

26 Eylül 2019 Silivri Açıkları (Marmara Denizi) Depreminin Kuvvetli Yer Hareketi Verilerinin Değerlendirilmesi

Abdullah Can ZÜLFİKAR^{1*}, Senem TEKİN², Seyhan Okuyan AKCAN³, Methiye Gündoğdu GÖK¹

ÖZET: 26 Eylül 2019 günü Türkiye yerel saati 13.59'da Silivri açıklarında (Marmara Denizi) Kuzey Anadolu Fay hattı Kumburgaz segmenti üzerinde 6.99 km derinlikte büyüklüğü Mw 5.8 olan deprem meydana gelmiştir. Deprem Tekirdağ ve İstanbul başta olmak üzere Yalova, Kocaeli, Bursa ve Kırklareli illerinde hissedilmiştir. 26 Eylül Silivri depremi, 1999 Kocaeli (Mw 7.6) ve 1999 Düzce (Mw 7.1) depremleri ve artçılarından sonra bölgeyi etkileyen en büyük deprem olması nedeni ile önemlidir. Bu çalışma kapsamında Mw 5.8 Silivri deprem yer hareketi kayıtları incelenmiştir. Yer hareketi parametresi Maksimum Yer İvmesi (PGA), 2014 Yeni Nesil Yer Hareketi Tahmin denklemleri (YHTD - Next Generation Attenuation -NGA- Relations) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yer hareketi parametreleri (MMI, PGA, Sa 0.2 s, Sa 1.0 s) dağılım haritaları oluşturularak, kaydedilmiş yer hareketleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca öncü ve artçı depremler değerlendirilerek orta ölçekli Marmara Denizi depremlerinin karakteristiği ortaya konmuştur. Ortaya çıkan enerji miktarı geçmiş büyük ölçekli depremler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: 26 Eylül 2019 Silivri Depremi, Yer hareketi kayıtları, NGA-YHTD.

Evaluation of Strong Ground Motion Records of September 26, 2019 Offshore Silivri (Marmara Sea) Earthquake

ABSTRACT: On September 26, 2019 at 13:59 Turkish local time, on the Kumburgaz segment of the North Anatolian fault-line, an offshore event, Silivri (Marmara Sea) Earthquake with a magnitude of Mw 5.8 at the depth of 6.99 km occurred. The earthquake was felt especially in the nearby cities Tekirdag and Istanbul, and other cities Yalova, Kocaeli, Bursa and Kırklareli in the region, as well. The September 26 Silivri earthquake is important because, it is the biggest earthquake affecting the region after 1999 Kocaeli (Mw 7.6) and 1999 Duzce (Mw 7.1) earthquakes and their aftershocks. In this study, Mw 5.8 Silivri earthquake ground motion records were examined. The ground motion parameter, Peak Ground Acceleration (PGA), was evaluated using the 2014 Next Generation Attenuation Relations (Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)). In addition, distribution maps of ground motion parameters (MMI, PGA, Sa 0.2 s, Sa 1.0 s) were generated and compared with the recorded ground motions. The amount of energy released during the earthquake has been compared with the past large-scale earthquakes.

Keywords: September 26, 2019 Mw 5.8 Silivri Earthquake, Ground Motion Records, NGA-GMPEs.

¹Abdullah Can ZÜLFİKAR (Orcid ID: 0000-0001-6610-3334), Methiye Gündoğdu GÖK (Orcid ID: 0000-0002-77519-5223), Department of Civil Engineering, Gebze Technical University, Kocaeli, Turkey

² Senem TEKİN (Orcid ID: 0000-0001-7734-9700), Department of Geological Engineering, Çukurova University, Adana, Turkey

³Seyhan Okuyan AKCAN (Orcid ID: 0000-0001-6824-8182), Department of Civil Engineering, Bogaziçi University, Istanbul, Turkey

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Can ZÜLFİKAR, e-mail: aczulfikar@gtu.edu.tr

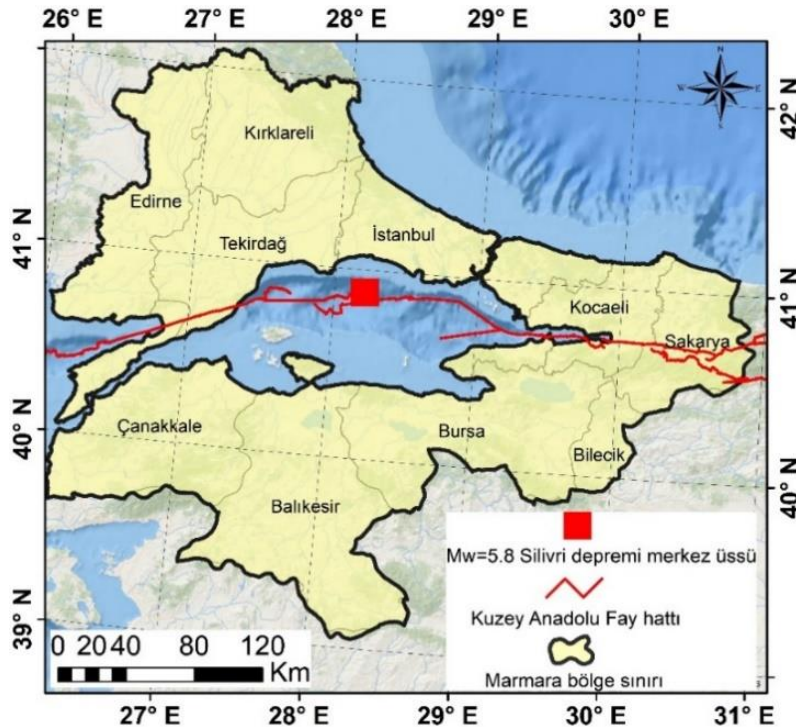
GİRİŞ

Dünya’da jeolojik, iklimik, biyolojik, sosyal ve teknolojik olmak üzere 5 ana başlıkta doğal afetler meydana gelmektedir. Jeolojik afetlerden biri olan depremler, can ve mal kaybına sebep olmaları sebebiyle insan yaşamını olumsuz yönde etkileyen, en büyük hasara yol açan doğa olaylarından biridir. Türkiye, dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almakta olup, güncel levha hareketlerinde meydana gelen çok sayıda levha içi aktif faylar, transform fay sistemleri gibi aktif fay sistemlerin oluşturduğu depremlere maruz kalmaktadır. 1900 – Şubat 2020 tarihleri arasında merkez üssü Türkiye kara sınırları içerisinde olan 716 adet büyüklüğü 5’den büyük deprem kaydı bulunmakta olup bu depremlerden 91 tanesi Kuzey Anadolu Fay zonunda meydana gelmiştir (Anonim1, 2020).

Mw 5.8 Silivri açıkları (Marmara Denizi) depremi (Şekil 1) 26 Eylül 2019 günü Türkiye yerel saati 13.59’da 6.99 km derinlikte meydana gelmiştir (AFAD, 2019). Tekirdağ ve İstanbul başta olmak üzere Yalova, Kocaeli, Bursa, Kırklareli illeri depremi hissetmiştir. Deprem sonrası yapılan odak mekanizma çözümleri ve çalışmalar, depremin K79°D doğrultulu, 39 km uzunluğundaki sağ yanal doğrultu atım karakterli KAFZ’nun Kumburgaz segmentinden kaynaklanmış olduğunu göstermektedir (MTA, 2019). Bölgede 24 Eylül 2019 tarihinde de 4.8 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir.

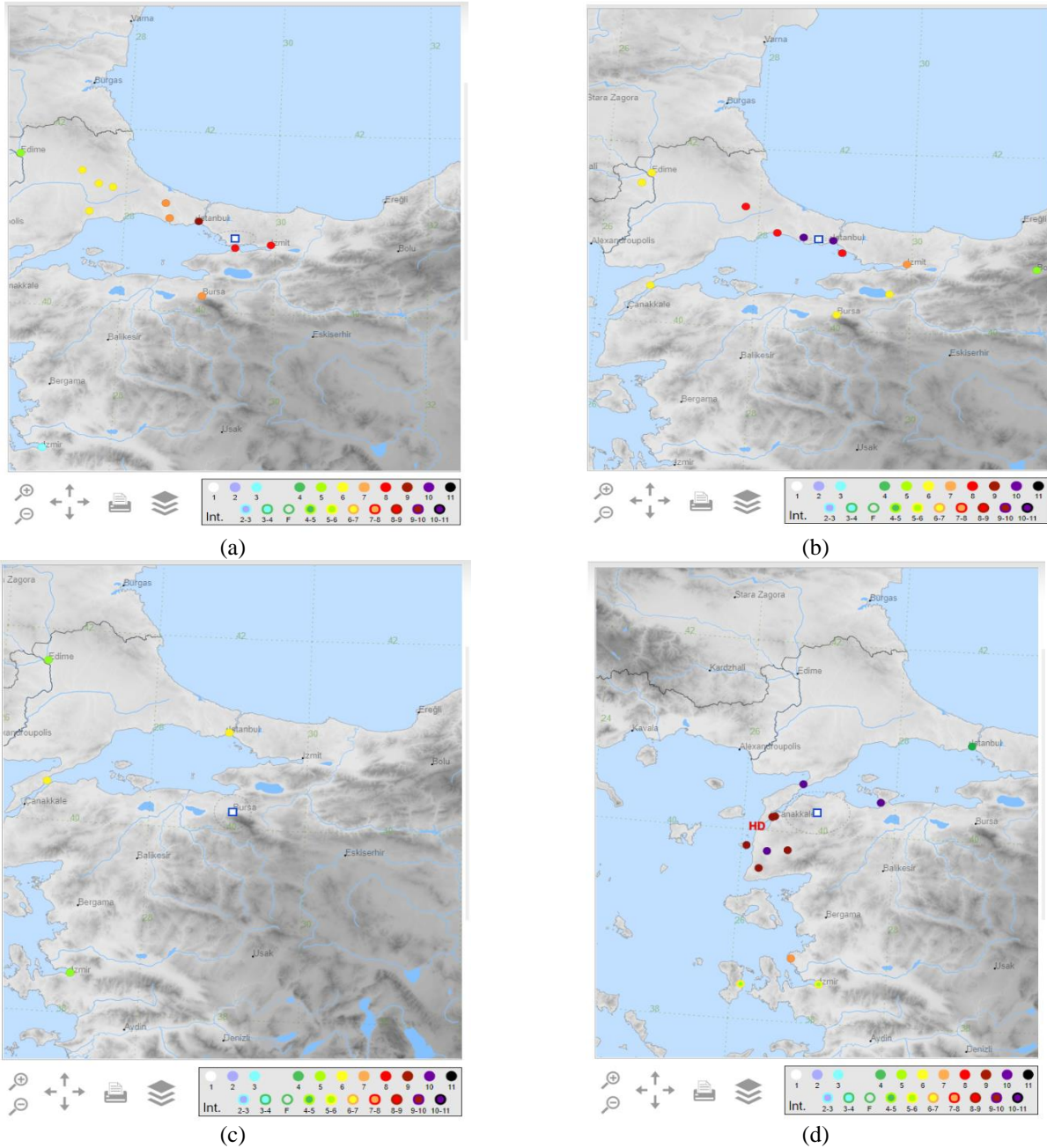
26 Eylül Silivri depremi, 1999 Kocaeli Mw 7.6 ve 1999 Düzce Mw 7.1 depremleri ve artçılarından sonra bölgeyi etkileyen en büyük deprem olması nedeni ile önemlidir.

Bu çalışmada bölgenin sismo-tektonik aktivitesi çalışılarak, depreme ait kuvvetli yer hareketi verileri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, depremin merkezine yakın istasyonlardan alınan yer hareketi kayıtları değerlendirilmiş, yer hareketi parametrelerinin uzaklık ile değişimi ve 2014 Yeni Nesil Yer Hareketi Tahmin denklemi (Douglas, 2019) (NGA-Next Generation Attenuation)-Yer Hareketi Tahmin Denklemleri (YHTD) ile uyumu irdelenmiştir. Depremin etki alanındaki yer hareketi parametreleri; (MMI-Modified Mercalli Intensity - Şiddet, PGA-Maksimum Yer İvmesi, Sa 0.2 - 0.2 s Spektral İvme, Sa 1.0 - 1.0 s Spektral İvme) dağılım haritaları elde edilmiştir. Ayrıca öncü ve artçı depremler değerlendirilerek orta ölçekli Marmara Denizi depremlerinin karakteristiği ortaya konmuştur.

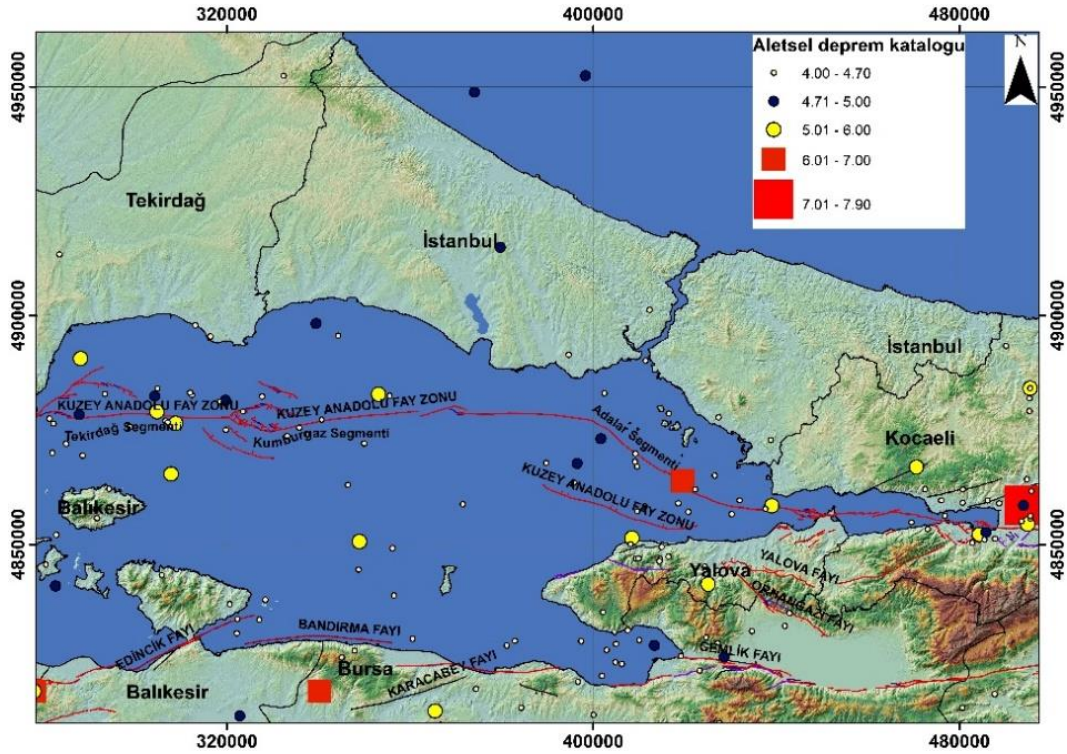


Şekil 1. Deprem merkez üssü ve civarına ait diri fay haritası (Emre ve ark., 2013).

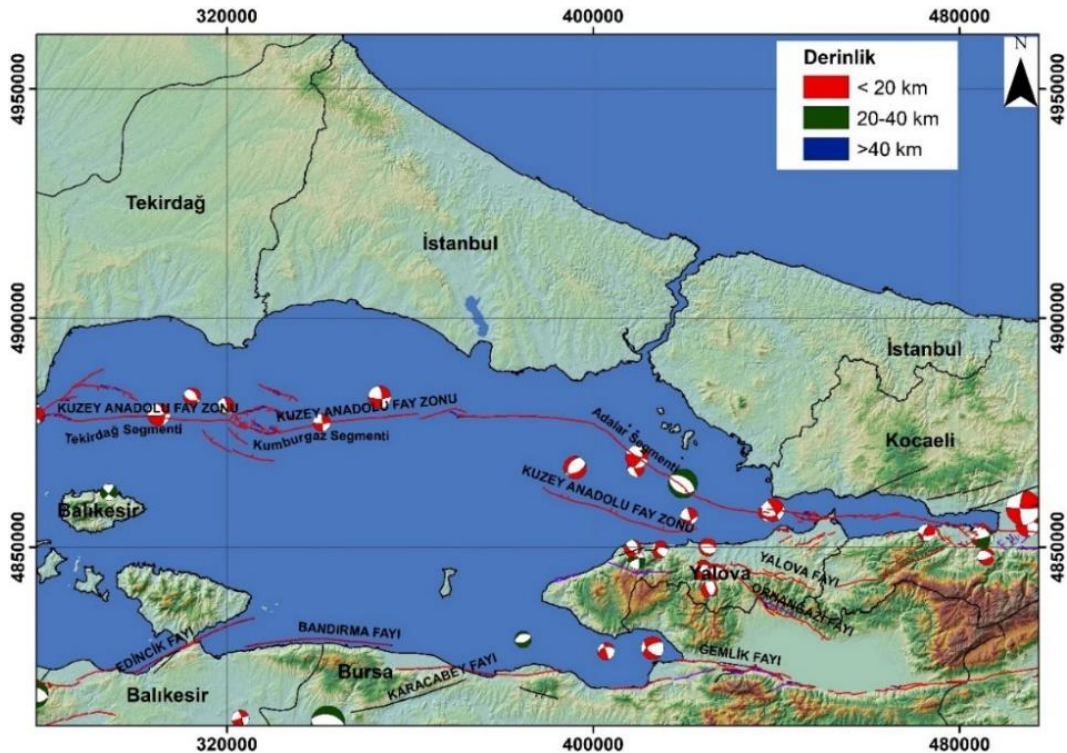
Aletsel deprem kayıtlarına göre ise (Şekil 4); büyüklüğü $M \geq 4.0$ olan 1082 deprem meydana gelmiş olup bu depremlerin 6'sı $M \geq 7.0$, 14 tanesi $M 6.0$ - $M 7.0$ büyüklükleri arasında olmuştur (Kadirioğlu ve ark., 2016). Özellikle Marmara denizinde gelişen depremlerin 20 km'den daha sığ derinlikte meydana geldiği Şekil 5'de görülmektedir (Duman ve ark., 2017). Aletsel ve tarihsel deprem kayıtlarına göre bölgenin aktif tektonik açısından değerlendirildiğinde yoğun depremlerin gözlemlendiği bir bölge olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 3. 22 Mayıs 1799 tarihinde İstanbul'da meydana gelmiş tarihi deprem, Mercalli şiddet ölçeğine (MMI) göre en yüksek şiddet değeri IX olarak tespit edilmiştir (a). 10 Eylül 1509 tarihinde meydana gelmiş tarihi deprem. Mercalli şiddet ölçeğine (MMI) göre en yüksek şiddet değeri X olarak tespit edilmiştir (b). 28 Şubat 1855 tarihinde Bursa'da meydana gelen tarihi deprem Mercalli şiddet ölçeğine (MMI) göre en yüksek şiddet değeri X olarak tespit edilmiştir (c). 6 Mart 1737 tarihinde Ezine'de meydana gelmiş tarihi deprem Avrupa Macrosismik ölçeğine (EMS) göre en yüksek şiddet değeri X olarak tespit edilmiştir (d) (AHEAD, 2020).



Şekil 4. Aletsel deprem kayıtları (Kadirioğlu ve ark., 2016).



Şekil 5. Aletsel deprem kayıtlarına ait derinlik bilgileri (Duman ve ark., 2017).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları

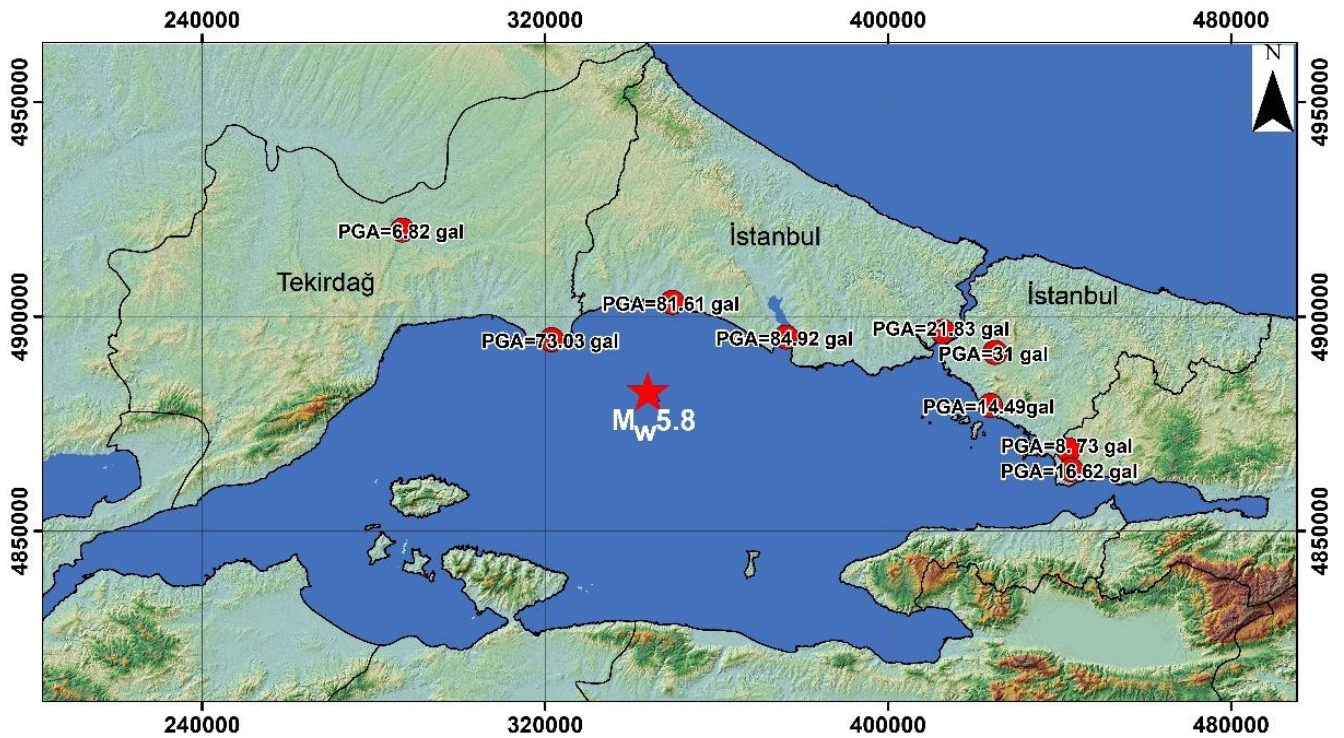
Mw 5.8 büyüklüğündeki deprem, sadece İstanbul'da değil, Marmara bölgesinde geniş bir alanda hissedilmiştir. Deprem yer hareketi kayıtları AFAD tarafından bölgede kurulu olan yer hareketi kayıt istasyonlarında kaydedilmiştir. Çizelge 1'de bölgede mevcut yer hareketi kayıt istasyonları ve yer hareketi kayıtları hakkında bilgi verilmiştir, ayrıca, Şekil 6'da istasyon konumları ve her bir istasyonda

kaydedilen PGA değerleri harita üzerinde verilmiştir. İstasyon kayıtları (Anonim1, 2020)'den alınmıştır. AFAD'dan alınan verilere göre sadece Silivri ve Beşiktaş istasyonlarının $V_{s,30}$ değeri bulunmaktadır. Diğer istasyonlar için $V_{s,30}$ değeri bölge için mevcut yüzey jeoloji bilgisi kullanılarak 360 m s^{-1} (zemin sınıfı ZC) kabulü yapılmıştır. Maksimum yer ivmesi Silivri istasyon kaydından 0.81 m s^{-2} olarak elde edilmiştir.

Çizelge 1. Mw 5.8 Silivri açıkları (Marmara Denizi) depremi Yer Hareketi Kayıt İstasyon Bilgileri (Anonim1, 2020)

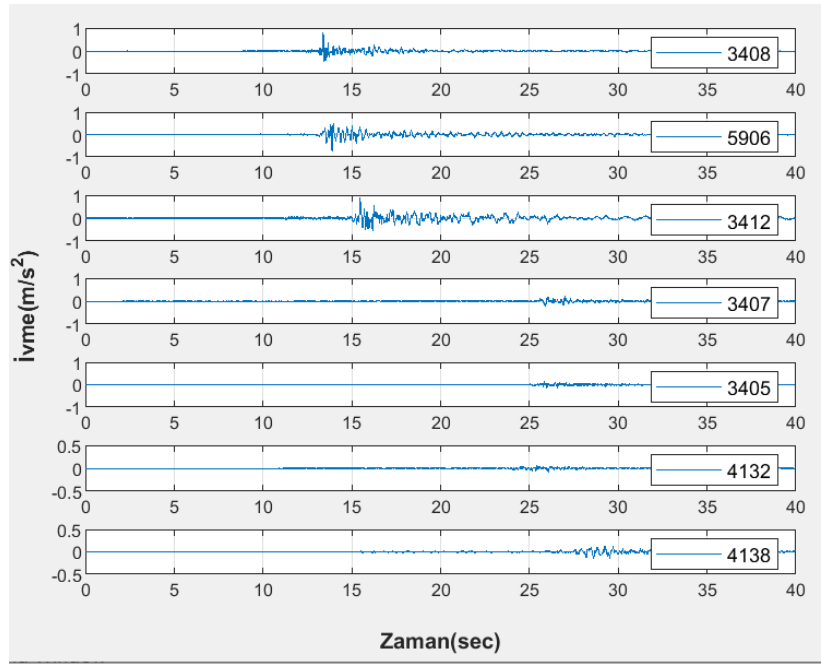
İstasyon ID	İstasyon Adı	Repi (km)	Vs30(m s)	PGA(gal)
3408	Silivri	23	639	81.62(NS)
5906*	MarmaraEreğlisi	25	360	73.04(NS)
3412*	Büyükçekmece	36	360	84.93(EW)
5915*	S.Kumbag	62	360	5.38(NS)
5911*	Murathı	68	360	6.82(NS)
3407	Besiktas	72	595	21.84(EW)
3405*	Kartal	81	360	14.5(NS)
3406*	Umraniye	83	360	31.39(NS)
5914*	Murefte	83	360	3.28(EW)
5912*	Hayrabolu	98	360	14.99(EW)
4132*	Çayırova_2	98	360	8.73(NS)
4138*	Darıca	100	360	16.63(EW)

* $V_{s,30}$ değeri 360 m s^{-1} (zemin sınıfı ZC) kabulü yapılmıştır.

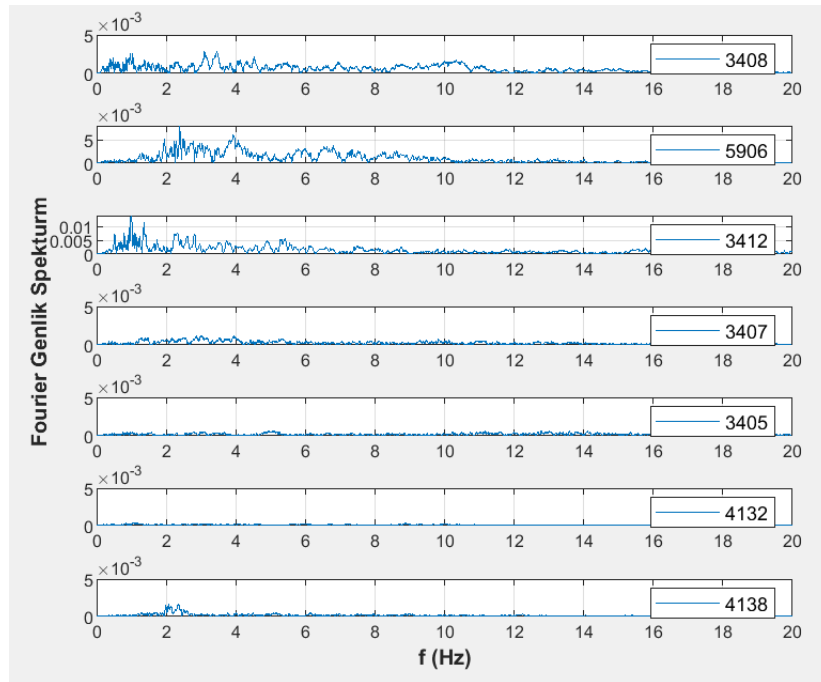


Şekil 6. Silivri Depreminin AFAD İstasyon Kayıtlarının PGA Değerleri.

Depreme ait sırasıyla 3408, 5906, 3412, 3407, 3405, 4132, 4138 numaralı istasyonlara ait filtrelenmiş deprem ivme kayıtları zaman tanım alanında Şekil 7'de, ve frekans tanım alanında Şekil 8'de görülmektedir. Şekil 7 ve Çizelge 1'de görüldüğü üzere ivme değerleri 3408-Silivri, 3412-Büyükçekmece ve 5906-Marmara Ereğlisi istasyonlarında daha yüksek değerler göstermektedir.



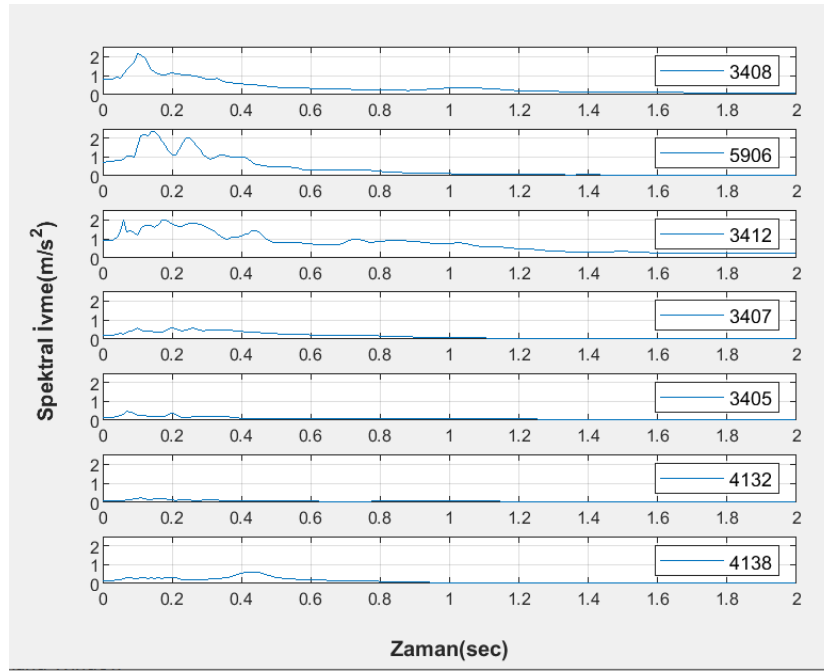
Şekil 7. Filtrelenmiş Yedi Farklı İstasyona Ait İvme Kayıtları.



Şekil 8. Seçilen Kayıtların Fourier Genlik Spektrumu.

3408, 5906, 3412, 3407, 3405, 4132, 4138 istasyonlarına ait ivme spektrum eğrileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Depremin merkezine yakın 3408-Silivri, 3412-Büyükçekmece ve 5906-Marmara Ereğlisi istasyon kayıtlarına ait spektrumlar benzerlik göstermektedir.

Çalışma kapsamında 2014 yer hareketi tahmin denklemleri (2014-YHTD) (Douglas, 2019) kullanılarak kaydedilen yer hareketi parametreleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. YHTD'de, bölgesel yüzey jeoloji haritalarından elde edilen bölgedeki zemin yapısı ile ilişkilendirilmiş üst 30 m'deki ortalama kayma dalgası hızı ($V_{s,30}$), faya olan uzaklık, fay tipi ve derinlik gibi deprem bilgileri ve istasyon bilgileri parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 9. Beş Farklı İstasyona ait Spektrum Eğrileri.

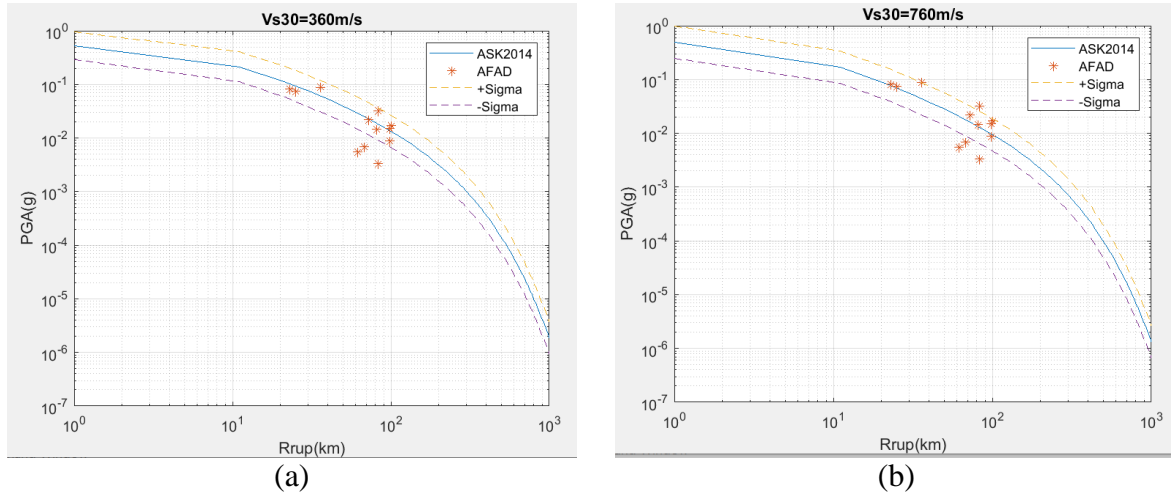
PEER (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi) tarafından geliştirilen NGA modelleri olarak bilinen YHDT'leri, 2014 yılında Türkiye de dahil olmak üzere bölgesel faktörler ile güncellenmiştir (Bozorgnia ve ark., 2014). Bu çalışmada, AFAD tarafından işletilen Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Gözlem Ağı kayıtlarından elde edilen 26 Eylül 2019 Mw 5.8 Silivri depremi kayıtlarının yer hareketi parametreleri (en yüksek yer ivmesi, spektral ivme) yakın zamanda güncellenen 2014 NGA ilişkileri ile uyumluluğu değerlendirilmiştir. (Abrahamson ve ark., 2014) (ASK14), (Boore ve ark., 2014) (BSSA14) ve (Chiou ve Youngs, 2014) (CY14) YHTD'leri, deprem merkez üssünden 100 km'ye kadar uzaklıkta olan istasyonlardan elde edilen yer hareketi verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de Mw 5.8 Silivri depremi için istasyon bilgileri ve NGA (Bozorgnia ve ark., 2014). -2014 YHTD'leri (Douglas, 2019) sırası ile (Abrahamson ve ark., 2014). (ASK14), (Boore ve ark., 2014) (BSSA14) ve (Chiou ve Youngs, 2014) (CY14) kullanılarak elde edilen PGA- R_{rup} (fay kırığına en yakın mesafe) ilişkisi grafikleri $V_{s,30}=360 \text{ m s}^{-1}$ ve $V_{s,30}=760 \text{ m s}^{-1}$ değerleri için çizilmiştir. R_{rup} değerleri istasyona ait R_{epi} (deprem merkezine olan uzaklık) değerlerine eşit olarak alınmıştır. YHTD'den elde edilen PGA- R_{rup} ilişkisi (\pm) standart sapma değerleriyle birlikte hesaplanmıştır. Elde edilen PGA değer aralığı yatay bileşen olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan PGA değerleri, istasyon kayıtlarından elde edilen iki yatay bileşenin en büyük değeri (PGA), istasyonun fay kırığına olan en yakın mesafesi ile birlikte kıyaslanmıştır.

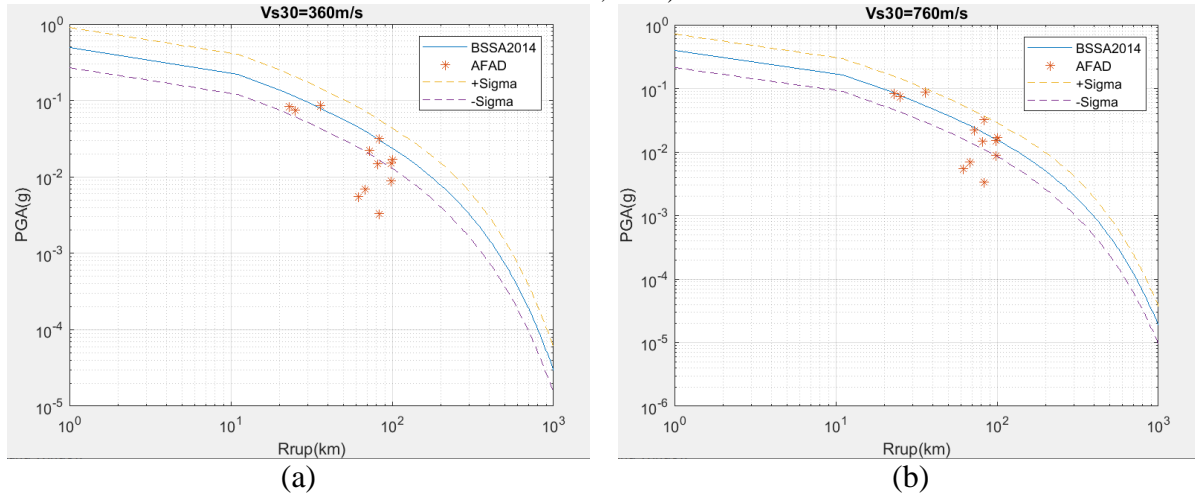
100 km içindeki AFAD istasyonlarından alınan kayıtlara ait maksimum yer ivmesi değerleri (Chiou ve Youngs, 2014) ile hesaplanan PGA- R_{rup} bölgesi içinde yer almaktadır. PGA- R_{rup} analizi sonucunda CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) sonuçlarının Mw5.8 Silivri deprem kayıtlarıyla daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada istasyonlardan alınan ham kayıtlar 0.10 Hz -25.0 Hz aralığında band-geçişli (bandpass) filtreleme uygulanarak kullanılmıştır. En yakın istasyonlar olan Silivri (3408), Marmara Ereğlisi (5906) ve Büyükçekmece (3412) istasyon kayıtlarına ait spektral ivmeler hesaplanmış olup depreme ait bilgiler ASK14 (Abrahamson ve ark., 2014), BSSA14 (Boore ve ark., 2014) ve CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanılarak elde edilen spektrum eğrileri, istasyon kayıtlarından elde edilen spektrum eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar Şekil 13'de

sırasıyla Silivri (3408), Marmara Ereğlisi (5906) ve Büyükçekmece (3412) istasyonları için gösterilmiştir. Şekil 13'de görüldüğü gibi, Silivri (3408) ve Büyükçekmece (3412) istasyonlarına ait YHDT (ASK14, BSSA14, CY14)'den elde edilen spektrum eğrilerinin bu istasyonların ivme verisinin davranış spektrumu ile uyumlu olduğu görülmektedir. 5906 Marmara Ereğlisi İstasyonu için YHDT'den elde edilen spektrum eğrisinin istasyon kaydından elde edilen spektrum eğrisiyle 0.5 saniyelik periyota kadar uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, Büyükçekmece istasyonundan elde edilen kayda ait spektrum eğrisinin CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) ile daha uyumlu olduğu, ASK14 (Abrahamson ve ark., 2014) ve BSSA14 (Boore ve ark., 2014) yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen eğrinin daha aşağıda kaldığı görülmüştür.

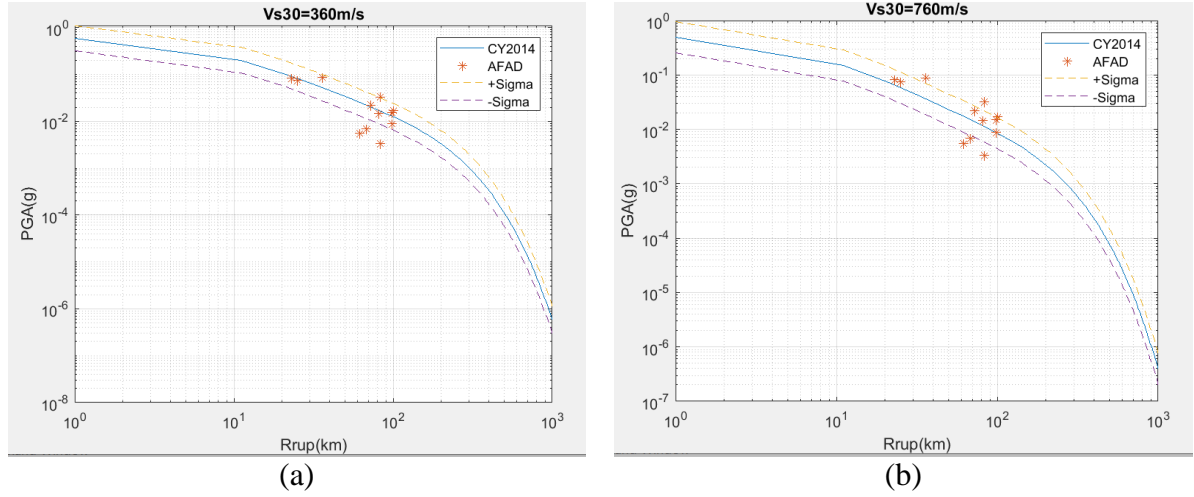


Şekil 10. 2019 Mw 5.8 Silivri Depremi $V_{s,30}=360 \text{ m s}^{-1}$ (a) ile $V_{s,30}=760 \text{ m s}^{-1}$ (b) PGA- R_{rup} Analizi (ASK14) (Abrahamson ve ark., 2014).

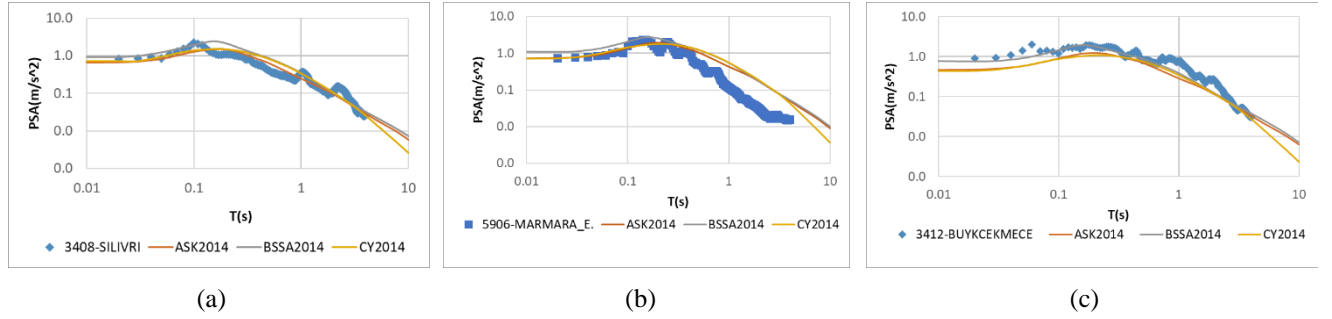


Şekil 11. 2019 Mw 5.8 Silivri Depremi $V_{s,30}=360 \text{ m s}^{-1}$ (a) ile $V_{s,30}=760 \text{ m s}^{-1}$ (b) PGA- R_{rup} Analizi (BSSA14) (Boore ve ark., 2014).

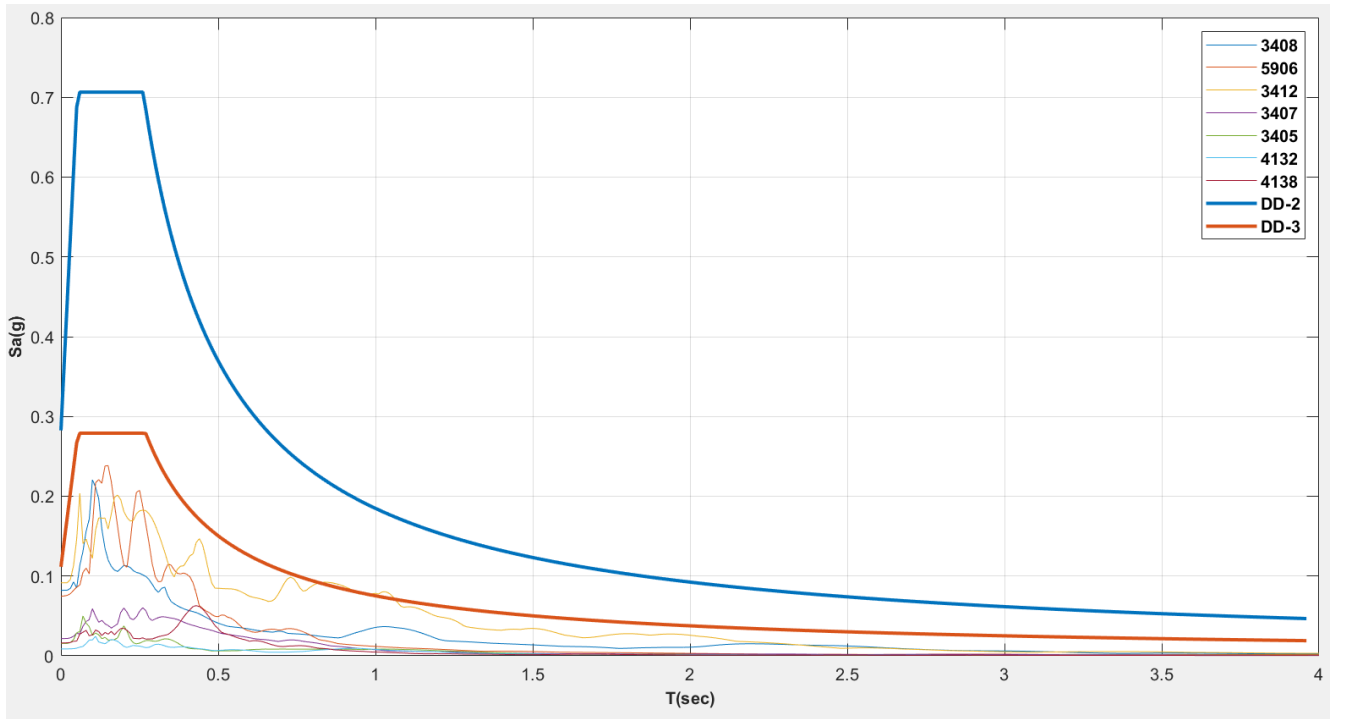
AFAD istasyonlarından alınan yer hareketi kayıtları davranış spektrumlarının, Silivri (3408) istasyonu konumu için DD-2 ve DD-3 seviyeleri (TBDY, 2018) tasarım deprem spektrumlarıyla karşılaştırmaları Şekil 14'de gösterilmiştir. İstasyonlardan alınan deprem kayıtlarından elde edilen davranış spektrumu eğrilerinin, her iki deprem seviyesi için de tüm periyotlarda (TBDY, 2018) tasarım spektrumu eğrilerinin altında kaldığı görülmüştür.



Şekil 12. 2019 Mw 5.8 Silivri Depremi $V_{s,30}=360 \text{ m s}^{-1}$ (a) ile $V_{s,30}=760 \text{ m s}^{-1}$ (b) PGA- R_{rup} Analizi (CY14) (Chiou ve Youngs, 2014).



Şekil 13. ASK14 (Abrahamson ve ark., 2014), BSSA14 (Boore ve ark., 2014), CY (Chiou ve Youngs, 2014) ile Silivri Depremi AFAD İstasyonu PS_a Analizi.




Şekil 14. DD2- ve DD-3 Deprem Seviyelerine Ait Tasarım Spektrumları ve Kayıtlardan Elde Edilen Davranış Spektrumlarının Karşılaştırılması.

Deprem Yer Hareketi Parametreleri Dağılımı Analizi

Çalışma kapsamında; depremin büyüklüğü, merkez üssü konumu, kaynaktan uzaklık ve kaynak mekanizma çözümüne ait veriler AFAD, (2019)'dan alınmıştır. Zemin koşulları ve CY14 (Chiou ve Youngs, 2014)'deki yer hareketi tahmin denklemi kullanılarak yer hareketi parametreleri sırası ile Şiddet, En büyük ivme, Spektral ivme 0.2 s, Spektral ivme 1.0 s (MMI, PGA, Sa 0.2 s, Sa 1.0 s) dağılım haritaları elde edilmiştir. Çizelge 2'de analizde kullanılan fay mekanizma parametreleri (strike, dip, rake) değerleri AFAD, (2019)'dan alınmıştır.

Çizelge 2. 2019 Mw 5.8 Silivri Depremi Moment tensör çözümü (AFAD, 2019).

	Strike-1	Dip-1	Rake-1	Strike-2	Dip-2	Rake-2
	38	64	66	263	35	129

Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının incelenmesinde, YHDT'den ASK14 (Abrahamson ve ark., 2014), BSSA14 (Boore ve ark., 2014), CY14 (Chiou ve Youngs, 2014), bağıntıları çalışılmış, yapılan değerlendirmeler sonucunda CY14 (Chiou ve Youngs, 2014)'ün Mw 5.8 Silivri depremi yer hareketi kayıtları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deprem yer hareketi parametreleri dağılım analizinde de CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) kullanılmıştır. Analizde nokta kaynak kabulü yapılmıştır. Kullanılan nokta kaynağın merkezi dışmerkez (hypocenter) olarak konumlandırılmıştır. Analizde ayrıca mühendislik ana kayası ($V_{s,30}=760$ m/s) referans zemin koşulları kullanılmıştır.

CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) modeli aktif tektonik bölgelerinde meydana gelen sığ kabuk depremleri (shallow crustal earthquakes) tarafından oluşan yatay yer hareketi büyüklerini tahmin etmede kullanılan (Chiou ve Youngs, 2008) (CY08) modelinden güncellenmiştir. CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) modelinde medyan yer hareketi değerleri Mw >7.0 için eski modeller ile benzerlik gösterirken Mw <5.0 magnitüd için daha küçük sonuçlar vermektedir. CY2014 modelinde fay etkileri, hanging wall fonksiyonu, yarılmaların üst derinlik skalası (Z_{TOR}), sediment kalınlık skalası ($Z_{1.0}$), fay dip ve yarıma yönleri gibi faya etki edecek ek bilgiler bakımından C08 (Chiou ve Youngs, 2008)'den farklı küçük düzeltmeler içermektedir. Çizelge 3'de yer hareketi parametreleri dağılım analizi sonucunda elde edilen PGA değerleri istasyonlarda ölçülen değerlerle karşılaştırılmış, değerlerin birbiriyle uyduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3. Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen PGA değerleri ile istasyonlarda ölçülen PGA değerlerinin karşılaştırılması.

İstasyon ID	İstasyon	Boylam	Enlem	İstasyonlarda Ölçülen PGA (g) Değerleri	Analiz Sonucunda Çıkan PGA(g) Değerleri
5912	Hayrabolu	27.1145	41.22243	0.015	0.015
5914	Murefte	27.24526	40.66825	0.032	0.018
5915	S.Kumbag	27.45922	40.87996	0.022	0.027
5911	Muratlı	27.49156	41.17413	0.083	0.025
5906	MarmaraEreğlisi	27.9316	40.97338	0.087	0.075
3408	Silivri	28.25569	41.07339	0.009	0.091
3412	Büyükçekmece	28.57821	41.02058	0.017	0.053
3407	Besiktas	29.00951	41.0582	0.074	0.023
3405	Kartal	29.15668	40.91111	0.007	0.019
3406	Umraniye	29.1588	41.02262	0.015	0.019
4132	Çayırova_2	29.3813	40.83046	0.003	0.014
4138	Darıca	29.39196	40.78877	0.005	0.013

Wald ve ark., (1999a,b) çalışmalarında PGA ve PGV yer hareketi parametreleri ile Değiştirilmiş Mercalli Şiddeti ($MMI-I_{mm}$) arasındaki dönüşüm bağıntıları, şiddet dağılımı tahmininde kullanılmıştır. Bu bağıntılar büyüklükleri 5.8 ile 7.3 arasında değişen önemli 8 farklı Kaliforniya depremleri verileri kullanılarak geliştirilmiştir (Wald ve ark., 1999a, b). Bu bağıntılar aşağıdaki gibidir,

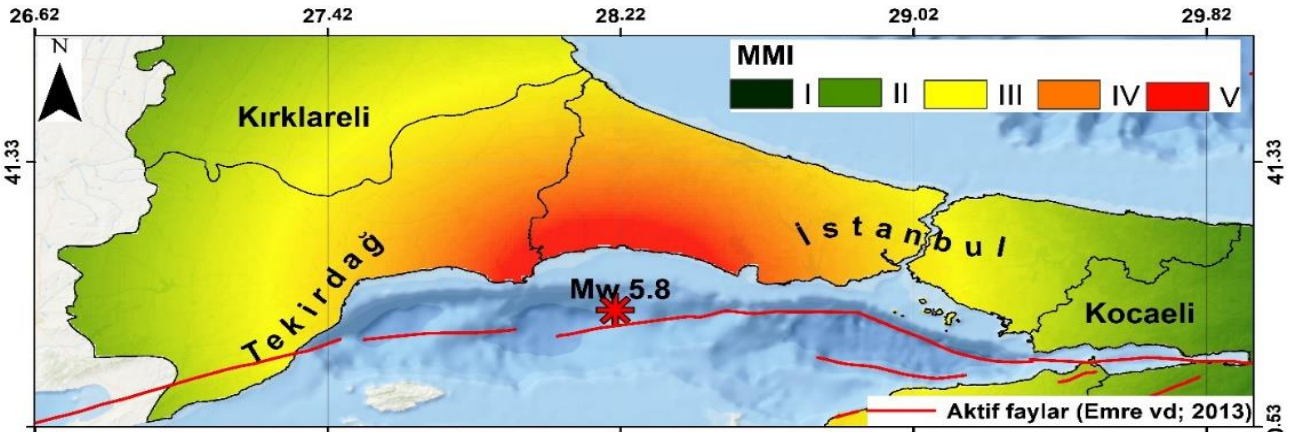
Şiddet tahmini için PGA ile ilişkilendirilen, $V < I_{mm} < VIII$ aralığı için,

$$I_{mm} = 3.66 \log(PGA) - 1.66 \quad (\sigma = 1.08) \quad (1)$$

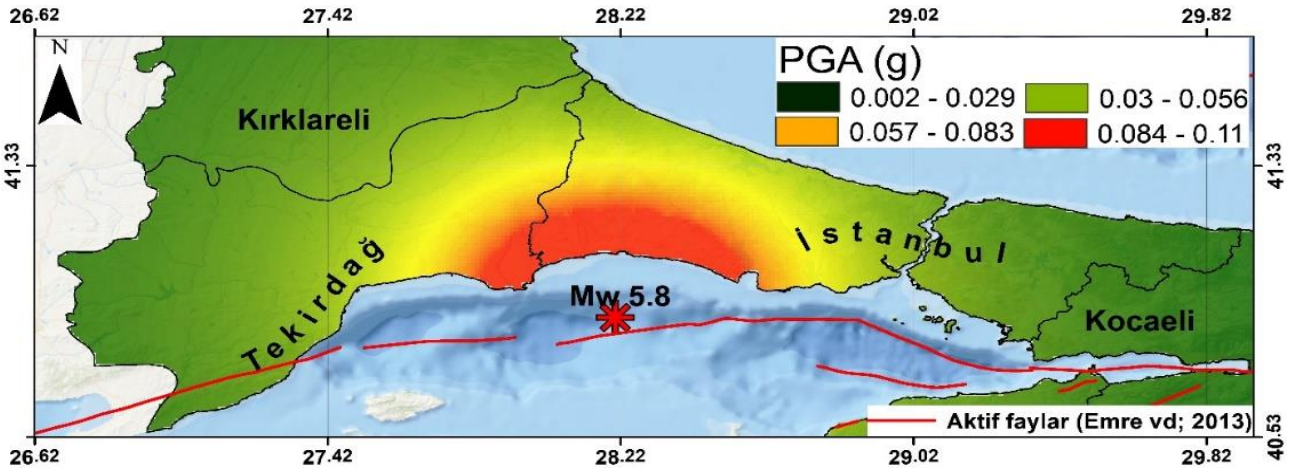
Şiddet tahmini için PGV ile ilişkilendirilen, $V < I_{mm} < IX$ aralığı için,

$$I_{mm} = 3.47 \log(PGV) + 2.35 \quad (\sigma = 1.08) \quad (2)$$

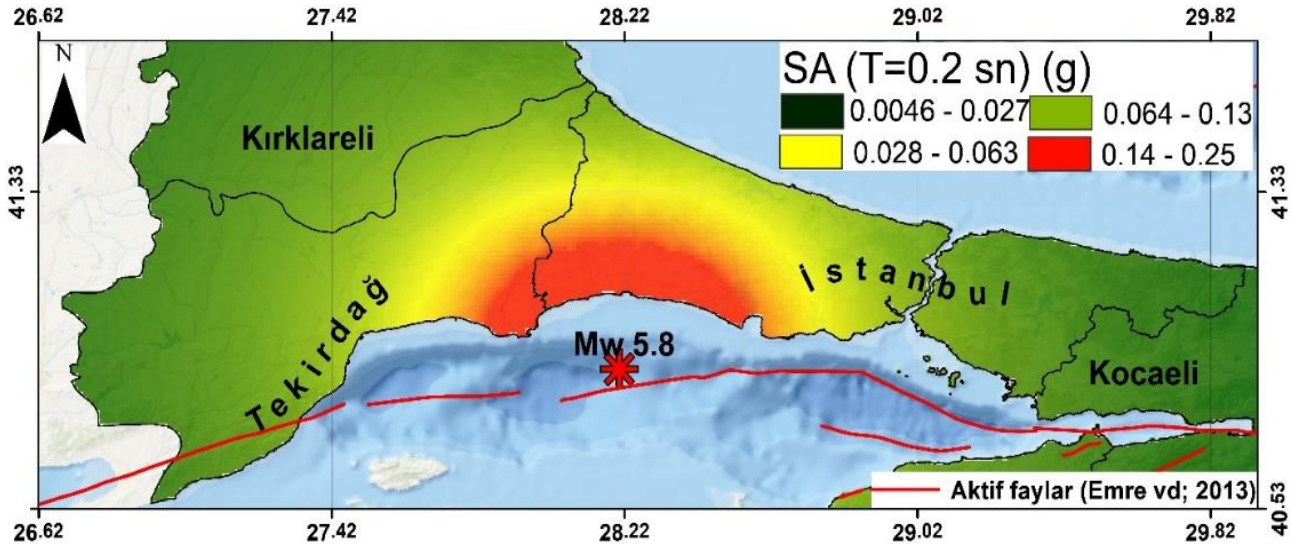
Yer hareketi parametreleri (MMI, PGA, $Sa_{0.2}$, $Sa_{1.0}$) dağılım analizi sonuç haritaları sırası ile Şekil 15 ile Şekil 18 arasında verilmiştir. Şekil 15’de şiddet dağılımı (MMI), Şekil 16’da PGA, Şekil 17’de Sa ($T=0.2$ s), Şekil 18’de Sa ($T=1.0$ s) dağılımları gösterilmiştir. Sonuç haritalarına göre yer hareketi parametrelerinin en yüksek değerleri merkez üssüne en yakın olan Silivri ve çevresinde görülmüş olup, merkez üssünden uzaklaştıkça azalmıştır.



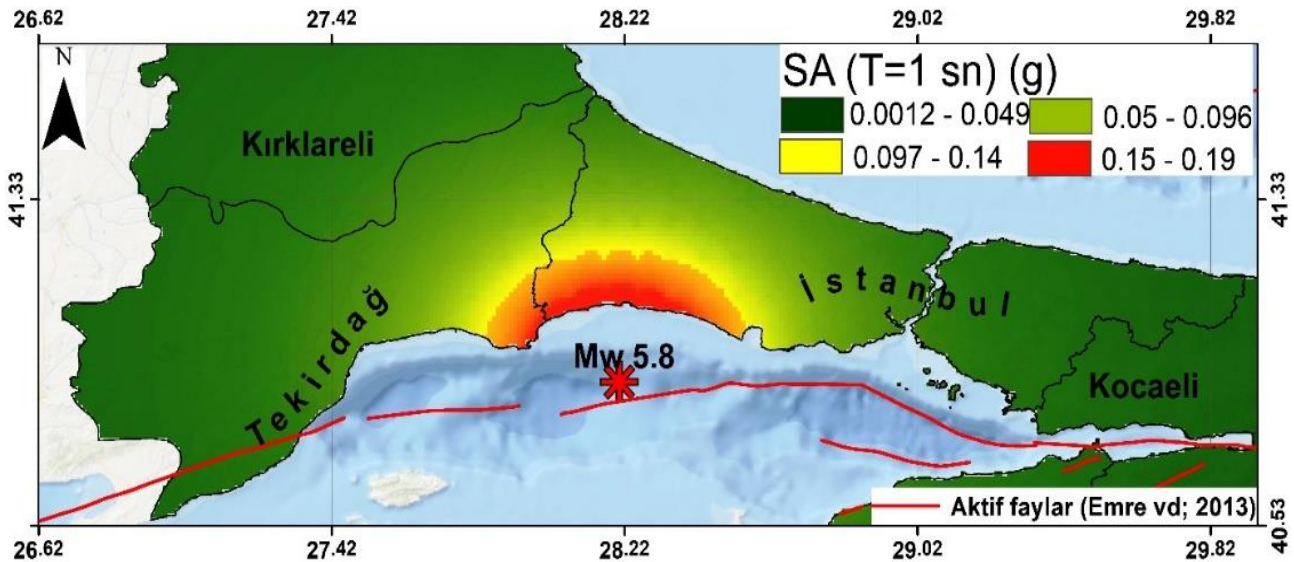
Şekil 15. Mw 5.8 Silivri depreminin CY14 (Chiou ve Youngs, 2014)'e göre hazırlanan MMI şiddet dağılım haritası.



Şekil 16. Mw 5.8 Silivri depreminin CY14 (Chiou ve Youngs, 2014)'e göre hazırlanan en büyük ivme dağılım (PGA) haritası.



Şekil 17. Mw 5.8 Silivri depreminin CY (Chiou ve Youngs, 2014)'e göre hazırlanan Sa(T=0.2 s) Spektral ivme dağılım haritası.



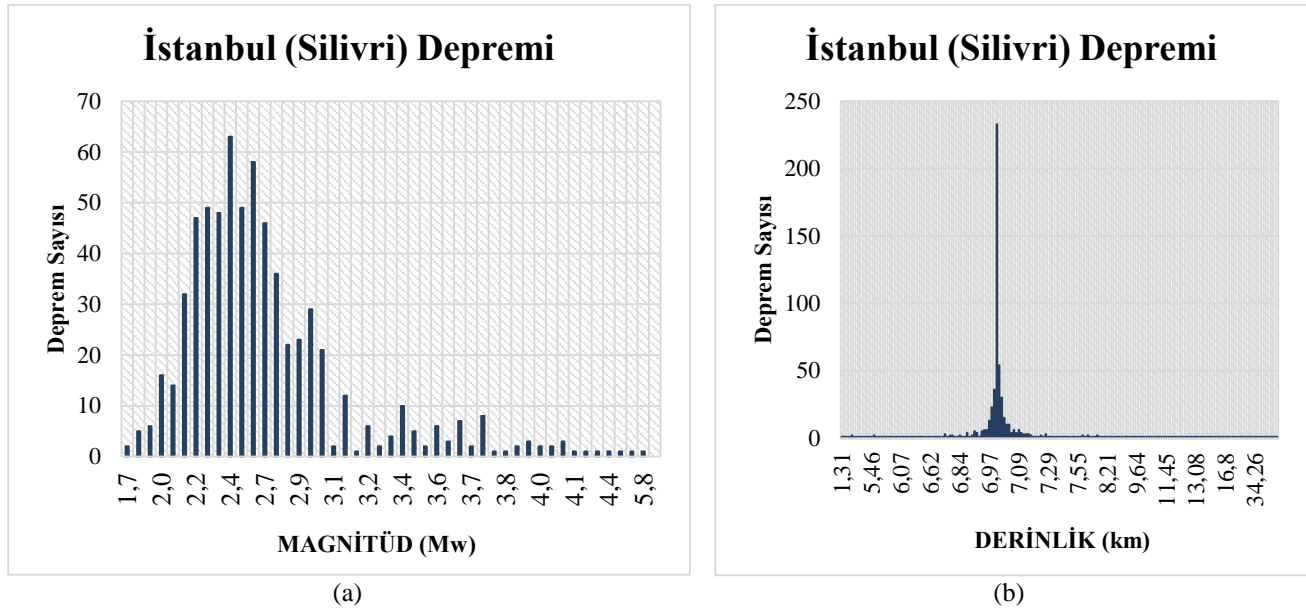
Şekil 18. Mw 5.8 Silivri depreminin CY (Chiou ve Youngs, 2014)'e göre hazırlanan Sa(T=1.0 s) Spektral ivme dağılım haritası.

Öncü ve Artçı Depremler ile Deprem Enerjisinin Değerlendirilmesi

Marmara denizinde 22 - 29 Eylül 2019 tarihlerinde 657 deprem meydana gelmiştir (Anonim 1, 2020). Meydana gelen bu depremlerin büyüklükleri M 1.7 ile M 5.8 arasında değişmektedir. $M \geq 4.0$ olan deprem sayısı ise 6 adettir. Depremlerin derinlikleri de incelendiğinde çoğunluğunun derinlikleri 7.0 km civarındadır. Bunları içindeki M5.8 büyüklüğündeki Silivri (İstanbul) depreminin de derinliği bu değerdedir. Şekil 19 (a)'da söz konusu tarihler arasında meydana gelen deprem sayısı ve büyüklük (Magnitüd) bilgisi ve (b)'de ise deprem sayısı – derinlik bilgisi verilmiştir. AFAD'dan alınan bu depremler incelendiğinde depremlerin magnitüd değerlerinin Mw ve ML cinsinden olduğu görülmüştür. Burada Mw magnitüdü aynı alınırken ML magnitüdü ise;

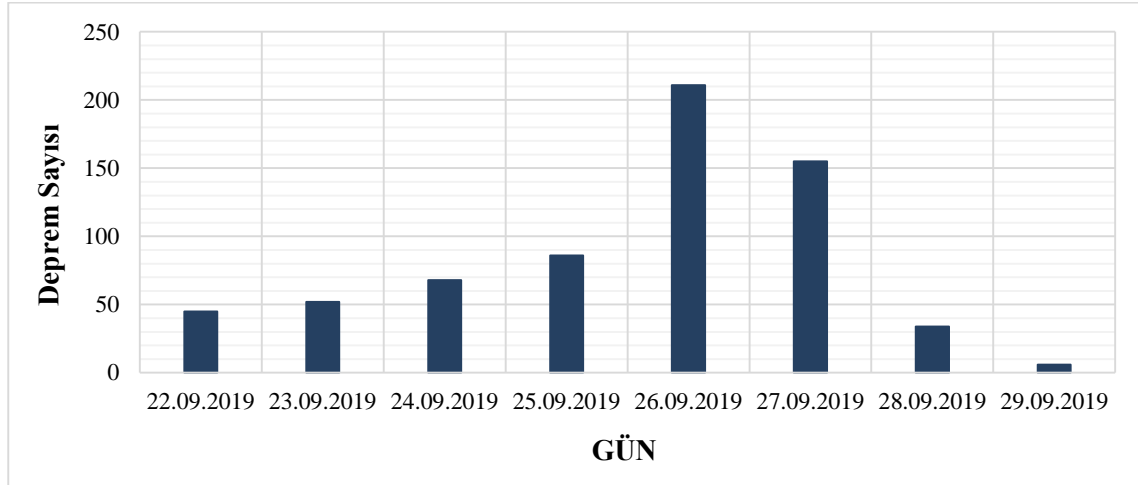
$$M_w = 0.8095(\pm 0.031)M_L + 1.3003 \quad (3.3 \leq M_L \leq 6.6) \quad (3)$$

Eşitlik-3 denklemi kullanılarak dönüşüm yapılmıştır (Kadiroğlu ve Kartal, 2016).



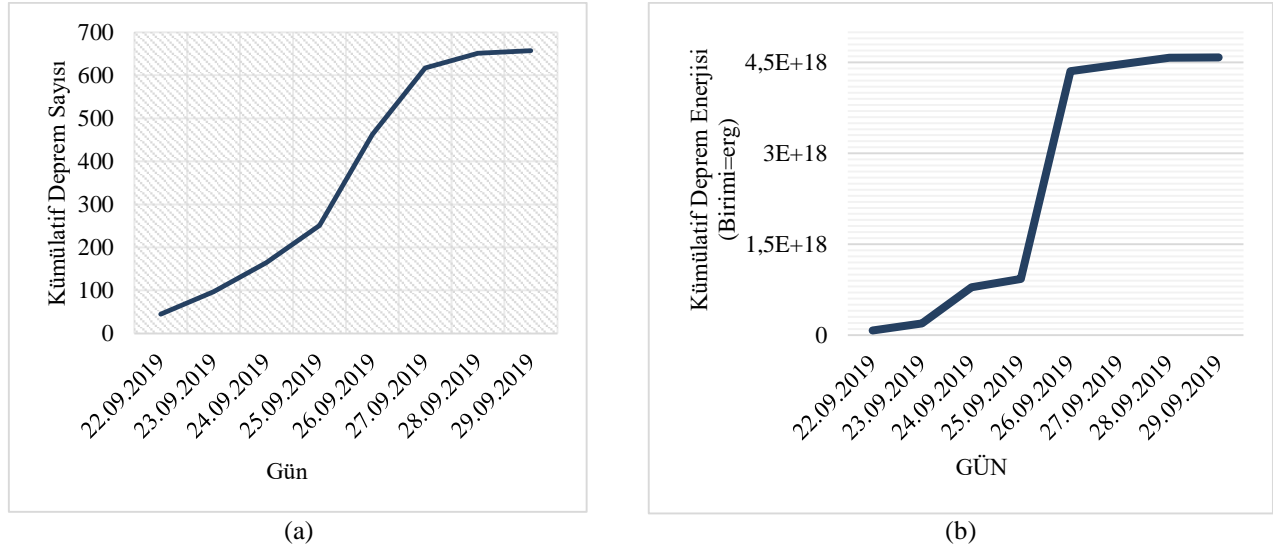
Şekil 19. Deprem Sayısı-Magnitüd (a) ve Deprem Sayısı-Derinlik (b), grafikleri.

Şekil 20’de incelenen 8 günlük periyot içerisindeki deprem sayısı dağılımı verilmiştir. İlk 4 günde ortalama aynı deprem sayısı meydana gelmiş, Mw 5.8’lik Silivri depremini de içinde bulunduran sonraki iki günde ise ciddi bir artış olmuştur ve sonrasında deprem sayısı giderek azalmıştır. Ayrıca gerçekleşen bu depremlerden 251 adeti 22 - 25/09/2019 tarihleri arasında ana depremden önce gerçekleşmişken 195 adeti ise 27 - 29/09/2019 tarihleri arasında ana depremden sonra gerçekleşmiştir. 26.09.2019 günü ana şokun olduğu tarihte ise 211 adet irili ufaklı depremler meydana gelmiştir (Anonim1, 2020).



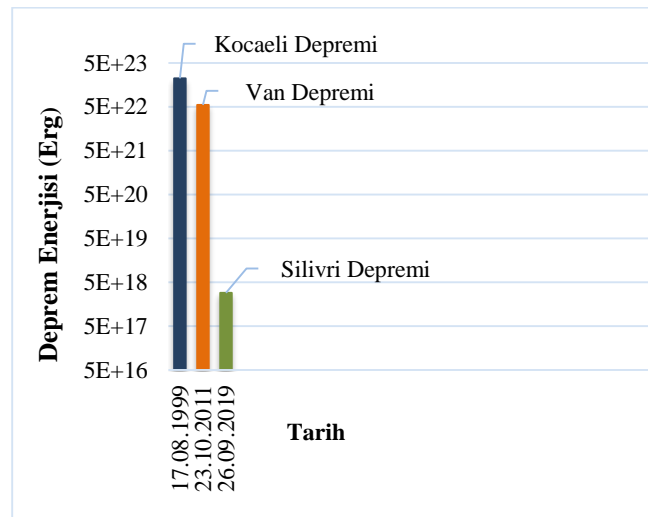
Şekil 20. Deprem Sayısı – Gün Grafiği.

Silivri açıkları (Marmara Denizi) depreminin bir haftalık depremselliğine bakıldığında, Şekil 21a,b’de görüldüğü gibi ana şoktan sonraki zaman içerisinde kümülatif olarak deprem sayısının ve deprem enerjisinin büyük kısmının ilk zamanlarda boşaldığı görülmektedir. Burada deprem enerjisinin tespiti için genellikle tercih edilen (Gutenberg ve Richter, 1956) eşitliği olan $\log E = 11.8 + 1.5M_s$ formülü kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Burada E, enerji birimi erg ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ joule}$) ve M_s ise yüzey magnitüdüdür (Kramer, 1996). Alınan verilerdeki tüm magnitüd değerleri yüzey magnitüdü olmadığından önce yüzey magnitüdüne çevrilmiş sonrasında enerji hesabı yapılmıştır.



Şekil 21. Kümülatif Deprem Sayısı-Gün (a) ve Kümülatif Deprem Enerjisi-Gün (b), grafikleri.

Çalışma kapsamında Mw 5.8 Silivri depreminin ülkemizde yakın geçmişte meydana gelen büyük ve ciddi hasar yapıcı depremler olan 2011 Van Mw 7.2 (KRDAE, 2011) ve 1999 Kocaeli Mw 7.6 (Anonim1, 2020) depremlerinde açığa çıkan enerjiler ile karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 22).



Şekil 22. Kocaeli, Van ve Silivri depremlerinin ana şokta ortaya çıkan enerjileri.

2011 Van Depremi Mw 7.2 için 3 aylık deprem verisi incelenmiştir. 23 Ekim-30 Aralık 2011 tarihleri arasında 180 adet deprem meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu depremlerin genel magnitüd aralığı M 4.0-M 5.0 arasındadır. 23 Ekim 2011 günü meydana gelen Mw 7.2 büyüklüğündeki deprem bölgede ciddi yapısal hasara sebep olmuştur. Oluşan bu depremle (5.66×10^{22}) Erg seviyesinde ciddi bir enerji açığa çıkmış sonrasındaki artçı depremlerde ciddi bir değişiklik gözlenmemiştir. Moment enerjisinin büyük kısmı ana şokta boşalmıştır.

1999 Kocaeli Depremi Mw 7.6 için 6 aylık bir veri ele alınmıştır. 01 Haziran - 30 Kasım 1999 tarihleri arasındaki veriler incelenmiştir. Bu tarihler arasında AFAD verilerine göre 324 deprem ölçülmüştür. Bu depremlerin magnitüd aralığı M 2.9 ile M 7.6 arasında değişmektedir ve ortalama olarak oluşan depremlerin magnitüd değeri M 4.7'dir. 17 Ağustos 1999 da meydana gelen M 7.6 büyüklüğündeki depremin açığa çıkardığı enerji (2.2×10^{23}) Erg seviyesinde olup, enerjisinin büyük kısmının ana şok ile boşaldığı görülmektedir.

1999 Kocaeli Mw 7.6 depremi, 2011 Van Mw 7.2 depremi ve 2019 İstanbul (Silivri) Mw 5.8 depreminin meydana getirdiği kümülatif enerji karşılaştırması yapıldığında 7.6 büyüklüğündeki Kocaeli

depreminin enerjisinin 10^{23} Erg, 7.2 büyüklüğündeki Van depreminin enerjisinin 10^{22} Erg, 5.8 büyüklüğündeki Silivri depreminin enerjisinin de 10^{18} Erg mertebelerinde olduğu hesaplanmıştır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında 26 Eylül 2019 Mw 5.8 Silivri depremi kuvvetli yer hareketi kayıtları çalışılmıştır. Bu deprem Marmara bölgesinde 1999 yılında meydana gelen Kocaeli M_w 7.6 ve Düzce M_w 7.1 depremleri ve artçılarından sonra bölgeyi etkileyen en büyük deprem olması nedeni ile önemlidir. Deprem Tekirdağ ve İstanbul başta olmak üzere Yalova, Kocaeli, Bursa, Kırklareli illerinde hissedilmiştir. Çalışma kapsamında bölge sismo-tektoniği gözden geçirilmiş, bölgede tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremler değerlendirilmiştir. Deprem sırasında kaydedilen Maksimum Yer ivmesi -PGA değerleri ASK14 (Abrahamson ve ark., 2014), BSSA14 (Boore ve ark., 2014), ve CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) NGA2014 YHTD kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca CY14 YHTD kullanılarak yer hareketi parametreleri (MMI, PGA, Sa0.2, Sa1.0) dağılım haritaları oluşturulmuş ve kaydedilmiş yer hareket parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son kısmında ana şok öncesi ve sonrası öncü ve artçı depremler ve açığa çıkan enerji değerlendirilmiş ve ülkemizde yakın geçmiş zamanda meydana gelen yıkıcı depremler 1999 Kocaeli (M_w 7.6) ve 2011 Van (M_w 7.2) ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma deprem tehlikesi ve riski açısından dünyanın sayılı bölgelerinden biri olan Marmara bölgesinin depremselliğinin gözden geçirilmesi ve elde edilen yer hareketi kayıtlarının 2014 YHDT'ler (ASK14 (Abrahamson ve ark., 2014), BSSA14 (Boore ve ark., 2014), ve CY14 (Chiou ve Youngs, 2014) ile uyumunu göstermesi açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrahamson NA, Silva, WJ, and Kamai R, 2014. Summary of The ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30 (3): 1025-1055.
- Anonim1, 2020. <https://deprem.afad.gov.tr/>, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, (Erişim Tarihi:30.03.2020).
- Anonim2, 2020. AHEAD, European Archive of Historical Earthquake Data, 2020. <http://www.emidius.eu/AHEAD/main>, (Erişim Tarihi: 12.03.2020)
- Başarır Baştürk N, Özel NM, Altınok Y, ve Duman, TY, 2016. Türkiye ve Yakın Çevresi için Geliştirilmiş Tarihsel Dönem (MÖ 2000 - MS 1900-) Deprem Katalogu. Türkiye Sismotektonik Haritası Açıklama Kitabı, MTA Özel Yayınlar Serisi-35, 249 s.
- Boore DM, Stewart JP, Seyhan E, and Atkinson GM, 2014. NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30 (3): 1057-1085.
- Bozorgnia Y, Abrahamson NA, Atik LA, Ancheta TD, Atkinson GM, Baker JW, Baltay A, Boore,DM, Campbell KW, Chiou BSJ, Darragh R, Day S, Donahue J, Graves RW, Gregor N, Hanks, T, Idriss IM, Kamai R., Kishida T, Kottke A, Mahin SA., Rezaeian S, Rowshandel B, Seyhan E, Shahi S, Shantz T, Silva W, Spudich P, Stewart JP, Watson-Lamprey Wooddell K, and Youngs R, 2014. NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra*, 30:973-987.
- Chiou BSJ, and Youngs RR, 2008. An NGA Model for The Average Horizontal Component of Peak Ground Motion And Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 24(1): 173-215.
- Chiou BSJ, and Youngs RR, 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA Model For The Average Horizontal Component Of Peak Ground Motion And Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3):1117-1153.
- Douglas, John. 2019. Ground motion prediction equations, United Kingdom, Glasgow: University of Strathclyde, 1964 2019.

- Duman TY, Çan T, Emre Ö, Kadirioğlu FT, Başarır Baştürk B, Kılıç T, Arslan S, Özalp S, Kartal RF, Kalafat D, Karakaya F, Eroğlu Azak T, Özel NM, Ergintav S, Akkar S, Altınok Y, Tekin S, Cingöz A. ve Kurt Aİ, 2017. Türkiye Sismotektonik Haritası Ölçek 1:1.250.000. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-34. ISBN: 978-605- 9516-19-8.
- Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş, ve Şaroğlu F, 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye, 89 S.
- Giardini D, Woessner J, Danciu L, Crowley H, Cotton F. Grünthal G, Pinho, Valensise G, Akkar, S, Arvidsson R. Basili R. Cameelbeek T, Campos-Costa A, Douglas J, Demircioglu MB, Erdik M, Fonseca J, Glavatovic B, Lindholm C, Makropoulos K. Meletti C, Musson RMW, Pitalakis K, Sesetyan K, Stromeyer D, Stucchi M. and Rovida A, 2013. Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online data re-source, Swiss Seismol. Serv., ETH Zurich, Zurich, Switzerland, doi:10.12686/ SED -00000001 –SHARE.
- Gutenberg B, and Richter, CF, 1956. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration: (Second paper). Bulletin of the Seismological Society of America, 46(2): 105–145.
- Kadirioğlu, FT, and Kartal RF, 2016. The New Empirical Magnitude Conversion Relations Using an Improved Earthquake Catalogue for Turkey and Its near Vicinity (1900–2012). Turkish Journal of Earth Sciences 25(4): 300–310.
- Kadirioğlu FT, Kartal RF, Kılıç T, Kalafat D, Duman TY, 2017. Eroğlu Azak, T., Özalp, S. ve Emre Ö. 2016. Türkiye ve Yakın Çevresi için Geliştirilmiş Aletsel Dönem (1900 - 2012) Deprem Katalogu ($M \geq 4,0$). Türkiye Sismotektonik Haritası (Ed. T.Y. Duman), MTA Özel Yayınlar Serisi-35, 249 s.
- Kramer SL, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Environmental & Engineering Geoscience, 653p. KRDAE, 2011. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2011. 23 Ekim 2011 Van Depremi ($M_w = 7.2$) Değerlendirme Raporu, 1-3, 2011.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2019. 26 Eylül 2019 Silivri (İstanbul) Depremi Bilgi Notu, 1-5.
- Stucchi, M, Rovida A, Gomez Capera AA, Alexandre P, Camelbeek T, Demircioglu MB, Gasperini P, Kouskouna V, Musson RMW, Radulian M, et al. 2012. The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899. J. Seismol. 2012, 17:523–544, doi:10.1007/s10950-012-9335-2.
- T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019. 26 Eylül 2019 Marmara Denizi, Silivri Açıkları (İstanbul) $M_w 5.8$ Depremine İlişkin ön Değerlendirme Raporu, 1-10, 2019.
- TBDY-2018, 2018. “Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar,” <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>, p. 416, 2018.
- Wald, DJV, Quitoriano, TH, Heaton, H, Kanamori, CW, Scrivner, CB, Worden, TS, 1999a. Rapid Generation of Instrumental Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California, Earthquake Spectra, 15, 537-556.
- Wald, DJV, Quitoriano, TH, Heaton, H, Kanamori, CW, 1999b. Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity for Earthquakes in California, Earthquake Spectra, 15/3, 557-56.