earthquake cycles and physical modeling of the process leading up to a large earthquake, *Earth Planets Space* 56, 773–793. DOI:10.1186/BF03353085
- Öztürk, Y.K., Konca, A.Ö., Özel, N.M. 2025. 3D dynamic rupture simulations for the potential main Marmara fault earthquake in the sea of Marmara based on the inter-seismic strain accumulation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 130, e2024JB029585. <https://doi.org/10.1029/2024JB029585>
- Parsons, T. 2004. Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey. *J Geophys Res*, 109. <https://doi.org/10.1029/2003JB002667>
- Pınar, A., Kuge, K., Honkura, Y. 2003. Moment tensor inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea of Marmara, *Geophysical Journal International* 153, 133–145. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01897.x>
- Pınar, A., Coşkun, Z., Mert, A., ve diğ. 2016. Frictional strength of North Anatolian fault in eastern Marmara region. *Earth Planets and Space* 68:62, <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0435-z>
- Pondard, N., Armijo, R., King, G.C., Meyer, B., Flerit, F. 2007. Fault interactions in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): earthquake clustering and propagating earthquake sequences, *Geophysical Journal International* 171(3), 1185-1197. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03580.x
- Rockwell, T., Barka, A., Dawson, T., Akyuz, S., Thorup, K. 2001. Paleoseismology of the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolia fault, northwestern Turkey: Comparison of the historical and paleoseismic records, implications of regional seismic hazard, and models of earthquake recurrence, *Journal of Seismology*, 5(3), 433-448. <https://doi.org/10.1023/A:1011435927983>
- Sakic, P., Piété, H., Ballu, V., Royer, J.-Y., Kopp, H., Lange, D., ve diğ. 2016. No significant steady state surface creep along the North Anatolian fault offshore Istanbul: Results of 6 months of seafloor acoustic ranging, *Geophysical Research Letters*, 43, 6817–6825. <https://doi.org/10.1002/2016GL069600>
- Schmidt, D.A., Bürgmann, R., Nadeau, R.M., d'Alessio, M. 2005. Distribution of aseismic slip rate on the Hayward fault inferred from seismic and geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 110, B08406, doi:10.1029/2004JB003397.
- Schmittbuhl, J., Karabulut, H., Lengline, O., Bouchon, M. 2015. Seismicity distribution and locking depth along the Main Marmara Fault, Turkey, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 954–965. <https://doi.org/10.1002/2015GC006120>
- Schmittbuhl, J., Karabulut, H., Lengliné, O., Bouchon, M. (2016). Long-lasting seismic repeaters in the Central Basin of the Main Marmara fault, *Geophysical Research Letters* 43, 9527–9534. <https://doi.org/10.1002/2016GL070505>
- Sieh K. 1996. The repetition of large-earthquake ruptures, *Proc. Natl. Acad. Sci.*

- 93 (9), 3764-3771. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.9.3764>
- Stein, R.S., Sevilgen, V. 2025. A magnitude 6.2 quake strikes the Marmara Fault at site of large historic earthquakes near Istanbul, Temblor. <http://doi.org/10.32858/temblor.361>
- Şahin, M., Yaltrak, C., Bulut, F., ve diğ. 2022. Stress change generated by the 2019 İstanbul–Silivri earthquakes along the complex structure of the North Anatolian Fault in the Marmara Sea, *Earth Planets Space* 74, 167. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01706-2>
- Toda, S., Stein, R.S. 2002. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga–Nunez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield, *J. Geophys. Res.*, 107(B6), 2126, doi:10.1029/2001JB000172.
- Toda, S., Stein, R.S. 2019. Could the 26 Sept 2019 Marmara Sea earthquake trigger a much larger event closer to Istanbul?, *Temblor*. <http://doi.org/10.32858/temblor.046>
- Turunçtur, B., Eken, T., Chen, Y., Taymaz, T., Houseman, G.A., Saygin, E. 2023. Crustal velocity images of northwestern Türkiye along the North Anatolian Fault Zone from transdimensional Bayesian ambient seismic noise tomography, *Geophysical Journal International*, 234(1), 636–649, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad082>
- Tüysüz, O., Barka, A.A., Yiğitbaş, E. 1998. Geology of the Saros Graben and its implications for the evolution of the North Anatolian fault in the Ganos–Saros region, northwestern Turkey, *Tectonophysics* 293, 103–126. Doi:10.1016/S0040-1951(98)00085-7
- Utkucu, M., Kanbur, Z., Alptekin, Ö., Sünbül, F. 2009. Seismic behaviour of the North Anatolian fault beneath the sea of Marmara (NW Turkey): implications for earthquake recurrence times and future seismic hazard, *Nat Hazard* 50, 45–71. DOI: 10.1007/s11069-008-9317-4
- Utkucu, M., Budakoğlu, E., Durmuş, H. 2011. A discussion on the seismicity and seismic hazard of the Marmara region (NW Turkey), *Hac Univ Bull Earth Sci* 32, 141–168. <https://doi.org/10.33793/acperpro.05.02.734>
- Utkucu, M., Uzunca, F., Durmuş, H., ve diğ. 2024. The Mw = 5.8 2019 Silivri earthquake, NW Türkiye: is it a warning beacon for a big one?, *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 113, 107–124. DOI:10.1007/s00531-023-02359-6
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (4): 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Wesnousky, S., 2006. Predicting the endpoints of earthquake ruptures, *Nature* 444, 358–360. <https://doi.org/10.1038/nature05275>
- Wollin, C., Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Küperkoch, L., Raub, C. 2018. A unified earthquake catalogue for the Sea of Marmara region, Turkey, based on automatized phase picking and travel-time inversion: Seismotectonic implications, *Tectonophysics*, 747–748, 416–444. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.020>
- Wollin, C., Bohnhoff, M., Vavryčuk, V. et al. 2019. Stress Inversion of Regional Seismicity in the Sea of Marmara Region, Turkey. *Pure Appl. Geophys.* 176, 1269–

1291. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1971-1>
- Yalçinkaya, E., Bonhoff, M., Görgün, E., Alp, H., Bentz, S., Pinar, A., Alver, F., Kılıçarslan, Ö., Tamtaş, B.D., Görgün, B. 2023. Evaluation of current earthquake activity on the Ganos Fault: MONGAN network test analysis, *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 170, 99-116. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.1138208>
- Yalıtırak, C. 2015. Marmara Denizi ve Çevresinde Tarihsel Depremlerin Yerleri ve Anlamı. *İTÜ Vakfı Dergisi* 67, 51–58
- Yamamoto, Y., Takahashi, N., Pinar, A., Kalafat, D., Cıtak, S., Comoglu, M., ve diğ. 2017. Geometry and segmentation of the North Anatolian fault beneath the Marmara Sea, Turkey, deduced from long-term ocean bottom seismographic observations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122, 2069–2084. <https://doi.org/10.1002/2016JB013608>
- Yamamoto, R., Kido, M., Ohta, Y., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Pinar, A., ve diğ. 2019. Seafloor geodesy revealed partial creep of the north Anatolian fault submerged in the sea of Marmara, *Geophysical Research Letters* 46, 1268–1275. <https://doi.org/10.1029/2018GL080984>
- Yamamoto, Y., Kalafat, D., Pinar, A., Takahashi, T., Cosku, n Z., Polat, R., Kaneda, Y., Ozener, H. 2020. Fault geometry beneath the western and Central Marmara Sea, Turkey, based on ocean bottom seismographic observations: implications for future large earthquakes, *Tectonophysics* 791, [doi:10.1016/j.tecto.2020.228568](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228568).
- Yamamoto, Y., Kalafat, D., Pinar, A., Takahashi, N., Polat, R., Kaneda, Y., Ozener, H. 2022. Seismic velocity structure along the North Anatolian Fault beneath the Central Marmara Sea and its implication for seismogenesis, *Geophysical Journal International*, 228(1), 396–411. Doi: 10.1093/gji/ggab351
- Yeats, R.S., Sieh, K., Allen, C.R. 1997. *The geology of earthquakes*. Oxford University Press, New York, 568 pp. DOI: 10.1785/gssrl.68.5.778