

Analysis of Strong Ground Motion Parameters for the Marmara Sea Earthquake (Mw 6.2) on April 23, 2025: Response Spectra, Arias Intensity, and Significant Duration

Kaan Hakan Coban¹ , Erdem Bayrak^{2,3}

¹ Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, 61080 Trabzon, Türkiye

² Ataturk University, Earthquake Research Centre, 25240 Erzurum, Türkiye

³ Ataturk University, Engineering Faculty, 25240 Erzurum, Türkiye

Keywords

Strong ground motion, Response spectrum, Arias intensity, Marmara Sea, Istanbul

Highlights

- * Evaluation of strong ground motion parameters
- * Calculation of response spectra and comparison with design spectra
- * Assessment of peak ground acceleration, Arias intensity, and significant duration of earthquakes

Aim

This study aims to evaluate the strong ground motion parameters of the April 23, 2025 Marmara Sea Earthquake

Location

This study has implemented in Istanbul

Methods

Strong ground motion, Response spectrum, Arias intensity

Results

The peak ground acceleration and the highest spectral amplitudes were recorded at the Istanbul-Küçükçekmece station (3415)

Supporting Institutions

The authors declared that this study has used no support data from other institutions

Financial Disclosure:

The authors declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest:

The authors have no conflicts of interest to declare

How to cite:

Coban K.H., Bayrak E., 2025. Analysis of Strong Motion Parameters for the Marmara Sea Earthquake (Mw 6.2) on April 23, 2025: Response Spectra, Arias Intensity, and Significant Duration, Turk Deprem Arastirma Dergisi 7(3), 590-602, DOI:10.46464/tdad.1711758.

Manuscript

Research Article

Received: 01.06.2025

Revised: 05.09.2025

Accepted: 19.09.2025

Printed: 30.12.2025

DOI

10.46464/tdad.1711758



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Kaan Hakan Çoban

Email: h.coban@ktu.edu.tr

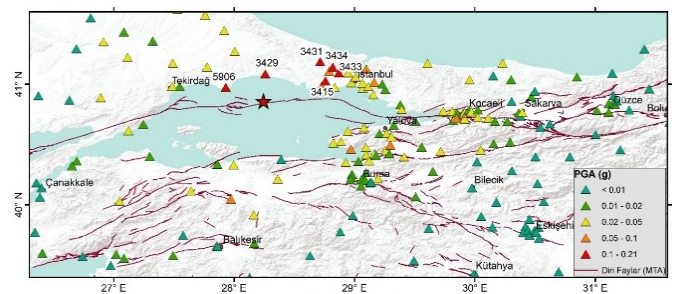


Figure
Peak Ground Acceleration (PGA) distribution map of the Mw 6.2 Marmara Sea-Silivri earthquake on April 23, 2025.

23 Nisan 2025 Marmara Denizi Depreminin (Mw 6.2) Kuvvetli Yer Hareketi Parametrelerinin Değerlendirilmesi: Tepki Spektrumları, Arias Şiddeti ve Etkin Süre

Kaan Hakan Çoban¹ , Erdem Bayrak^{2,3} 

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon, Türkiye

² Atatürk Üniversitesi, Deprem Araştırma Merkezi, 25240 Erzurum, Türkiye

³ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25240 Erzurum, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada 23 Nisan 2025'te, Silivri'nin yaklaşık 24 km güneyinde, Marmara Denizi'nde meydana gelen Mw 6.2 depremin kuvvetli yer hareketi parametreleri değerlendirilmiştir. Depremin AFAD tarafından işletilen farklı istasyonlardaki ivme kayıtları en büyük yer ivmesi değerlerine göre değerlendirilmiş tepki spektrumları, Arias şiddetleri ve etkin süreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan tepki spektrumları Türkiye Bina Deprem yönetmeliğinde (TBDY 2018) deprem düzeyi ve zemin sınıfına göre tanımlanan tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. En büyük yer ivme değeri ve en büyük spektral genlikleri 3415 İstanbul-Küçükçekmece istasyonunda görülmüştür. İstasyonlardaki etkin süre değerlerinin genellikle 10 ile 32 saniye arasında değiştiği gözlenmiştir. Yerel zemin etkilerinin bu deprem sonucunda ivme kayıtları üzerinde farklılıklara neden olduğu açıkça görülmüş ve yerel zemin etkisinin göz önüne alınması gereken önemli bir parametre olduğu bir kez daha anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Kuvvetli yer hareketi, Tepki spektrumu, Arias şiddeti, Marmara Denizi, İstanbul

Öne Çıkanlar

- * Kuvvetli yer hareketi parametrelerinin değerlendirilmesi
- * Tepki spektrumlarının hesaplanması ve tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılması
- * Depremin en büyük yer ivmesi, Arias şiddeti ve etkin sürelerinin değerlendirilmesi

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.06.2025

Düzeltilme: 05.09.2025

Kabul: 19.09.2025

Basım: 30.12.2025

DOI

10.46464/tdad.1711758

Sorumlu yazar

Kaan Hakan Çoban

E-posta:

h.coban@ktu.edu.tr

Analysis of Strong Ground Motion Parameters for the Marmara Sea Earthquake (Mw 6.2) on April 23, 2025: Response Spectra, Arias Intensity, and Significant Duration

Kaan Hakan Coban¹ , Erdem Bayrak^{2,3} 

¹ Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, 61080 Trabzon, Türkiye

² Ataturk University, Earthquake Research Centre, 25240 Erzurum, Türkiye

³ Ataturk University, Engineering Faculty, 25240 Erzurum, Türkiye

ABSTRACT

This study evaluates the strong ground motion parameters from the Mw 6.2 earthquake that occurred in the Marmara Sea, approximately 24 km south of Silivri, on April 23, 2025. We analyzed the earthquake's acceleration records from various stations operated by AFAD. Additionally, we calculated response spectra, Arias intensities, and effective time for the recorded data. The calculated response spectra were compared with the design spectra defined in the Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018). The maximum ground acceleration and the highest spectral amplitudes were recorded at the 3415 Istanbul-Küçükçekmece station. We noted that the significant duration values at the stations generally ranged from 10 to 32 seconds. Our findings highlighted significant differences in the acceleration records attributable to local ground effects.

Keywords

Strong ground motion, Response spectrum, Arias intensity, Marmara Sea, Istanbul

Highlights

- * Evaluation of strong ground motion parameters
- * Calculation of response spectra and comparison with design spectra
- * Assessment of peak ground acceleration, Arias intensity, and significant duration of earthquakes

Manuscript

Research Article

Received: 01.06.2025

Revised: 05.09.2025

Accepted: 19.09.2025

Printed: 30.12.2025

DOI

10.46464/tdad.1711758

Corresponding Author

Kaan Hakan Coban

Email:

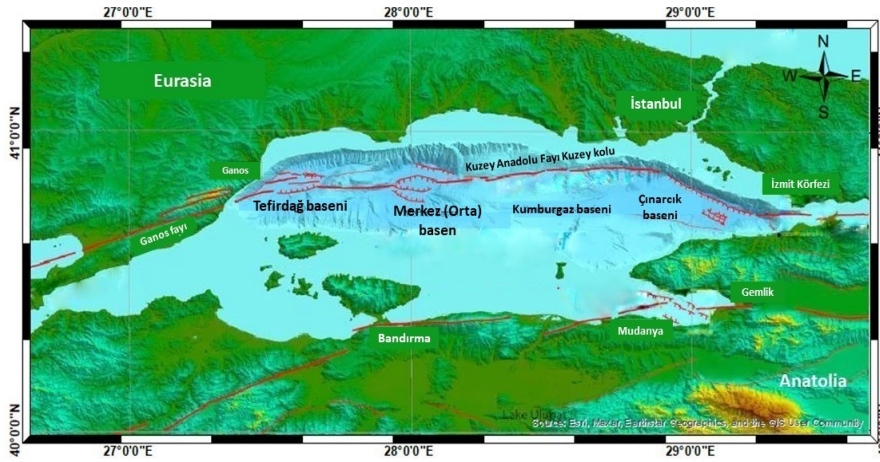
h.coban@ktu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Avrasya ve Anadolu levhaları arasında yer alan yaklaşık 1500 km uzunluğunda, sağ yanal doğrultu atımlı aktif bir fay sistemidir (Ketin 1948, Şengör 1979, Reilinger ve diğ. 1997). Bu fay zonunda yapılan istatistiki çalışmalar bölgenin deprem tehlikesinin oldukça yüksek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Erdik ve diğ. 2004, Kalkan ve diğ. 2009, Utkucu ve diğ. 2009, Bayrak ve diğ. 2011, Gülerce ve Ocak 2013, Alkan ve diğ. 2025). Doğu Anadolu'daki Karlıova üçlü eklem noktasından başlayarak kuzey Ege Denizi'ne kadar uzanan bu fay hattı, 20'nci yüzyıl boyunca doğudan batıya göç eden büyük depremlerle dikkat çekmiştir (Barka ve diğ. 2002). Erzincan (1939), Bolu-Gerede (1944), ve son olarak İzmit (1999) depremleri hem göç sürecinin hem de büyük depremlerin başlıca örnekleridir. Ancak 20'nci yüzyıldan bu yana kırılmamış tek büyük

segment, İstanbul'un güneyinde, Marmara Denizi'nde yer alan Ana Marmara Fayı (AMF) olarak bilinmektedir (Schmittbuhl ve diğ. 2015, Durand ve diğ. 2020, Karabulut ve diğ. 2021).

Jeofizik ve sismolojik çalışmalar, AMF'nin yapısal olarak karmaşık bir morfolojiye sahip olduğunu ve Tekirdağ, Orta, Kumburgaz ve Çınarcık havzaları olmak üzere dört ana segmente ayrıldığını göstermektedir (Schmittbuhl ve diğ. 2015). Bu segmentlerden Orta Havza'da asismik sürünme (creep) davranışı gözlemlenirken, Kumburgaz ve Çınarcık segmentleri kilitli olup önemli ölçüde gerilim biriktirmektedir (Bohnhoff ve diğ. 2013, Ergintav ve diğ., 2014, Schmittbuhl ve diğ., 2016). Bu kilitli segmentler, genel olarak İstanbul kıyılarına karşılık geldiğinden olası bir büyük depremin kente etkisi oldukça yüksek olabileceği belirtilmektedir. Bölgenin karmaşık tektonik yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

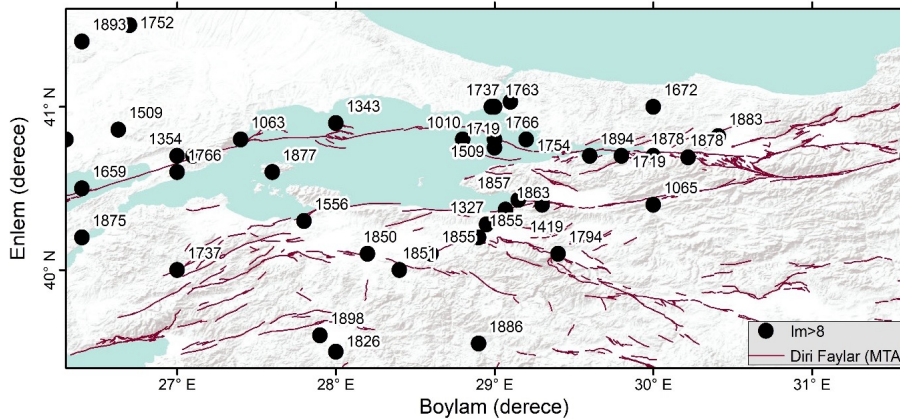


Şekil 1: Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi Bölgesi'ndeki tektonik haritası (Gasperini ve diğ. 2011'den değiştirilmiştir).

Figure 1: Tectonic map of the North Anatolian Fault in the Marmara Sea Region (modified from Gasperini et al. 2011).

İstanbul, tarih boyunca birçok yıkıcı depreme sahne olmuştur. Bunlardan bazıları 557, 989, 1509, 1766 ve 1894 yıllarındaki büyük depremlerdir ve bu depremler kentin sismik tarihinin bir göstergesidir (Ambraseys 2002). Bu depremler arasında özellikle 1509 depremi "Küçük Kıyamet" olarak anılırken, 1766 yılına ait Mayıs depremi Marmara Denizi'nin batısındaki bir segmentin kırılmasıyla ilişkilendirilmiştir (Bulut ve diğ.

2019, Şahin ve diğ. 2022). Marmara Denizinde 1766'dan bu yana büyük bir kırılma gerçekleşmemiş olması, bölgedeki gerilimin birikmeye devam ettiğini ve büyük bir deprem potansiyeli oluşturduğunu göstermektedir (Parsons ve diğ. 2000). Marmara bölgesi ve civarında 1000-1900 yılları arasında meydana gelen Şiddeti (Im) ≥ VIII olan tarihsel depremler Şekil 2'de verilmiştir.

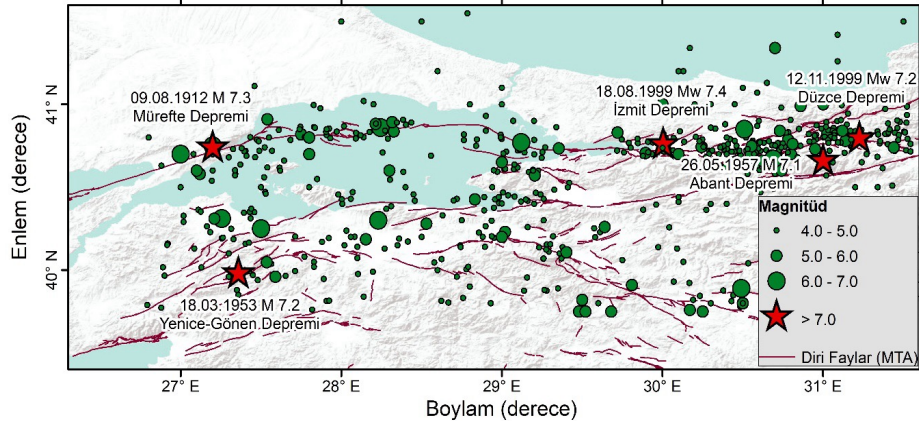


Şekil 2: 1000-1900 yılları arasında Marmara ve civarında meydana gelen şiddeti VIII ve daha büyük olan depremlerin episantr dağılımı (Deprem verileri AFAD (2025a)'dan alınmıştır.)

Figure 2: Epicentral distribution of earthquakes with intensity VIII and greater that occurred in and around Marmara between 1000-1900 (Earthquake data were taken from AFAD (2025a).)

İstanbul'u etkileyen Marmara Denizi ve çevresinde aletsel dönemde birçok yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Özellikle 9 Ağustos 1912'de gerçekleşen Şarköy-Mürefte (Ganos) depremi (Mw 7.4), Marmara'nın batısındaki Ganos segmentini kırarak büyük yıkıma yol açmıştır. (Ambraseys ve Jackson 2000). Daha doğuda, 1953 Gönen depremi (Mw 7.2) ve 1957 Abant depremi (Mw 7.1), bölgedeki gerilme birikiminin sürekliliğini göstermiştir. Ancak İstanbul'a yakın ve en yıkıcı depremlerden biri, 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw 7.4)

olup, doğu Marmara'daki segmentleri kırmış ve on binlerce can kaybına neden olmuştur (Barka 1999). Bu depremden sadece üç ay sonra 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Mw 7.2) meydana gelmiştir. Bu depremler, Marmara Denizi'nin altında kırılmamış durumda bulunan Ana Marmara Fayı segmentleri üzerindeki sismik tehlikenin önemini daha da artırmıştır. Marmara Denizi ve çevresinde aletsel dönemde 1900 ile günümüzde meydana gelen $M \geq 4.0$ depremlerin episantr dağılımı Şekil 3'te verilmiştir.



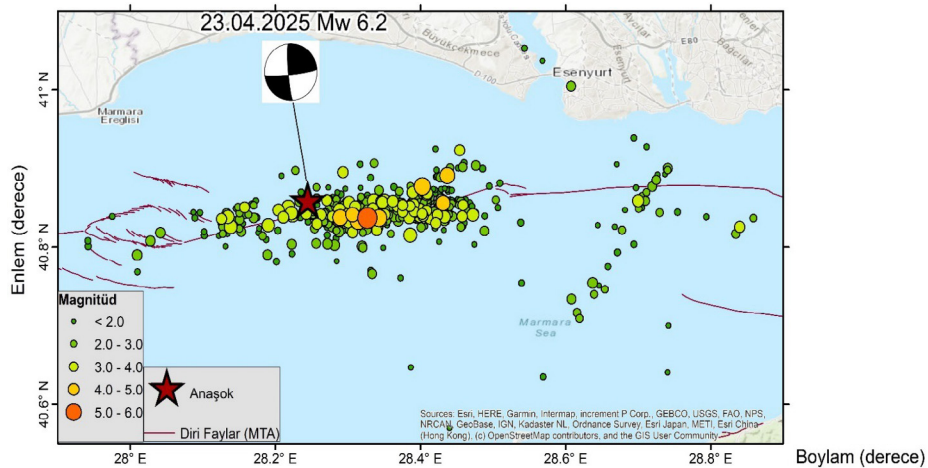
Şekil 3: 1900-2025 yılları arasında meydana gelen magnitüdü 4'den büyük olan depremlerin episantr dağılımı (Deprem verileri AFAD (2025b)'den alınmıştır.)

Figure 3: Epicentral distribution of earthquakes with magnitudes greater than 4 occurring between 1900-2025 (Earthquake data were taken from the AFAD (2025b).)

Son 10 yıllık periyot içerisinde önemli depremler incelendiğinde, 26 Eylül 2019 tarihinde meydana gelen Mw 5.8 büyüklüğündeki Silivri depremi sürünme (creep) gösteren Orta segment ile kilitli Kumburgaz segmenti arasındaki geçiş bölgesinde meydana gelmiştir. Orta büyüklükte bir deprem olsa da, bu olay İstanbul'da güçlü şekilde hissedilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, bu depremin AMF üzerinde değil, daha önce haritalanmamış, kuzeye eğimli bir ikincil fay üzerinde gerçekleştiğini ortaya koymuştur (İrmak ve diğ. 2021, Karabulut ve diğ. 2021). Bu fay, bölgedeki yapısal karmaşıklığın bir yansımasıdır (Şahin ve diğ. 2022). 26 Eylül 2019 depremi ardından yapılan Coulomb gerilme değişimi analizleri, olayın çevredeki diğer segmentler üzerinde ek gerilme yaratabileceğini ve bu segmentlerin kırılma olasılığını artırabileceğini ortaya koymuştur (Şahin ve diğ. 2022).

İstanbul genelindeki ivme kayıtları, özellikle Avcılar, Bakırköy ve Büyükçekmece gibi bölgelerde, yerel zemin koşullarının ve havza etkisinin sismik tehlikeyi artırabileceğini göstermektedir (Yenihayat ve diğ. 2023). Ayrıca, yapılan istatistiksel sismik tehlike çalışmaları ve zemin araştırmaları da bölgenin sismik tehlikesinin yüksek ve zemin etkilerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Çoban ve Sayıl 2020, Aydın ve diğ. 2022).

23 Nisan 2025 tarihinde saat 12:49'da Marmara Denizi'nde, Silivri'nin yaklaşık 24 km güneyinde, moment büyüklüğü (Mw) 6.2 olan bir deprem meydana gelmiştir. Depremin odak derinliği 4.91 km olarak belirlenmiştir (AFAD 2025c). Bu depremin episantr noktası ve odak mekanizma çözümü Şekil 4'te verilmiştir.

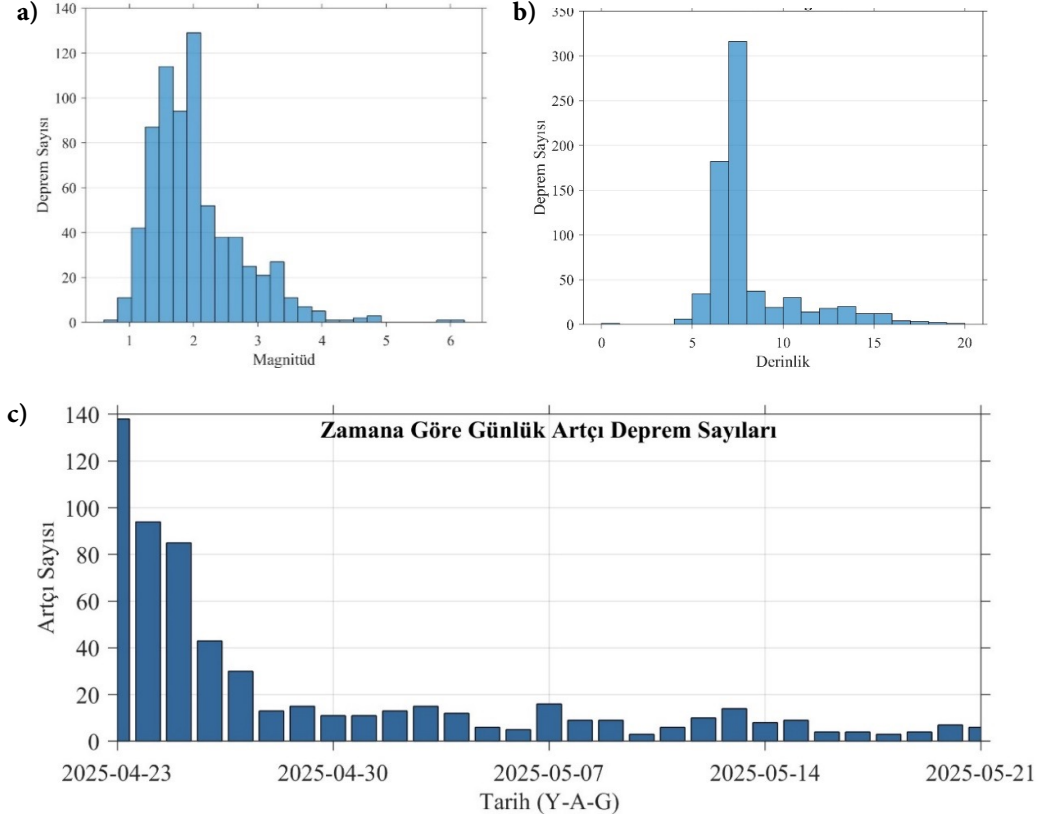


Şekil 4: 23.04.2025 Mw 6.2 depreminden sonra 1 ay sürede meydana gelen artçı depremlerin episantr dağılımı (Deprem verileri AFAD 2025b)'den alınmıştır.)

Figure 4: Epicentral distribution of aftershocks that occurred within 1 month after the 23.04.2025 Mw 6.2 earthquake (Earthquake data were taken from the AFAD (2025b).)

Anaşok sonrasında 24 Mayıs 2025 tarihine kadar 710'dan fazla artçı şok ($M \geq 0.7$) meydana gelmiştir. Bu artçı şokların episantr dağılımı Şekil 4' te ve sayılarının histogram gösterimi Şekil 5'te verilmiştir. İlk 72 saat içinde büyüklükleri 0.7 ile 4.1 arasında değişen 350'den fazla artçı şok meydana gelmiştir;

bu artçıların büyük çoğunluğu, ana şokun odak noktasının doğu ve kuzeydoğusunda yoğunlaşmıştır. Sismik aktivite özellikle Silivri açıklarındaki 15-20 km genişliğinde bir alanda kümelenmiştir. Bu dağılım, 2019 yılında meydana gelen Mw 5.8 Silivri depreminin ardından gözlemlenen artçı davranışıyla benzerlik göstermektedir.



Şekil 5: Anaşoktan sonraki bir ay içinde meydana gelen depremlere ait a) Magnitüd (Büyüklük) histogramı, b) Derinlik histogramı c) Zamansal dağılım histogramı

Figure 5: The earthquakes that occurred within a month after the Main Shock a) Magnitude histogram, b) Depth histogram c) Temporal distribution histogram

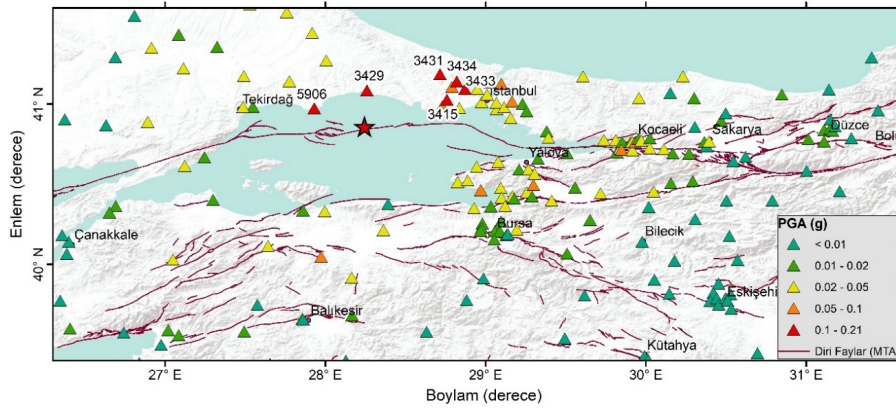
2025 yılında Marmara Denizi'nde meydana gelen Mw 6.2 büyüklüğündeki deprem ile 26 Eylül 2019 tarihinde gerçekleşen Mw 5.8 büyüklüğündeki Silivri depremi arasında dikkat çekici benzerlikler vardır. Bunlardan biri her iki depremin de Marmara Denizi'nin Kumburgaz segmenti yakınında, Ana Marmara Fayı'nın kuzey kolu üzerinde ya da bu faya paralel yapılar üzerinde meydana gelmesi (Irmak ve diğ. 2021, Karabulut ve diğ. 2021), diğeri ise özellikle Kumburgaz ile Orta Marmara segmentleri arasındaki geçiş zonu içinde meydana gelmiş olmasıdır (Şahin ve diğ. 2022). 2019 depremi sonrası yapılan Coulomb gerilme analizleri, özellikle doğuya doğru – kilitli Çınarcık segmentine – yönelik bir gerilme artışına işaret ederken (Irmak ve diğ. 2021, Şahin ve diğ. 2022), 2025 depremi ile birlikte, aynı bölgenin yeniden etkin hale geldiği görülmektedir.

Bu çalışmada 23 Nisan 2025 tarihinde saat 12:49'da Marmara Denizi'nde Mw 6.2 büyüklüğünde meydana gelen depremin kuvvetli yer hareketi kayıtları üzerinden detaylı

değerlendirilmesinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla en büyük yer ivmesi (PGA) değerinin 0.1 g ve üzeri olduğu 6 ve İstanbul Anadolu yakasını temsilen en yüksek PGA değerlerine sahip 2 kuvvetli yer hareketi istasyonu seçilmiştir. Bu istasyonlara ait ivme kayıtları grafikleri çizilmiş ve en büyük ivme değerleri belirlenmiştir. Bunun yanında, seçilen istasyonlardaki deprem kayıtlarından etkin süre belirlemek için Arias şiddeti hesaplanmıştır. Sonraki aşamada ivme verilerden tepki spektrumları oluşturulmuş ve istasyon konumlarına ve zemin özelliklerine göre Türkiye Bina Deprem yönetmeliğine (TBDY 2018) göre tasarım spektrumları oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. VERİ

23 Nisan 2025 tarihinde yerel saatle 12:49:09'da (UTC+3) Silivri açıklarında meydana gelen Mw 6.2 büyüklüğündeki deprem Marmara bölgesinde geniş çapta hissedilmiştir. Olay, İstanbul için önemli risk oluşturan ve sismik olarak aktif bir bölge olan KAFZ'ın batı segmenti boyunca meydana gelen doğrultu atımlı faylanma ile uyumludur.



Şekil 6: Marmara Denizi-Silivri depremi sonrası istasyonlarda kaydedilen en büyük ivme değerleri haritası (Kuvvetli yer hareketi istasyonu verileri (AFAD 2025c)'den alınmıştır.)

Figure 6: Map of the peak ground acceleration values recorded at the stations after the Marmara Sea-Silivri earthquake (Strong ground motion station data taken from (AFAD 2025c).)

Bu çalışmada kullanılan kuvvetli hareket kayıtları, Marmara bölgesindeki yoğun kapsama alanı da dahil olmak üzere ülke çapında 1000'den fazla istasyondan oluşan AFAD kuvvetli hareket ağından (AFAD 2025c) elde edilmiştir. Tüm istasyonlar üç eksenli ivmeölçerlerle kullanılmakta ve genellikle 100 Hz örnekleme frekansında veri kaydetmektedir. Veriler TADAS web sitesinden ASCII formatında indirilmiştir ve üç bileşen (KG, DB ve düşey) içermektedir. En az bir yatay bileşende en büyük yer ivmesi 0.05 g'yi aşan (PGA: En büyük yer ivmesi) istasyonlara ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Bu istasyonlar yaklaşık 25 km ile 142 km arasında değişen episantr uzaklığına sahip ve çeşitli yerel zemin koşullarını temsil etmektedir.

Zemin sınıflandırması, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile uyumlu olarak, en üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızına (V_{s30}) dayanmaktadır. Yönetmelikte yerel zemin sınıfları; ZA Sağlam, sert kayalar $V_{s30} > 1500$ m/s; ZB Az ayrılmış, orta sağlam kayalar $V_{s30} \sim 760 - 1500$ m/s; ZC Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar $V_{s30} \sim 360 - 760$ m/s; ZD Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları $V_{s30} \sim 180 - 360$ m/s; ZE Gevşek kum, çakıl veya yumuşak-katı kiltabakaları $V_{s30} < 180$ m/s olarak tanımlanmıştır. Seçilen istasyonlar için V_{s30} değerleri 157 m/s (ZE) ile 410 m/s (ZC) arasında değişmektedir (Tablo 1).

Tablo 1: 23.04.2025 Silivri açıklarından meydana gelen Mw 6.2 depreminde ivme değerinin 0.05 g (50gal) ve üzeri elde edildiği istasyonlara ait bilgileri (Kuvvetli yer hareketi istasyonu verileri (AFAD 2025c)'den alınmıştır.)

Table 1: Information on stations where the acceleration value was 0.05 g (50 gal) or higher during the Mw 6.2 earthquake off the Silivri coast on 23.04.2025 is available (Strong ground motion station data taken from (AFAD 2025c).)

Kod	İl	İlçe	PGA_KG (g)	PGA_DB (g)	PGA_D (g)	Repi (km)	Vs30 (m/sn)	ZS (TBDY)
3415	İstanbul	Küçükçekmece	0.205	0.134	0.073	47	283	ZD
3431	İstanbul	Arnavutköy	0.103	0.161	0.042	53	-	-
3434	İstanbul	Eyüp	0.162	0.098	0.062	57	-	-
5906	Tekirdağ	Marmaraereğlisi	0.108	0.070	0.029	29	224	ZD
3429	İstanbul	Silivri	0.072	0.107	0.032	25	230	ZD
3433	İstanbul	Sultangazi	0.106	0.062	0.022	58	-	-
3428	İstanbul	Avcılar	0.098	0.082	0.064	43	318	ZD
4108	Kocaeli	İzmit	0.080	0.045	0.013	142	157	ZE
3432	İstanbul	Başakşehir	0.051	0.064	0.045	53	-	-
3430	İstanbul	Ümraniye	0.061	0.047	0.016	79	379	ZC
1024	Balıkesir	Manyas	0.052	0.061	0.021	93	228	ZD
7715	Yalova	Armutlu	0.054	0.047	0.020	75	169	ZE
1631	Bursa	Orhangazi	0.053	0.031	0.009	98	410	ZC
3436	İstanbul	Beykoz	0.052	0.049	0.025	77	-	-
4123	Kocaeli	Gölcük	0.041	0.051	0.015	136	279	ZD

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1) Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtlarının Değerlendirilmesi

Çalışmada, deprem ivmesinin 0.1g ve üzeri kaydedildiği 3415, 3431, 3434, 5906, 3429 ve 3433 kodlu istasyonlar seçilmiştir (Tablo 1 ve Şekil 7). Bu istasyonların deprem episantrına uzaklıkları 25km ile 60km arasında değişmekte olup en yakın konumdaki istasyon 3429 kodlu istasyondur. Bu istasyonun DB bileşeninde yaklaşık 0.1g, KG bileşeninde 0.07g ve D bileşeninde ise 0.032g en büyük yer ivme değerleri elde edilmiştir (Tablo 1 ve Şekil 7). Bu istasyonların konumları

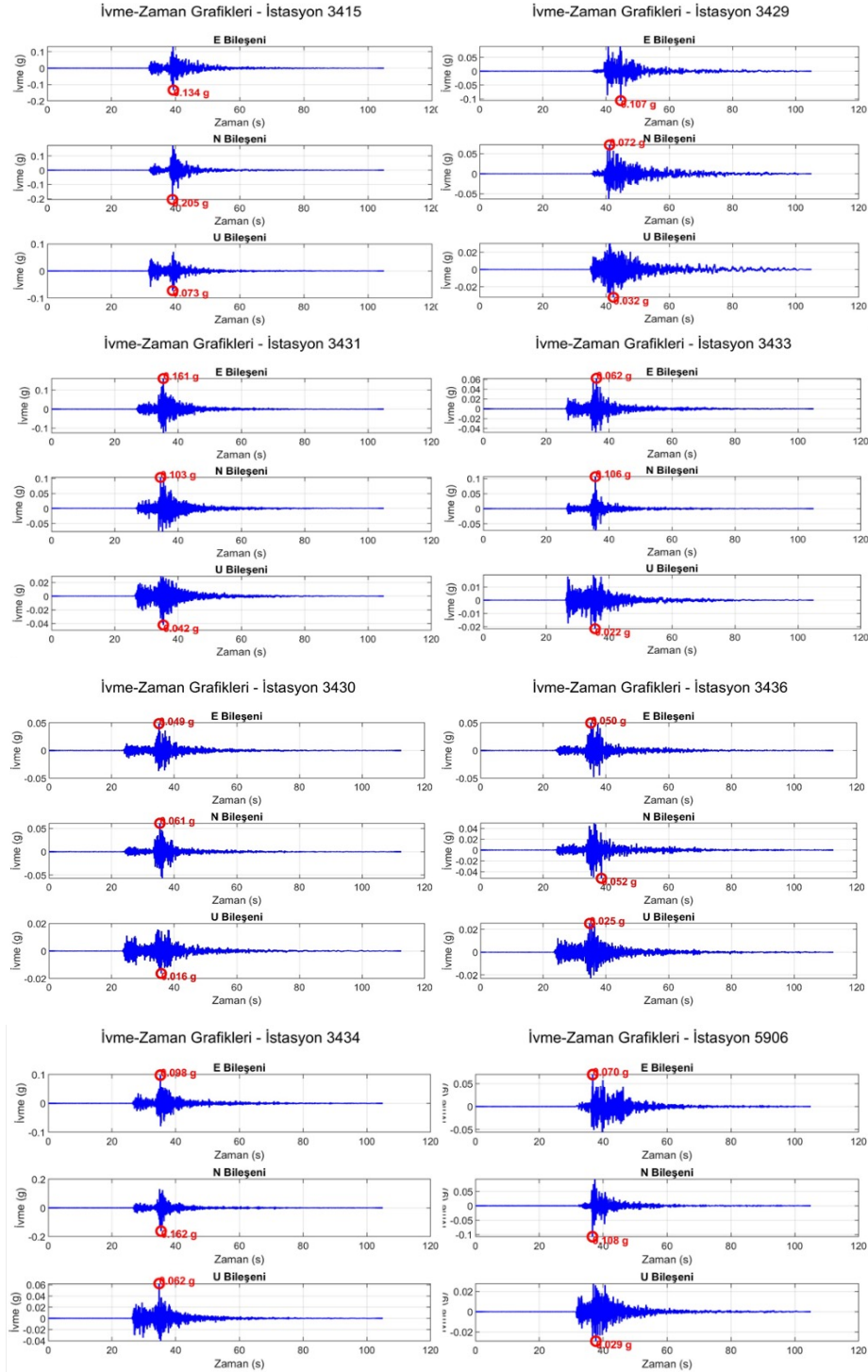
İstanbul-Avrupa yakasında olmasından dolayı İstanbul-Anadolu yakasını temsilen en yüksek pik ivme değerlerine sahip 3430 ve 3436 istasyonların kayıtlarıyla da analizler yapılmıştır (Tablo 1 ve Şekil 7).

En yüksek ivme değeri ise deprem episantrına (Repi) yaklaşık 47km mesafede bulunan Küçükçekmece ilçesinde kurulu olan 3415 kodlu istasyonun Kuzey-Güney bileşeninde yaklaşık 0.21g olarak elde edilmiştir (Şekil 6 ve Tablo 1). Bu istasyonun Doğu-Batı bileşeninde 0.134g ve düşey bileşeninde ise 0.073g

en büyük yer ivme değeri elde edilmiştir. Bu istasyonun Vs30 değeri 283 m/sn (AFAD 2025c) olup Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği zemin sınıflarına göre ZD'dir.

Tablo 1 incelendiğinde genellikle benzer deprem episantrına benzer uzaklıklarda bulunan istasyonlarda birbirine yakın PGA değerleri elde edilmiştir. Fakat deprem episantrına 142km uzaklıkta Kocaeli/İzmit'te konumlandırılmış 4108 kodlu istasyonda 0.08g en büyük yer ivme değeri elde edilmiştir.

Bu istasyon için Vs30 değeri 157 m/sn ve zemin sınıfı ZE olarak görülmektedir (Tablo 1). Deprem episantrına 136 km uzaklıkta Kocaeli/Gölcük'te bulunan 4123 kodlu istasyonda ise 0.051g en büyük yer ivme değeri elde edilmiş olup bu istasyonun Vs30 değeri 279 m/sn ve zemin sınıfı ZD olarak görülmektedir. Özellikle deprem episantrına uzak konumda bulunan bu iki istasyonda yüksek ivme değeri gözlenmesi yerel zemin özellikleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. İstasyonların düşey bileşenlerinde yatay bileşenlerine oranla oldukça düşük ivme değerleri gözlenmiştir.



Şekil 7: 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri depremine ait kuvvetli yer hareketi istasyonlarındaki ivme-zaman grafikleri (Şekiller üzerindeki kırmızı yazılar PGA değerlerini göstermektedir. E: Doğu-Batı, N: Kuzey-Güney ve U: Düşey bileşeni ifade etmektedir.)

Figure 7: Acceleration-time graphs from strong ground motion stations during the Marmara Sea-Silivri earthquake on April 23, 2025 (The red text on the figures indicates the PGA values, with E representing East-West, N for North-South, and U for the Vertical component.)

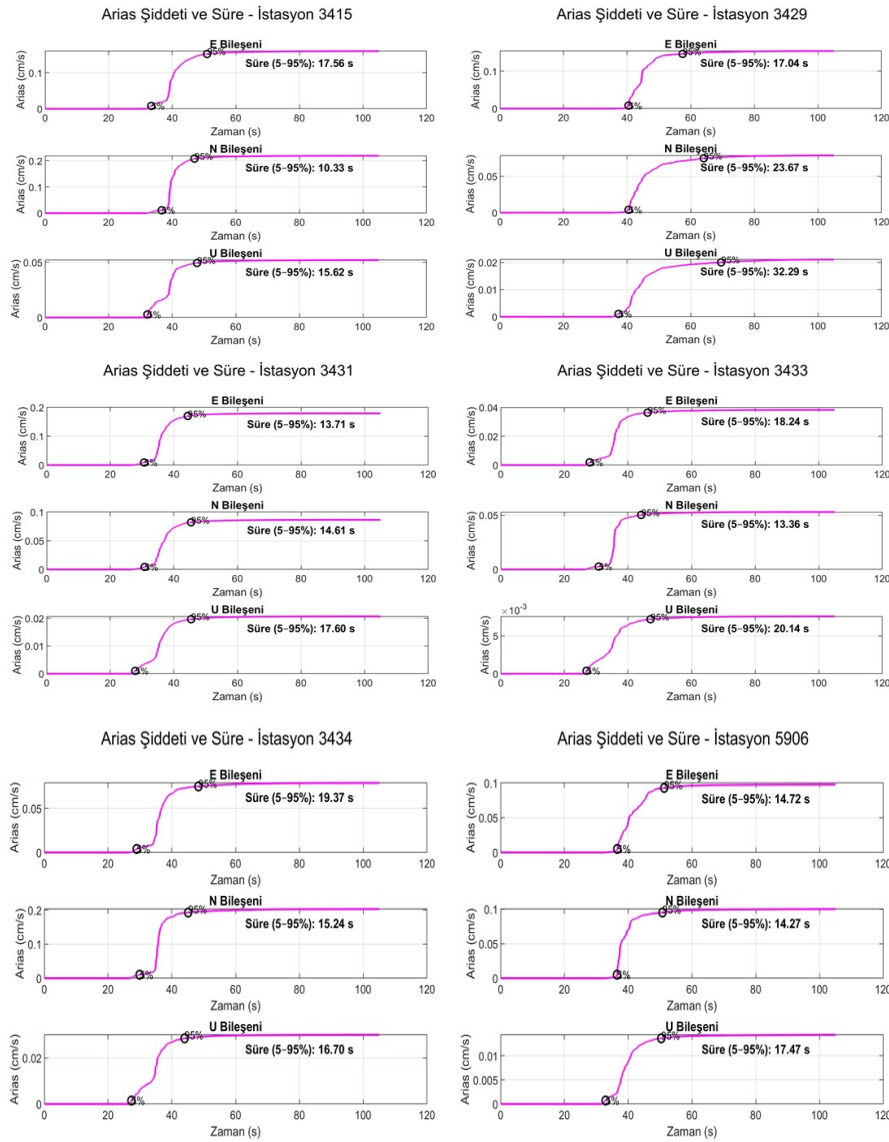
3.2) Arias Şiddeti, Etkin Süre ve Tepki Spektrumlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, deprem yer hareketlerinin enerji içeriğini ve yapılar üzerindeki potansiyel yıkıcılığını değerlendirebilmek amacıyla Arias şiddeti (IA) ve etkin süre (TD) parametreleri kullanılmıştır. Arias şiddeti, ivme-zaman verilerinden elde edilen ve yer hareketi sırasında zemine aktarılan toplam titreşim enerjisini temsil eden bir ölçüttür. Bu büyüklük, özellikle heyelanlar, zemin sıvılaşması ve yapısal hasar analizlerinde kullanılmakta olup, yapıya iletilen sismik enerjiyi doğrudan yansıtır (Arias 1970). Etkin süre ise yer hareketinin enerjisinin %5'inden %95'ine kadar olan kısmının meydana geldiği zaman aralığı olarak tanımlanır ve zemin davranışı ile yapıların sönüm tepkilerinin modellenmesinde kritik bir role sahiptir (Trifunac ve Brady 1975). Arias şiddeti, etkin süre için enerji yoğunluk eğrisinin (cumulative energy) %5 ile %95 eşik noktaları arasındaki zaman farkı ifade etmektedir (Zhang ve diğ. 2008). Eşitlik 1 ile ifade edilir.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt \quad (1)$$

Formülde; I_A : Arias Şiddeti (Arias Intensity), π : Matematiksel sabiti, g : Yerçekimi ivmesini, T : Deprem kaydının toplam süresini, $a^2(t)$: Zamanın fonksiyonu olarak ivmeyi ifade etmektedir.

Depremin en büyük yer ivmesinin 0.1g ve üzeri elde edildiği istasyonlar için Arias şiddetleri ve bu şiddete göre depremin süresi elde edilmiştir (Şekil 8). Bu istasyonlarda genel olarak deprem etkin süresi 15-20sn hesaplanmıştır. En büyük ivmenin 0.21g olarak elde edildiği 3415 kodlu istasyonun KG bileşeninde yaklaşık 10sn, DB bileşeninde 17.5sn ve düşey bileşeninde ise yaklaşık 15.6sn etkin süre elde edilmiştir (Şekil 8). Deprem episantırına en yakın konumda bulunan 3429 kodlu istasyonun KG bileşeninde yaklaşık 23.7sn, DB bileşeninde 17sn ve düşey bileşeninde ise 32sn etkin süre hesaplanmıştır. Bu istasyonda elde edilen en büyük yer ivmesinin 3415 kodlu istasyondan daha düşük olmasına rağmen depremin etkin süresinin daha uzun olduğu gözlenmiştir. Bu duruma depremin uzaklığı ve yerel zemin özelliklerinin neden olduğu söylenebilir.

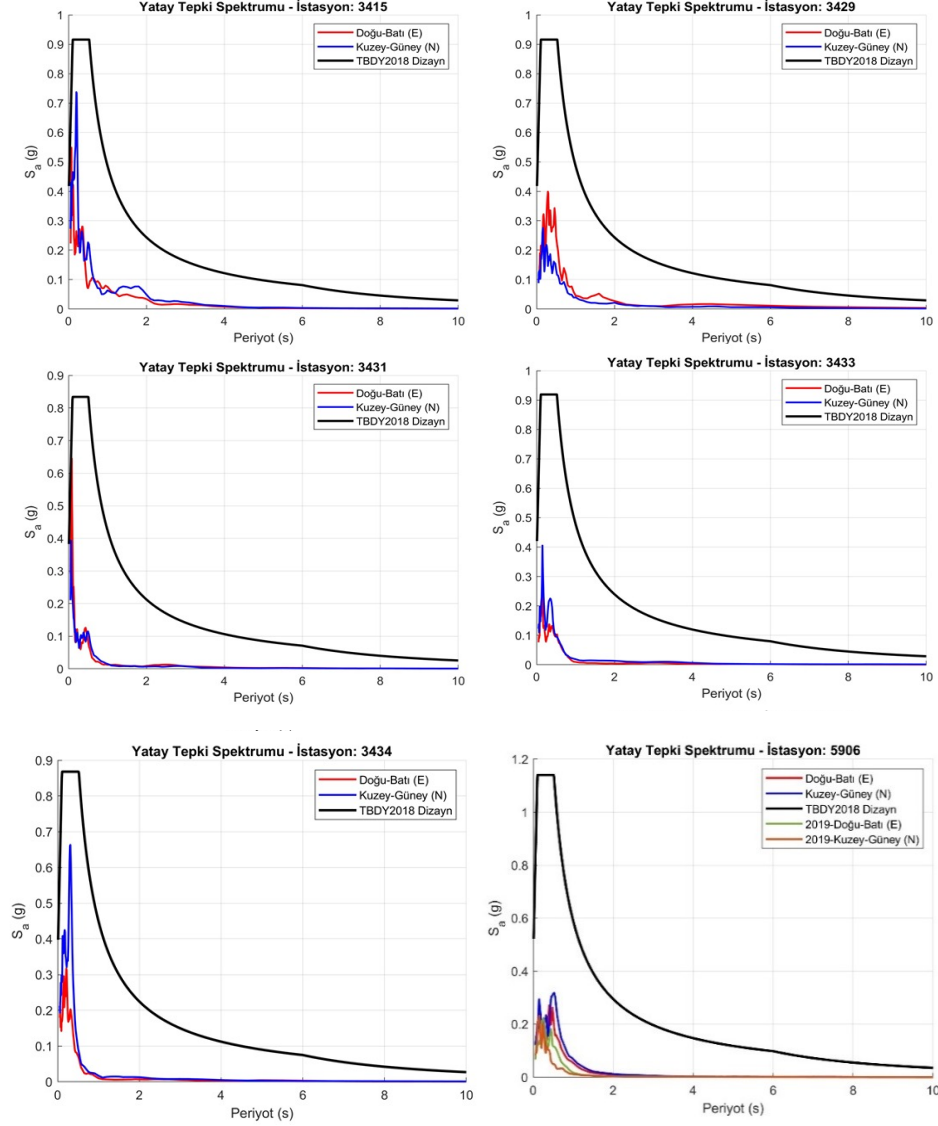


Şekil 8: 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri depreminde 0.1g ve üzeri PGA değeri elde edilen kuvvetli yer hareketi istasyonlarına ait Arias şiddeti grafikleri (E: Doğu-Batı, N: Kuzey-Güney ve U: Düşey bileşeni ifade etmektedir.)

Figure 8: Arias intensity graphs of strong ground motion stations with PGA values of 0.1g and above in the 23.04.2025 Marmara Sea-Silivri earthquake (E: East-West, N: North-South and U: Vertical component.)

Bu çalışmada, yer hareketlerinin frekansa bağlı davranışını değerlendirmek ve mühendislik yapıları üzerindeki potansiyel etkilerini analiz edebilmek amacıyla ivme tepki spektrumları hesaplanmıştır. Tepki spektrumu, tek serbestlik dereceli (TSD) bir sistemin, belirli bir doğal periyot ve sönüm oranı altında yer hareketine maruz kaldığında göstereceği maksimum tepkiyi (genellikle ivme) periyot bazında ifade eder. Seçilen tüm istasyonlar için, %5 sönüm oranına sahip ivme tepki spektrumları zaman ortamında konvolüsyon algoritmaları

kullanılarak hesaplanmıştır. TSD sistemlerin doğal periyot aralığı 0.01 ila 10.0 saniye arasında seçilmiştir; bu aralık hem rijit hem de esnek yapıların dinamik özelliklerini temsil etmeye olanak tanır. Bu yöntem sayesinde elde edilen spektrumlar, TBDY-2018 yapı yönetmeliğiyle karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Ayrıca, 26.09.2019 tarihinde Marmara denizi Silivri açıklarında meydana gelen ve episantr noktası 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri açıkları (M_w 6.2) depremine yakın M_w 5.8 olan depremin ortak olarak kaydedildiği 5906 istasyonundaki tepki spektrumları karşılaştırılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9: 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri depreminde 0.1g ve üzeri PGA değeri elde edilen kuvvetli yer hareketi istasyonlarına ait tepki spektrumları ile TBDY-2018'e göre elde edilen yatay elastik tasarım spektrumları

Figure 9: Response spectra of strong ground motion stations with PGA values of 0.1g and above obtained in the 23.04.2025 Marmara Sea-Silivri earthquake and horizontal elastic design spectra obtained according to TBDY-2018

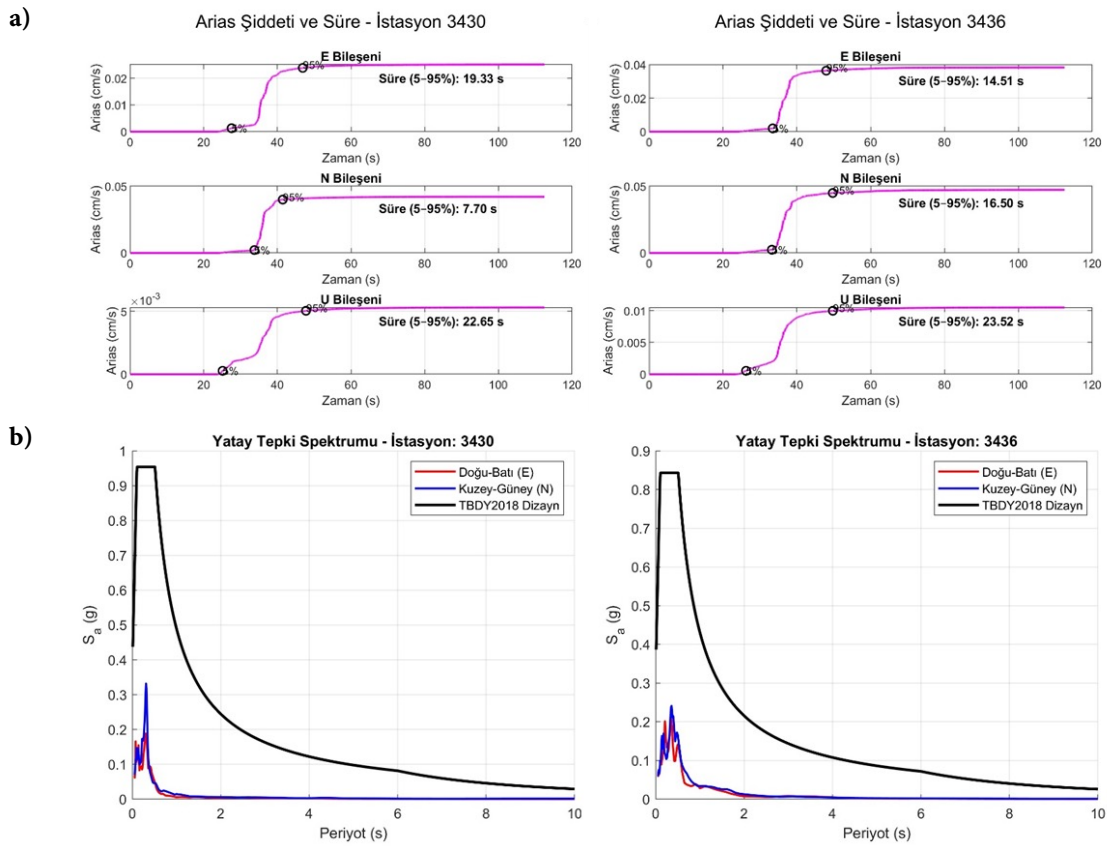
TBDY (2018) ile tasarım spektrumu elde edilirken çalışma alanının zemin sınıfı ve deprem durumu (DD) bilgileri ile hesaplanmaktadır. Bazı istasyonlara ait Vs30 bilgileri AFAD tarafından paylaşılmış ve bu değerlere göre zemin sınıfları (ZS) elde edilmiştir (Tablo 1). Tasarım spektrumu elde etmek için deprem durumu ikinci seviye (475 yıllık geri dönüş periyodu) DD2 olarak ele alınmıştır. Bu çalışma kapsamında seçilen altı istasyonda deprem spektrumlarının tüm periyotlarda tasarım

spektrumunun altında kaldığı görülmüştür (Şekil 9 ve Şekil 10). Tüm istasyonlarda, en yüksek spektral ivmeler kısa periyot aralığında (0-1 sn) yoğunlaşmıştır, bu da yer hareketinin esas olarak yüksek frekanslı içeriğe sahip olduğunu göstermektedir. 3415 ve 3431 istasyonlarında çok düşük periyotlarda en yüksek spektral ivmeler hesaplanırken 3429 ve 5906 istasyonlarında nispeten daha yüksek periyotlarda yüksek spektral ivmeler hesaplanmıştır. Analiz edilen istasyonlar arasında 3415

numaralı istasyon, D-B bileşeni için yaklaşık 0.25 g'a ulaşan en yüksek spektral ivme değerlerini sergilemektedir. Bu istasyon ZD sınıfı ($V_{s30} \sim 180 - 360$ m/s) düşük kayma dalgası hızına sahip yani zayıf zemin koşulları olmasından dolayı spektral genliklerde artışa neden olduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, diğer istasyonlar önemli ölçüde daha düşük genlikler sergilemekte, bu da yer hareketi yoğunluğunda mekânsal değişkenliğe işaret etmektedir. Tüm istasyonlarda gözlemlenen spektrumlar TBDY-2018 tasarım spektrumunun oldukça altındadır. Bu sonuç, kaydedilen yer hareketlerinin yönetmelik tarafından öngörülen sismik tehlike seviyesinden önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermektedir ve bu bulgular 6.2 büyüklüğündeki deprem ile uyumludur. Ayrıca, çoğu istasyonda KG ve DB bileşen spektrumları arasındaki benzerlik, iki yatay yön arasında nispeten eşit bir enerji dağılımı olduğunu

göstermektedir. Bununla birlikte, bazı istasyonlarda, özellikle 3415 ve 3429'da, muhtemelen kaynak yönelim etkileri veya yerel zemin koşulları nedeniyle farklılıklar göze çarpmaktadır. Bunun yanında 5906 istasyonunun kaydettiği 2019 (Mw 5.8) ve 2023 (Mw 6.2) depremlerinin tepki spektrumlarının hemen hemen aynı karakteristikte olduğu gözlenmiştir.

Marmara Denizi-Silivri açıkları depremin 0.1g ve üzeri ivme değerlerini kayıt eden istasyonlarının konumlarının genel olarak İstanbul-Avrupa yakasında olmasından dolayı İstanbul Anadolu yakasını temsilen en yüksek pik ivme değerlerine sahip 3430 ve 3436 istasyonlarıyla analizler yapılmıştır. Bu istasyonların kayıtlarından Arias şiddetleri, depremin etkin süresi ve tepki spektrumları hesaplanmış ve Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri depremin İstanbul-Anadolu yakasındaki kuvvetli yer hareketi istasyonlarına ait kayıtlarının a) Arias şiddeti grafikleri, b) tepki spektrumları ile TBDY-2018'e göre elde edilen yatay elastik tasarım spektrumları

Figure 10: 23 April 2025 Marmara Sea-Silivri earthquake records from strong ground motion stations in the Anatolian side of Istanbul a) Arias intensity graphs, b) response spectra and horizontal elastic design spectra obtained according to TBDY-2018

Bu istasyonlardan 3430 için KG bileşeninde yaklaşık 7.7sn, DB bileşeninde 19.3 sn ve düşey bileşeninde ise 22.6 sn, 3436 için KG bileşeninde yaklaşık 16.5sn, DB bileşeninde 14.5 sn ve düşey bileşeninde ise 23.5 sn etkin süre değerleri hesaplanmıştır. Tepki spektrumları incelendiğinde ise 3430 istasyonunun KG bileşeninin 0.3 g spektral ivme değerini aştığı bunun yanında 3436 istasyonunun KG bileşeninin 0.2 g spektral ivme değerini aştığı gözlenmiştir. İstasyonların PGA değerleri

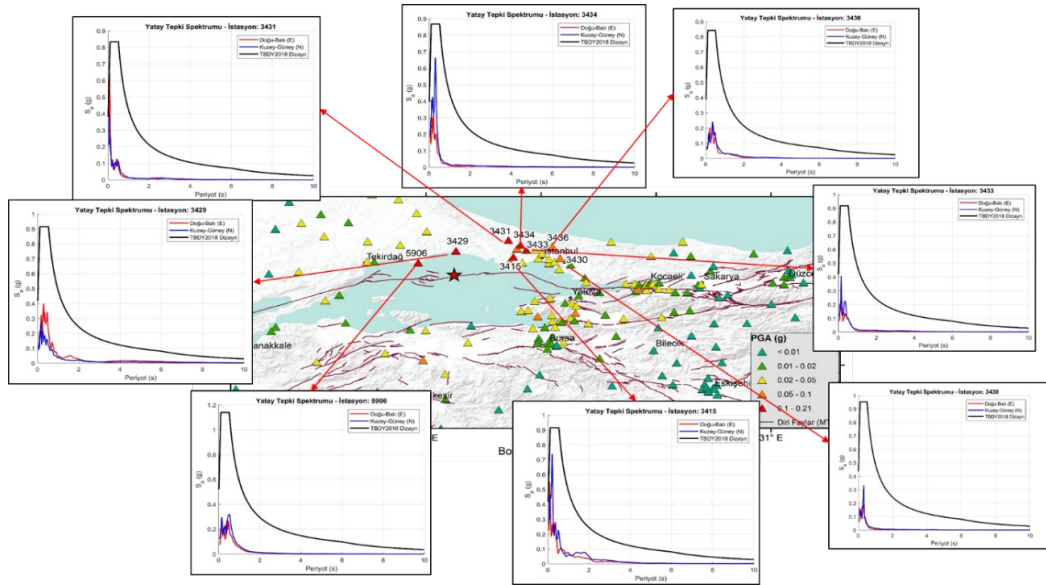
ise 3430 için KG bileşeninde en yüksek 0.061g iken 3436 için ise yine KG bileşeninde en yüksek 0.052g olarak belirlenmiştir. 3430 istasyonu ZC sınıfında ($V_{s30} \approx 360-760$ m/s) yer aldığından, depremin episantr konumu da göz önünde bulundurulduğunda nispeten düşük spektral ivme değerleri göstermesi doğaldır. Ayrıca depremin magnitudü ve episantr uzaklığı dikkate alındığında İstanbul'un Anadolu yakasında düşük spektral ivmelerin görülmesi beklenen bir durumdur.

İstasyonlar için hesaplanan tepki spektrumlarının yapı periyotlarıyla ilişkilendirilmesi açısından TBDY (2018)'de tanımlanan yapıların doğal titreşim periyodu hesaplamaları yapılmıştır. Yönetmeliği göre yapının birinci doğal titreşim periyodu (T_a) yaklaşık olarak Eşitlik 2 de gösterilen bağıntıyla hesaplanabilir.

$$T_a = C_t \cdot H_N^{3/4} \quad (2)$$

Bağıntıda; C_t : Taşıyıcı sistemi, H : yapının toplam yüksekliği (m), N : katsayısını ifade etmektedir. Taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden oluşan binalarda $C_t = 0.1$, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda $C_t = 0.08$, diğer tüm binalarda $C_t = 0.07$ olarak belirlenmiştir. Buna göre 3, 5 ve 10 katlı (Kat yüksekliği yaklaşık 3m alınmıştır) yapılar için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda 3 katlı yapılar için yaklaşık $T_a = 0.52$ s, 5 katlı yapılar için yaklaşık $T_a = 0.76$ s ve 10 katlı yapılar için

yaklaşık $T_a = 1.28$ s olarak belirlenmiştir. 23.04.2025 Marmara denizi-Silivri açıkları ($M_w 6.2$) depreminin en yüksek pik ivme değeriyle kayıt eden 3415 istasyonundaki Kuzey-Güney (N-S) bileşenindeki tepki spektrumunda maksimum değerler 0.2 sn civarında hesaplanmıştır. Sonuç olarak kısa periyotlu yapıların orta ve uzun periyotlu yapılara oranla daha yüksek kuvvetlere maruz kalabileceği görülmektedir. Rezonans açısından değerlendirildiğinde, yapıların doğal titreşim periyodunun deprem yer hareketinin baskın periyodu ile çakışması durumunda titreşim genliklerinin büyüyerek ciddi hasar oluşturmaktadır; bu bağlamda bölgedeki kısa katlı (örneğin 3 katlı, $T \approx 0.52$ s) yapılarda spektral pik ile tam örtüşme de periyotların yakınlığı rezonans riskini artırabilirken, orta ve uzun periyotlu yapılarda spektral pik ile doğal periyotlar arasındaki uyumsuzluk nedeniyle bu riskin görece düşük olacağı değerlendirilmiştir. 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri açıkları ($M_w 6.2$) depreminin istasyonlara göre en büyük yer ivme değerleri ve seçilen istasyonlarda tepki spektrumları ile tasarım spektrumların karşılaştırılması Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: 23.04.2025 Marmara Denizi-Silivri meydana gelen $M_w 6.2$ büyüklüğündeki deprem sonucu elde edilen PGA dağılım haritası ve yüksek ivme değerine sahip istasyonlardaki tepki ve tasarım spektrumları
Figure 11: PGA distribution map obtained from the $M_w 6.2$ magnitude earthquake that occurred in the Marmara Sea-Silivri on 23.04.2025 and the response and design spectra at the stations with the highest acceleration values

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 23 Nisan 2025'te Marmara denizi Silivri açıklarında meydana gelen ve Marmara bölgesi genelinde hissedilen $M_w 6.2$ büyüklükte deprem sırasında kaydedilen kuvvetli yer hareketleri parametrelerin değerlendirilmesi yapılmıştır. AFAD tarafından işletilen kuvvetli yer hareket istasyonlarından alınan ivme verileri, tepki spektrumları, Arias şiddeti ve etkin süresi değerleri depremin potansiyel etkisini belirlemek için kullanılmıştır.

Merkez üssünden 60 km uzaklıktaki birkaç istasyonda 0.1 g'yi aşan en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri kaydedilmiş olup, en yüksek yatay ivme (0.21 g) 3415 numaralı istasyonda

(Küçükçekmece) gözlenmiştir. Özellikle, merkez üssünden yaklaşık 47 km uzaklıkta bulunmasına rağmen, bu istasyon 3429 numaralı istasyon (Silivri) gibi daha yakındaki bazı istasyonlardan daha yüksek değerler kaydetmiş ve bu da yerel zemin koşulları, ana kaya derinliği ve olası yönelim etkilerinden olabileceği düşünülmektedir. Arias Şiddeti ve Etkin Süre, PGA değerleri ≥ 0.1 g olan istasyonlar için hesaplanmıştır. Arias Şiddeti, sarsıntının enerji içeriği hakkında bilgi verirken, etkin süre değerleri genellikle 10 ila 32 saniye arasında değişmektedir. Merkez üssüne en yakın olan 3429 kodlu istasyonda, daha düşük PGA değerlerine rağmen daha uzun süreler gözlemlenmiştir ve bu da uzun süreli enerji salınımı ve potansiyel zemin büyütmesi veya havza etkisinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Tepki

spektrumları, hem rijit hem de esnek yapıları kapsayacak şekilde %5 sönümleme ve geniş bir periyot aralığı (0.01–10 s) kullanılarak seçili istasyonlar için hesaplanmıştır. Tüm istasyonlardaki spektral ivmeler, DD-2 (475 yıllık geri dönüş periyodu) senaryosu için TBDY-2018 (Türk Bina Deprem Yönetmeliği) tasarım spektrumlarının altında kalmıştır. Bu, kaydedilen yer hareketlerinin açıkça algılanabilir olsa da, modern yönetmelikle tasarlanmış yapıları önemli ölçüde zorlayacak sarsıntı seviyelerine ulaşmadığını göstermektedir. Spektral piklerin kısa periyot aralığında (0-1 sn) yoğunlaşması yer hareketinin yüksek frekanslı doğasını yansıtmaktadır. Analiz edilen 6 istasyon arasında, 3415 numaralı istasyon en büyük spektral genlikleri (~ 0.25 g'ye kadar) göstermiştir, 3429 ve 5906 numaralı istasyonlar ise biraz daha uzun periyotlarda nispeten yüksek spektral değerler göstermiştir. İstanbul-Anadolu yakasını temsilen seçilen iki istasyonda (3430 ve 3436) ise PGA değerlerinin düşük olduğu (3430 için $PGA \sim 0.05g$, 3436 için $PGA \sim 0.06g$), bu istasyonların tepki spektrumları incelendiğinde ise KG bileşenlerinin 0.2 g spektral ivme değerini aştığı gözlenmiştir. Ayrıca, zemin sınıfları ZD-Vs30=180–360 m/s bandındaki yumuşak–orta yumuşak zemin ve kıyı/ova dolgularının hâkim olduğu jeomorfolojide olan 3429 ve 5906 istasyonlarında spektral ivme değerlerinin yüksek olması bir nedeni de bölgesel zemin koşullarının etkisi olarak düşünülmektedir. Çoğu istasyondaki iki yatay bileşen tepki spektrumu arasındaki genel benzerlik olasa da bazı durumlarda küçük farklılıklar yerel zemin etkilerine ve olası kaynakla ilgili anizotropilere işaret etmektedir. Meydana gelen depremin tepki spektrumları ile yapı periyotları arasındaki değerlendirmeler sonucunda kısa periyotlu yapıların orta ve uzun periyotlu yapılara oranla daha yüksek kuvvetlere maruz kalacağı belirlenmiştir. 26.09.2019 (Mw 5.8) ve 23.04.2025 (Mw 6.2) Marmara Denizi-Silivri açıklarında meydana gelen ve episantr noktaları birbirine yakın olan depremlerin

kaydedildiği 5906 istasyonundakitepki spektrumlarının hemen hemen aynı karakteristikte olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, Marmara Denizi altındaki kilitli AMF segmentleri, bir sismik boşluk (seismic gap) olarak tanımlanmakta ve gelecekte büyük bir depremin gerçekleşme olasılığı yüksek görülmektedir. Bu durum, İstanbul gibi yüksek nüfus yoğunluğuna ve kırılğan yapı stokuna sahip bir şehir için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Ayrıca, İstanbul'daki yapı stokunun büyük kısmı TBDY (2018) yönetmeliği öncesi göre inşa edilmiş olmasından dolayı mevcut yapıların performans analizlerinin güncel yönetmeliğe göre değerlendirilmesi ve gerekli önlemlerin alınması deprem zararlılarının azaltılması açısından önerilmektedir. TBDY(2018) öncesi yapı stoku, deprem bölgeleri üzerinden tanımlanan ivme değerleriyle tasarlandığı için yerel zemin koşullarını yeterince yansıtmamaktadır. Buna karşılık son yönetmelikte konum bazlı ivme değerleri esas alındığından, eski yapılar deprem etkilerine karşı daha kırılğan olabilir. TBDY (2018) öncesi yapı stokunun potansiyel kırılğanlığını azaltmak için öncelikle risk bazlı envanter ve hızlı tarama yapılması; ardından yüksek riskli yapıların yerel zemin etkileriyle birlikte detaylı değerlendirilmesi ve güçlendirme (yumuşak kat düzeltme, bağlantı takviyesi, perde/çerçeve güçlendirme) uygulanması önerilmektedir. Bunun yanında, güncellenmiş sismik tehlike modelleri, erken uyarı sistemleri ve deprem dirençli kentsel planlama stratejileri, bu tehdidi azaltmada kritik öneme sahiptir. 23 Nisan 2025 depremi sırasında kaydedilen yer hareketleri parametreleri, PGA, Arias yoğunluğu ve spektral içerikteki mekansal değişkenlik, sismik tehlike değerlendirmesinde hem kaynak hem de bölgeye özgü özelliklerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, yer hareketi tahminini ve sismik tasarımı iyileştirmek için yüksek çözünürlüklü yerel saha karakterizasyonunun gerekliliğini vurgulamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar değerlendirmeleri ve görüşleri için editöre ve hakemlere teşekkürlerini sunarlar. Çalışmada deprem verileri Türkiye Cumhuriyeti Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD)-Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (TADAS) üzerinden alınmıştır. Oluşturulan haritalardaki fay bilgisi Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Jeoloji harita görüntüleyicisi kullanılarak sayısallaştırılmaktadır (Emre ve diğ. 2013). Yazarlar kurumlara açık veri paylaşımı için teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

AFAD, 2025a. Tarihsel Dönem Deprem Kataloğu (2000 BC-1900 AD), T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü Deprem Dairesi Başkanlığı, Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/event-historical>.

AFAD, 2025b. Deprem Kataloğu, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü Deprem Dairesi Başkanlığı, Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>.

AFAD, 2025c. Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (TADAS), T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara, Erişim adresi: <https://tadas.afad.gov.tr/>.

Alkan H., Öztürk S., Bektaş Ö., Büyüksaraç A., 2025. Statistical and seismotectonic analyses of the Marmara region under existing stress regime in the west of the NAFZ, Acta Geophysica, 73(2), 1117-1136.

- Ambraseys N., 2002. The seismic activity of the Marmara Sea region over the last 2000 years, *Bull Seismol Soc Am*, 92(1):1-18.
- Ambraseys N.N., Jackson J.A., 2000. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500, *Geophysical Journal International*, 141(3), 1-24.
- Arias A., 1970. A measure of earthquake intensity, In R. J. Hansen (Ed.), *Seismic Design for Nuclear Power Plants* MIT Press, pp. 438-483.
- Aydın U., Pamuk E., Özer Ç., 2022. Investigation of soil dynamic characteristics at seismic stations using H/V spectral ratio method in Marmara Region, Turkey, *Natural Hazards*, 110(1), 587-606.
- Barka A., Akyüz H.S., Altunel E., Sunal G., Çakir Z., Dikbas A., Yerli B., Armijo R., Meyer B., de Chabaliér J.B., Rockwell T., Dolan J.R., Hartleb R., Dawson T., Christofferson S., Tucker A., Fumal T., Langridge R., Stenner H., Lettis W., Bachhuber J., Page W., 2002. The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 İzmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 43-60, doi: 10.1785/0120000841.
- Barka A., 1999. The 17 August 1999 İzmit earthquake, *Science*, 285(5435), 1858-1859.
- Bayrak Y., Çınar H., Bayrak E., 2011. The North Anatolian Fault Zone: an evaluation of earthquake hazard parameters, In *New Frontiers in Tectonic Research-At the Midst of Plate Convergence*, IntechOpen.
- Bohnhoff M., Bulut F., Dresen G., Malin P.E., Eken T., Aktar M., 2013. An earthquake gap south of Istanbul, *Nature communications*, 4(1), 1999.
- Bulut F., Aktuğ B., Yaltırak C., Doğru A., Özener H., 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.
- Çoban K.H., Sayıl N., 2020. Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones, *Arabian J. Geosci.*, 13: 971.
- Durand V., Bentz S., Kwiatak G., Dresen G., Wollin C., Heidbach O., Martínez-Garzón P., Cotton F., Nurlu M., Bohnhoff M., 2020. A two-scale preparation phase preceded an Mw 5.8 earthquake in the Sea of Marmara Offshore Istanbul, Turkey, *Seismological Society of America*, 91(6), 3139-3147.
- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye, ISBN: 978-605-5310-56-1.
- Erdik M., Demircioğlu M., Sesetyan K., Durukal E., Siyahi B., 2004. Earthquake hazard in Marmara region, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(8), 605-631.
- Ergintav S., Reilinger R.E., Çakmak R., Floyd M., Cakir Z., Doğan U., King R.W., McClusky S., Özener H., 2014. Istanbul's earthquake hot spots: geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5783-5788.
- Gasperini L., Polonia A., Çağatay M.N., Bortoluzzi G., Ferrante V., 2011. Geological slip rates along the North Anatolian Fault in the Marmara region, *Tectonics*, 30(6).
- Gülerce Z., Ocak S., 2013. Probabilistic seismic hazard assessment of Eastern Marmara Region, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, 1259-1277.
- Irmak T.S., Yolsal-Çevikbilen S., Eken T., Doğan B., Erman C., Yavuz E., Taymaz T., 2021. Source characteristics and seismotectonic implications of the 26 September 2019 Mw 5.7 Silivri High-Kumburgaz Basin earthquake and evaluation of its aftershocks at the North Anatolian Fault Zone (Central Marmara Sea, NW Turkey), *Geophysical Journal International*, 227(1), 383-402.
- Kalkan E., Gülkan P., Yılmaz N., Çelebi M., 2009. Reassessment of probabilistic seismic hazard in the Marmara region, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(4), 2127-2146.
- Karabulut H., Güvercin S.E., Eşiköy 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.
- Ketin İ., 1948. Über die tektonisch-mechanischen Folgerungen aus den großen anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums, *Geol Rundsch* 36:77-83.
- Parsons T., Toda S., Stei R.S., Barka A., Dieterich J.H., 2000. Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: an interaction-based probability calculation, *Science*, 288(5466), 661-665.
- Reilinger R.E., McClusky S.C., Oral M.B., King R.W., Toksoz M.N., Barka A.A., Sanli I., 1997. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B5), 9983-9999.
- Schmittbuhl J., Karabulut H., Lengliné O., Bouchon M., 2015. Seismicity distribution and locking depth along the Main Marmara Fault, Turkey, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 954-965.
- Schmittbuhl J., Karabulut H., Lengliné O., Bouchon M., 2016. Longlasting seismic repeaters in the Central Basin of the Main Marmara Fault, *Geophys. Res. Lett.*, 43(18), 9527-9534.

Şahin M., Yaltırak C., Bulut F., Garagon A., 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 and Space*, 74(1), 1-16.

Şengör A.M.C., 1979. The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance, *J Geol Soc London*, 136:269-282.

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.

Trifunac M.D., Brady A.G., 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581-626.

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, *Natural Hazards*, 50, 45-71.

Yenihayat N., Çaktı E., Şeşetyan K., 2024. Stochastic ground motion simulation of the 26 September 2019 Mw 5.8 Silivri (İstanbul) earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(4), 1605-1633.

Zhang Y., Wang Y., Wang R., 2008. Characterization of strong ground motions using significant duration and Arias intensity, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(1), 20-28, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.006>.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Çalışma verisi İstanbul ve civarında AFAD tarafından işletilen kuvvetli yer hareketi istasyonlarından alınmıştır (AFAD 2025c). Çalışmada tarihsel (AFAD 2025a) ve aletsel (AFAD 2025b) deprem verisi AFAD'ın ilgili web adreslerinden alınmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Makalemiz ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (Author Contributions)

- Çalışmanın tasarlanması (Designing of the study): K.H.Ç., E.B.
- Literatür araştırması (Literature research): K.H.Ç., E.B.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (Fieldwork, collection/ compilation of data): K.H.Ç., E.B.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (Processing/analysis of data): E.B., K.H.Ç.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (Preparation of figures/ tables/software): E.B., K.H.Ç.
- Bulguların yorumlanması (Interpretation of findings): E.B., K.H.Ç.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (Writing, editing and checking of manuscript): K.H.Ç., E.B.