Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 27(6), 775-780, 2021

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

# 26 Eylül 2019 Marmara Denizi depremi'nin (5.8 Mw) İstanbul ve çevre illerde oluşturduğu zemin etkilerinin değerlendirilmesi

# The site effect assessment of September 26, 2019 Marmara Sea darthquake (5.8 Mw) in the vicinity of İstanbul

*Hamdullah LİVAOĞLU*[1], *Fadime SERTÇELİK*[2*]

[1,2]Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
hlivaoglu@gmail.com, fasert@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.12.2020 Düzeltme Tarihi/Revision: 21.04.2021 doi: 10.5505/pajes.2021.71509
Kabul Tarihi/Accepted: 26.04.2021 Araştırma Makalesi/Research Article

**Öz**

*Çalışmanın amacı, 26 Eylül 2019 Marmara Denizi- İstanbul (Silivri) açıklarında meydana gelen Mw=5.8 büyüklüğündeki depremin, Türkiye Kuvvetli Yer Hareketi İstasyon ağına (TR-KYHA) ait kayıtlar ile zemin etkilerini incelemektir. Bu kapsamda 46 istasyonda kaydedilen 3 bileşen ivme verileri tepki spektrum oranları yaklaşımı kullanılarak analiz edilmiştir. Her bir kayıta ait tepki spektrum oranları hesaplanarak spektral büyütmeler ve yer baskın periyotları hesaplanmıştır. Depremin meydana getirdiği yer sarsıntısı, 150 km yarıçaplı 46 istasyonda 10 gal (cm/s²) üzerinde ivme değerleri üretmiştir. Kaydedilen en yüksek yer ivme değeri deprem merkez üssünden 34.5 km uzaklıkta İstanbul, Küçükçekmece'de kurulu 3412 No.lu istasyonda 84.9 gal olarak saptanmıştır. Aletsel verileri kullanarak çözümlenen ivme kayıtlarının kesme dalga kısımları 0.3-1.5s baskın periyotlarda ve 3-12 büyütmeler arasında değişen uzak istasyonlarda (>100 km, Kocaeli, Bursa ve Balıkesir) önemli deneysel sonuçların ortaya çıkmasına yol açmıştır. Aynı zamanda, geoteknik özellikleri iyi bilenen istasyonlarda ivme kayıtlarına ait teorik yatay düşey spektral oranlar da hesaplanarak aletsel verilerle hesaplanan tepki spektrum oranları ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, 10-13 büyütme faktörlerine neden olan 1 s üzerinde baskın periyotlu uzun salınımlar gösteren bina etkilerini (Kocaeli) ve sığ litolojilerde mevcut nispeten gevşek jeolojik formasyonlarda (İstanbul, Yalova) yüksek spektral büyütmeler saptanmıştır. Elde edilen aletsel bulgular ile uzak ve yakın alanlarda ortaya çıkan zemin etkileri, sismik tehlike zararlarının azaltılmasında etkili bir rol oynayacağı düşünülmektedir.*

**Anahtar kelimeler:** Tepki spektrumları, Zemin baskın periyodu, Spektral büyütme, İstanbul.

**Abstract**

*The main purpose of this study is assessing the site effects created by Mw 5.8 September 26, 2019 Istanbul (Silivri) Marmara Sea earthquake struck regarding the data of Strong Ground Motion Stations of Turkey (TR-NSMN). Within this scope accelerograms that are obtained from 46 stations were analyzed by using 3-components response spectral ratios. 46 sensors have detected the earthquake at over 10 Gal(cm/sec²) within the 150 km radius due to the strong shaking. Highest ground acceleration (84. 9 gal) measured at 3412 coded station in Istanbul (Büyükçekmece) station, about 34.5 km far from the epicenter. Sorting out the instrumental data (Shear wave phase parts) has yield precious experimental results indicating site amplifications factor 3-12 at 0.3-1.5 s predominant periods corresponding even further 100 km away from the epicenter in Kocaeli, Bursa and Balıkesir stations. Besides, theoretical horizontal-to-vertical spectral ratios were calculated for the significant stations having solid geotechnical data for comparison with instrumental data. Thereby, obtained experimental results such as building effects causing to feel the long period oscillations over 1 s predominant period with the range of 10 to 13 amplification factor (Kocaeli) and near field (<30 km) site effects originated from shallow lithology at Istanbul and Yalova stations might reveal crucial outputs in order to mitigate the possible seismic hazards studies.*

**Keywords:** Response Spectra, Site predominant period, Spectral amplification, Istanbul.

## 1 Giriş

Depremlerin frekans ve genlik içeriklerini ortaya çıkaran spektral yer hareketi parametreleri, tehlike kestirim çalışmalarında önemli ve öncü bir etkiye sahiptir. Mühendislik amaçlı çalışmalarda yatay bileşenlere ait spektral ivmeler hesaplanırken, zemin etkisini kestirebilmek için düşey bileşeni de kullanan farklı çalışmalar mevcuttur [1].

Sediman örtü tabakalarının transfer fonksiyonlarını ve zemin baskın periyotlarını belirlemek için mikrotremorlerin (titreşimcik) Fourier spektral oranlarını kullanan Nakamura [2] 'nin çalışmasını takiben Yamazaki ve Ansary [3] bu yaklaşımı depremlere ait yatay ve düşey bileşenlerin hız tepki spektrumlarını hesaplayarak genişletmiştir. Bununla birlikte, Ghasemi ve diğ. [4], Di Alessandro ve diğ. [5] zemin etkileri ve kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sismik zemin sınıflamasını geliştirerek yatay-düşey spektral oran çalışmalarına katkıda bulunmuşlardır.

Yer ivme çalışmalarına ait ivme kayıtlarının eksikliğine bağlı mühendislik amaçlı başarılı simülasyonlar gerçekleştirilse de [6],[7] deneysel (aletsel) veri daha doğru ve güvenilir sonuçlar üretmede araştırıcıya olanak sağlamaktadır. Aletsel tabanlı verilerin kataloglaması ve ivme tepki spektrumlarıyla zemin sınıflarının belirlenmesi ülkemizde araştırmacılar tarafından global ölçekte katkı sağlanan konular arasındadır [8],[9]. 26 Eylül 2019'da Silivri açıklarında Marmara denizinde meydana gelen ve İstanbul'un büyük bölümünde hissedilen depremin yeni nesil yer hareketi tahmin denklemleriyle ivme-azalım ilişkileri Zülfikar ve diğ. [10]'nin çalışmasında incelenmiştir. Ayrıca mobil aletsel ölçümlere dayalı analizler ile

*Yazışılan yazar/Corresponding author

sabit kurulu istasyonlara katkı amacıyla sediman kalınlıkları ve yer hasar görebilirlikler kestirilebilmektedir [11].

AFAD-Kuvvetli Yer Hareketi İstasyon (TR-KYHA) ağı 754 adet 3 bileşen dijital yeni nesil sismometreden oluşmaktadır. Avrupa'da kurulmuş ikinci büyük ağdır. Marmara Bölgesi, doğrultu atım hareketli fay mekanizmalarının doğurduğu yıkıcı depremlere maruz kalabilen ve en son 26 Eylül 2019'da Silivri açıklarında meydana gelen ve moment büyüklüğü (Mw) 5.8 olan bir deprem ile yoğun bir şekilde sarsılan bölgelerden biridir. Sarsıntı yapılarda birtakım orta hasarlar oluşturmakla birlikte Avcılarda bir minarenin de yıkılmasına neden olmuştur. Bu çalışmada ivmeölçerlere ait kesme dalga formlarının tepki spektrum oranları hesaplanarak zemin etkileri incelenmiş ve Kuzey Anadolu Fayına ait Marmara kolunda olası büyük bir depremde tedbir ve hazırlık çalışmalarına ilksel katkı sağlaması amacıyla önemli deneysel sonuçlar bulunmuştur.

## 2 Veri seti ve yöntem

Dalga hareket denkleminin ikinci dereceden adi diferansiyel açık çözümü ile lineer elastik tepki spektrumları elde edilmiştir. Bu spektrum tek serbestlik dereceli bir sistemin yer ivmesine maruz kalması ve pik yer değiştirmelerin her bir spektral periyot için hesaplanmasının ardından psödo-ivmeler elde edilmiştir. $\ddot{x}_{g(t)}$ yer ivmesine sahip bir harekete maruz kalan bir TSD sistemin hareket denklemi eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$\ddot{x}(t) + 2\varphi\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = -\ddot{x}_{g(t)} \quad (1)$$

Burada φ, sönüm oranını, $\omega_0$ sistemin temel açısal frekansını temsil etmektedir, Bu ikinci dereceden lineer adi diferansiyel denklem Duhamel integralinin sıfır başlangıç koşulları için çözülebilmektedir.

%5 sönüm oranına göre çözülen spektral ivmeler her bir deprem bileşeni için hesaplanmış ve yatay bileşenler düşey bileşenlere oranlanarak zemin etkisinin ve buna bağlı baskın yer frekansının ortaya çıkması sağlanmıştır. Hesaplamalar Matlab programı aracı ile Wang [12]'ın kodu düzenlenerek Duhamel integralinin sayısal çözümüne dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Teorik büyütme faktörlerinin hesabında ise Tsai [13]'in yinelemeli algoritmasına dayanan ve Bignardi ve diğ. [14] ile Herak [15] çalışmalarında yazdıkları Matlab kodu revize edilerek kullanılmıştır.

Moment Büyüklüğü (Mw) 5.8 ve 7.7 km derinlikte olan Marmara denizi depremi 47 KYH istasyonunda 10 gal üzerinde yer ivmesinin ölçülmesine yol açmıştır. İstasyonlar CMG-5TD, GMSplus ve Sara (Acebox) ivmeölçerlerine ait kayıtçı ve sensörlere sahiptir. Merkez üssüne en uzakta olan istasyon 157 km uzaklıktadır (Şekil 1).

Yatay bileşen (Kuzey-GüneyveDoğu-Batı) ivme kayıtlarına sismoloji disiplininde sıklıkla uygulanan radyal-tanjansiyel dönüşümü uygulanmıştır. Bu dönüşümün amacı coğrafi koordinat düzleminde bulunan sismometreleri deprem dalga yayınım doğrultusunagöre tam yatay bileşenlere dönüştürmektir. Radyal-tanjansiyel koordinat sistemine dönüşümün (rotasyon) esas amaçlarından biri P-SV-Rayleigh dalgalarını SH dalgalarından ayırmaya yardımcı olmasıdır. Özellikle uzak alan depremlerde hız kayıtçılarında genlik distorsiyonunu (biçimde meydana gelen bozulma) önlemek amacıyla yapılan dönüşüm yakın alan orta deprem büyüklükleriyle yapılan bu çalışma için de sınanmıştır. Rotasyon, Kuzey (N) ve Doğu (E) bileşenlerinden oluşan matrisin dönüşüm matrisi ile çarpımı şeklinde uygulanır. A, dönüşüm matrisini eşitlik (2)'de verilmiştir:

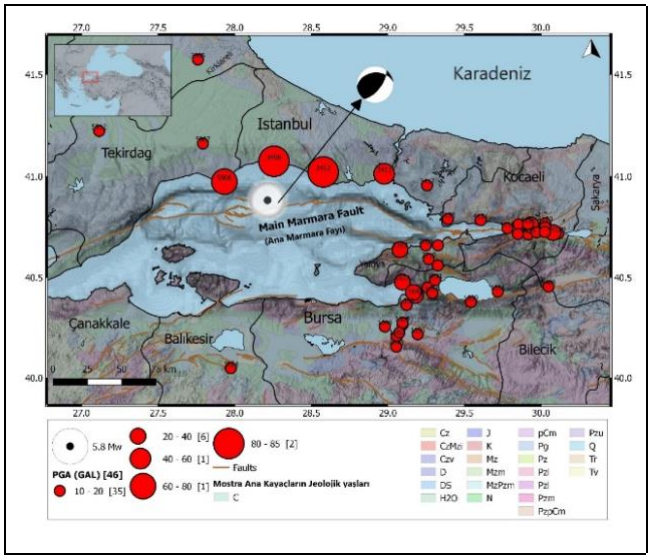
$$A = \begin{bmatrix} cos\emptyset & sin\emptyset \\ -sin\emptyset & cos\emptyset \end{bmatrix} \quad (2)$$

Buradan radyal-tanjansiyel dönüşüm işlemi denklem (3), (4) ve (5) eşitlikleri ile hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} = A, \begin{bmatrix} N \\ E \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R(t) = cos\emptyset, \mathrm{N(t)} + \mathrm{sin\emptyset, E(t)} \quad (4)$$

$$T(t) = -sin\emptyset, N(t) + cos\emptyset, E(t) \quad (5)$$




Şekil 1. 26 Eylül 2019 Marmara denizi depreminin merkez üssü ve istasyonların en yüksek ivme büyüklüklerine göre dağılımları.

*Figure 1. Distribution of stations according to recorded peak ground accelerations and the epicenter of September 26, 2019 Marmara Sea Earthquake.*

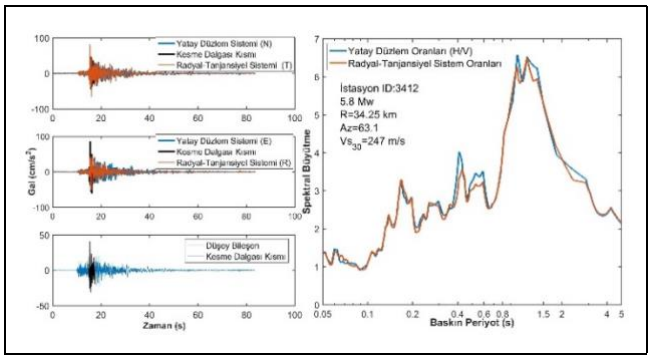
Burada, ø deprem merkez üssünden sismometreye olan azimuta işaret etmektedir. Bu çalışmada azimutlar belirlenerek Matlab'de yazılan bir fonksiyon ile yatay bileşen sismometrelere ait kayıtlar, radyal ve tanjansiyel bileşenlere dönüştürülmüştür. Şekil 2'de yatay düzlemdeki bileşenlerle (N ve E) radyal-tanjansiyel düzlemdeki bileşenlerin (R ve T) sonuçlara etkisi karşılaştırılmıştır. Dönüşümün ardından üç bileşen ivme kayıtları, uzun periyodlardan ve gürültü kaynaklı alçak frekanslardan kaçınmak için 4. dereceden Butterworthband-geçişli filtre ile 0.15-15 Hz arasında süzülmüştür. Kayıtlara ait sinyal-gürültü seviyesi spektral yoğunluk fonksiyonları hesaplanarak 2'den büyük olması koşulu aranmıştır.

26 Eylül 2019 Marmara denizi depremini kaydeden istasyonların konumları ve kaydedilenen yüksek yer ivmesi değerlerine göre sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmektedir. Kırmızı daireler küçükten büyüğe 10 gal ve üzeri değerleri resmetmektedir. Ayrıca, AFAD'ın deprem raporunda [16] belirtildiği üzere, fay çözümlemesi sağ yanal atımı baskın ters bir faylanma mekanizmasına işaret etmesi depremin Marmara denizi vadisindeki çöküntüden kaynaklandığını göstermektedir.

Şekil 1'de renkli katman anakaya formasyonlarına ait genel jeolojik yaşları temsil etmektedir. Bu yaşlar çok kabaca spektral parametreleri doğrulayabilse de bunun her zaman ve her koşulda geçerli olmadığı bulgularda görülmektedir. Bu duruma örnek olarak, Kuvarterner birimler ile karakterize edilen İzmit körfez baseni üzerindeki istasyonların farklı sonuçlar ürettiği gösterilebilir.

## 3 Bulgular

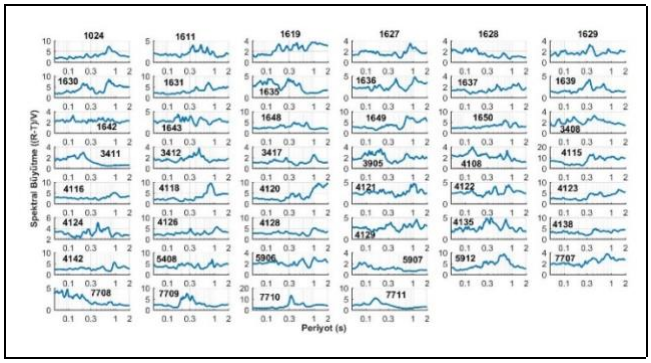
Şekil 2'de 3412 No.lu istasyona ait kayıt analiz edilerek hem yatay düzlemdeki bileşenlerden (N ve E) hem de radyal-tanjansiyel düzlemdeki bileşenlerden (R ve T) tepki spektrum oranları hesaplanıp, üst üste çizdirilerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca diğer kayıtlara da bu işlem uygulanmıştır. Görüldüğü üzere bu iki durumun spektral oranlarda farklı sonuçlar üretmediği saptanmıştır. Dolayısıyla, yatay bileşenlere radyal-tanjansiyel dönüşümü bu yaklaşımda etkili olmamaktadır.




Şekil 2. En yüksek yer ivmesini kaydeden 3412 No.lu istasyonda yatay bileşen dönüşüm sonuçlarının karşılaştırılması, Kırmızı sinyal ve tepki spektrumları radyal-tanjansiyel düzleme ait iken mavi renkteki sonuçlarda yatay düzleme aittir.

*Figure 2. Comparison of horizontal plane and radial-tangential system of 3412 coded station record. While red signals and response spectra depicts radial- tangential system, blues depicts horizontal plane.*

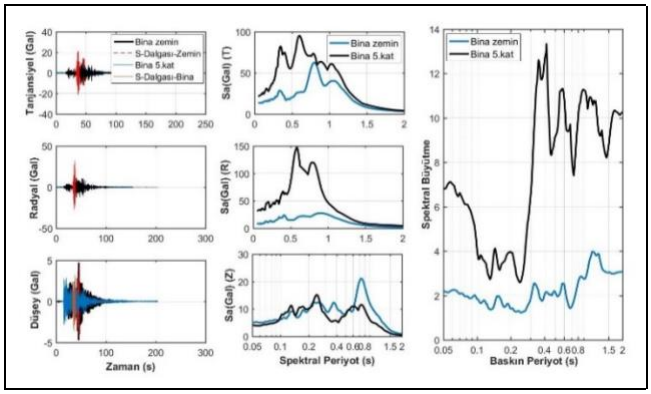
Tüm istasyonlara ait hesaplanan tepki spektrumları Şekil 3'te geniş bir baskın periyod ve büyütme faktör aralıklarının varlığını göstermektedir. Bu da zemin etkilerinin doğal bir sonucudur. 3408 No.lu istasyonda 30 m'deki kesme dalga hızı ($Vs_{30}$) 638 m/s olmasına rağmen 81.6 gal ile 3412 No.lu istasyona ait 84.9 gal'den sonra merkez üssüne en yakın olması nedeniyle en yüksek ikinci yer ivmesini kaydeden istasyon olmuştur. 3412 No.lu istasyonu 0.9 baskın periyodlu 6.2'lik belirgin bir spektral büyütme faktörü sergilerken, 3408 No.lu istasyon kırıklı mühendislik anakayalarının tipik bir davranışı olan geniş bantlarda piklere sahiptir. Klastik-Karbonat ve Kuvarterner alüvyon birimler üzerine kurulu Yalova istasyonlarında (7709, 7710 ve 7711) orta baskın periyotlarda (0.2-0.4 s) yüksek büyütmeler gözlenmektedir. Bununla birlikte yüksek periyodlarda zemin büyütmesine ait özgün bir örnek 157 km uzaklıkta 4118 No.lu istasyonda tespit edilmiştir. Tablo 1'de her bir istasyona ait hesaplanan ve istasyonlarda AFAD tarafından ölçülmüş parametreler ($Vs_{30}$, PGA) gösterilmektedir. Diğer yandan litoloji ve jeolojik yaşlar spektral büyütmeler ve periyodlar üzerine ayırt edici bir yöntem olarak yetersizliği vurgulanmıştır. Bu duruma örnek olarak Kocaeli'de Kuvarterner birimler ile karakterize edilen İzmit körfez baseni üzerinde kurulu 418, 4121, 4128 ve 4129 No.lu istasyonlar farklı sonuçlar üretmiştir. Bunun nedeninin ise sediman kalınlıklarındaki değişimden kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır [17]. 46 istasyon arasında, Devon dönemine ait bölünmemiş kaya ve Silüryen kayaçlarla çevrili 3417 No.lu istasyon 1747 m/s'lk $Vs_{30}$ hızına sahiptir ve mühendislik kayası olarak temel alınabilir. 87 km uzaklıkta ve 10.3 gal yer ivme değeri ölçülen bu istasyonda spektral salınımlar uzun periyotlarda sönümlenmiş ve 0.17 baskın periyodunda 2.7 büyütme faktörü tespit edilmiştir.




Şekil 3. 46 İstasyona ait tepki spektrum sonuçları.

*Figure 3. Response spectral ratios of 46 stations.*

4108 No.lu istasyon, 145 km episantır uzaklığında olmasına rağmen, aykırı ve yüksek bir yer ivmesi gözlenmiştir. Tepki spektrumu analiz edildiğinde bu sıradışı sonucun Kocaeli Büyükşehir Belediyesine ait binanın 5. katında yer alan cihazın verisinin analiz edilmesine bağlı bina etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Binanınzemin katında kurulu bir ivmeölçerin kayıtları veanaliz sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Yüksek spektral periyodların göreceli yüksek büyütmelere, düşük periyodların da daha az büyütmeye neden olduğu görülmektedir.




Şekil 4. 4107 (binanın Zemin katında) ve 4108 (binanın 5. katında) No.lu istasyonlardaki kayıtlara ait zaman serileri, spektral ivmeler ve tepki spektrum oranları. Zaman serisindeki kırmızıçizgiler kayma dalgası hızı, siyah ve mavi çizgiler ise bina zeminindeve 5. kattaki tepkiyi göstermektedir.

*Figure 4. Time histories, spectral accelerations and response spectral ratios of the earthquake recorded at 4108 (Inside Building 5$^{th}$ floor) and 4107 (building basement) coded stations. In time histories, red parts depict the shear wave velocities portion while black and blue lines show basement and building's 5$^{th}$ floor response, respectively.*

Tablo 1'de istasyonlara ait spektral sonuçlar ve bilgiler en yüksek yer ivmesine göre sıralanmıştır.

Tablo 1. İstasyonlara ait spektral sonuçlar.

*Table 1. Station's calculated spectral results.*

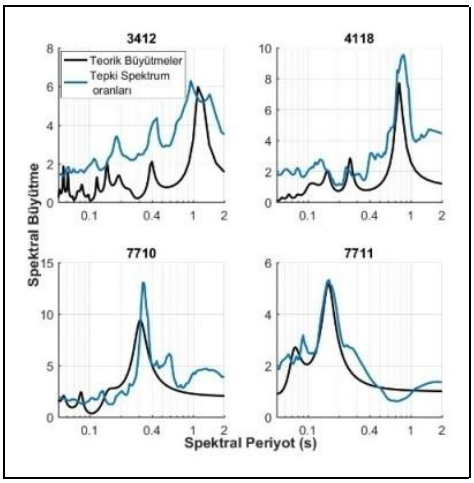
| İstasyon | R (km) | PGA (gal) | Sa | $T_0$ (s) | $Vs_{30}$(m/s) | İstasyon | R (km) | PGA (gal) | Sa | $T_0$ (s) | $Vs_{30}$(m/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3412 | 34.3 | 84.9 | 6.2 | 0.9 | 247 | 1635 | 100.4 | 13.4 | 4.4 | 0.28 | 169 |
| 3408 | 21.6 | 81.6 | ND | WR | 639 | 1650 | 103.5 | 13.2 | 5.98 | 0.73 | - |
| 5906 | 25.8 | 73 | ND | WR | 224 | 4124 | 117.6 | 12.6 | 5.04 | 0.42 | 906 |
| 3411 | 65.6 | 43.1 | 2.9 | 0.21 | 323 | 1631 | 102.2 | 12.5 | 6.88 | 0.75 | 410 |
| 1629 | 95 | 29.1 | 3.2 | 0.34 | 229 | 5912 | 99.7 | 12.4 | 9.3 | 0.67 | |
| 4118 | 157.9 | 26.1 | 9.5 | 0.84 | 190 | 4120 | 153.1 | 12.3 | 9.46 | 1.26 | 214 |
| 7707 | 77.7 | 23.5 | 3.7 | 0.84 | 312 | 1648 | 95.1 | 12.3 | 5 | 0.38 | - |
| 1642 | 96.8 | 22 | 3.2 | 0.12 | 366 | 7709 | 100.3 | 12.3 | 7.43 | 0.25 | 382 |
| 4107 | 145.3 | 21.9 | 3.9 | 1.08 | 305 | 4138 | 99.6 | 12.3 | 5 | 0.47 | |
| 1630 | 95.9 | 19.7 | 8.3 | 0.73 | 301 | 1649 | 101.2 | 12.1 | 7.79 | 0.75 | - |
| 4129 | 160.8 | 19.5 | 4.5 | 1.2 | 203 | 4122 | 153.2 | 11.6 | ND | WR | 303 |
| 5907 | 47.1 | 19.5 | 2.1 | 0.09 | 313 | 4115 | 132.7 | 11.4 | 13.13 | 0.41 | 253 |
| 4126 | 143.7 | 19.3 | 5.66 | 1.13 | 188 | 7711 | 96.9 | 11.2 | 5.33 | 0.16 | - |
| 4123 | 138.8 | 18.2 | 6.4 | 1.4 | 279 | 1619 | 104.2 | 11.1 | ND | WR | 348 |
| 1637 | 86.9 | 18.1 | ND | WR | - | 5408 | 161.9 | 11.1 | ND | WR | |
| 3905 | 85.7 | 15.7 | 3.48 | 0.21 | - | 4128 | 153.4 | 11 | 5.1 | 1.02 | 258 |
| 1024 | 95 | 15.5 | 7.3 | 0.71 | - | 1611 | 136.4 | 10.9 | ND | MP | 251 |
| 7708 | 90.5 | 15.2 | 4.7 | 0.1 | 196 | 4142 | 138.5 | 10.7 | 5.53 | 0.94 | - |
| 1628 | 100.6 | 15.1 | 2.64 | 0.16 | 488 | 1643 | 107.6 | 10.7 | ND | WR | - |
| 7710 | 94.5 | 15.1 | 13.04 | 0.33 | 358 | 4121 | 148.8 | 10.7 | 4.77 | 1.05 | 286 |
| 1627 | 103 | 15 | 3.46 | 0.87 | 249 | 3417 | 87.9 | 10.3 | 2.7 | 0.16 | 1747 |
| 4116 | 140.2 | 15 | 5.07 | 0.96 | 181 | 1636 | 111 | 10.1 | ND | MP | - |
| 4135 | 144.6 | 14.7 | 4.96 | 0.35 | - | 1639 | 125.3 | 7.1 | 4.14 | 0.37 | - |

$T_0$: Baskın periyod. Sa: Spektral büyütme. R: Uzaklık. PGA: Kaydedilen en yüksek yer İvmesi. $Vs_{30}$: 30 m'deki kesme dalga hızı. ND: Tanımlanamayan. WR: Geniş aralık. MP: Çok doruklu.

Sonuçlar Şekil 3'teki spektral biçimlerle karşılaştırılmıştır. Bazı istasyonlarda görülen belirgin olmayan biçimler de Tablo 1'de ifade edilmiştir. Burada dikkat çeken husus; yüksek spektral periyodlarda düşey bileşene ait tepki spektrumu daha yüksek spektral ivmeler sergilemekle beraber bina içi yatay bileşenlerin spektral ivmeleri zemine göre oldukça fazla olmasıdır.

Spektral ivme oranlarına ait bu etki, düşey yönde yayılan SH dalgalarının zemin baskın periyotlarıyla uyumlu bir salınım içinde olmasıdır ki bu da zemin etkisinin aletsel bir göstergesi olduğuna işaret etmektedir. Spektral ivmelerdeki genlikler düşey bileşende bina tarafından sönümlenmekte ve yatay spektral ivme büyütmelerine neden olmaktadır.

Güvenilir geoteknik bilgiye sahip istasyonlarda teorik spektral oranlar hesaplanarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Zemin modelleri AFAD istasyon raporlarına dayanarak 3412. 4118. 7710 ve 7711 No.lu istasyonları için hazırlanmıştır. 1-Boyutlu teorik transfer fonksiyonları Şekil 5'te görüleceği üzere bir boyutlu model kısıtlamaları nedeni ile farklılık gösterse de baskın periyotlar deneysel sonuçlarla örtüşmektedir.




Şekil 5. Teorik büyütmeler ve tepki spektrum oranlarının karşılaştırılması.

*Figure 5. Comparison of theoretical amplifications and response spectral ratios.*

## 4 Sonuçlar

26 Eylül 2019 Marmara Denizi depreminin 46 istasyondaki ivme kayıtlarına yapılan analizlerle depremin hem uzak hem de yakın alanda oluşturabileceği etkiler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deprem kayıtlarına ait kesme dalga faz kısımlarının spektral analizi zemin büyütmelerini belirlemede güvenilir bir araç olarak sunulmaktadır. Oluşan deprem kuvvetine (ivmesine) bağlı olarak lineer yaklaşımla çözümlenen bulgular, sismik mikro bölgeleme ve deprem risk azaltma çalışmalarına altlık oluşturabileceği öngörülmektedir.

Radyal-tanyansiyel dönüşümünün yakın alan zemin etki analizleri üzerinde bir fark oluşturmadığı sonucuna varılmakla birlikte 1-B teorik büyütmelerin çok fazla geoteknik bilgiye gereksinim duyduğu bu yüzden aletsel verinin varlığında ve düzgün analizinde üretilecek sonuçların daha güvenilir olduğu anlaşılabilir. $Vs_{30}$ hızlarının ve jeolojik formasyonların tek başına etkinliği olmayıp sediman kalınlıkların sismik zemin büyütmede önemli bir rol oynadığı ortaya çıkmaktadır. Teorik büyütmelerin frekans bağımlı 1-B transfer fonksiyonlarının çözümünde sağlanan sonuçlar deneysel spektral oran hesaplamalarıyla örtüşse de girdisi gereken birçok parametre sağlanmayabildiğinden bu tür aletsel (deneysel) hesaplamalar daha tutarlı sonuçlar üretmede etkinliğini ispatladığı söylenebilir.

## 5 Conclusion

The analyses of strong ground motion records have revealed potential site effects originated from both near and far field. The shear wave parts of earthquake signals have been conferred as a reliable tool in order to determine spectral amplification factors and predominant periods. Depending on the force generated by the ground motion, convincing experimental results which derived by linear approach could shed light on seismic microzonation studies and earthquake risk mitigation.

Rotating the horizontal components to radial-tangential system do not effect the predominant periods and amplitudes. Thus it seems a fair approach studying in the horizontal system for nearfield local site effect studies. Geological formations and uppermost 30 shear wave velocities ($Vs_{30}$) sometimes could not be an indicator of stiffness on site predominant periods and corresponding amplification. Sediment thickness played crucial roles here, as observed in stations installed on the Izmit basin.

In spite of promising results for the 1-D analytical solutions of the stratified layer's frequency dependent transfer functions, it is a very costly method and a long shot to fully provide the soil model parameters. So, when instrumental data are available, this will be an effective way to evaluate probable risk for the issue of site effects.

## 6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Hamdullah LİVAOĞLU, ve Fadime SERTÇELİK fikrin oluşması, tasarımın yapılması, Hamdullah LİVAOĞLU literatür taraması ve hesaplamaların gerçekleştirilmesinde; Fadime SERTÇELİK elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## 7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 8 Kaynaklar

[1] Zare M, Bard PY. "Strong motion dataset of Turkey: data processing and site classification". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(8), 703-718, 2002.

[2] Nakamura Y. "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*". QR Railway Techical Research Institue*, 30(1), 25-33, 1989.

[3] Yamazaki F, Ansary MA. "Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization". *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 26(7), 671-689, 1997.

[4] Ghasemi H, Zare M, Fukushima Y, Sinaeian F. "Applying empirical methods in site classification using response spectral ratio (H/V): A case study on Iranian strong motion network (ISMN)". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), 121-132, 2009.

[5] Di Alessandro C, Bonilla LF, Boore DM, Rovelli A, Scotti O. "Predominant-period site classification for response spectra prediction equations in Italy". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 680-695, 2012.

[6] Gibowicz SJ, Pajchel J, Droste Z, Hordejuk J. "Numerical simulation of ground acceleration spectra and accelerograms for engineering application". *Pure and Applied Geophysics,* 119(2), 380-391, 1980.

[7] Boore DM. "Simulation of ground motion using the stochastic method". *Pure and Applied Geophysics*, 160(3-4), 635-676, 2003.

[8] Terzi NU, Yıldırım S. "Farklı zemin ortamlarına yerleştirilen esnek gömülü boruların düşey yükler altındaki şekil değişimimin deneysel ve amprik yöntemlerle incelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 15(1), 49-58, 2010.

[9] Gök E, Polat O. "İzmir Kuvvetli Yer Hareketi Deprem İstasyon Ağı: İzmirNET". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3), 233-243, 2011.

[10] Zülfikar AC, Tekin S, Akcan SO, Gök MG. "26 Eylül 2019 Silivri açıkları (Marmara Denizi) depreminin kuvvetli yer hareketi verilerinin değerlendirilmesi". *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 1720-1736, 2020.

[11] Livaoğlu H, Irmak T S, Güven IT, "Seismic vulnerability indices of ground for Değirmendere (Kocaeli Province Turkey)". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 507-517, 2019.

[12] Wang LJ. "Processing of Near-Field Earthquake Accelerograms". *Earthquake Engineering Research Laboratory*, Pasadena, California, Report No. EERL 96-04. 1996.

[13] Tsai NC. "A note on the steady-state response of an elastic half-space". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(3), 795-808, 1970.

[14] Bignardi SMA, Zeid NA. "OpenHVSR: imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSR modeling and inversion". *Computers Geosciences,* 93, 103-113, 2016.

[15] Herak M. "ModelHVSR-A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise". *Computers and Geosciences*, 34(11), 1514-1526, 2008.
[16] T.C. İç İşleri Bakanlığı. "Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı". AFAD Marmara Denizi Silivri Açıkları (İstanbul) Depremi Mw 5.8 Ön Değerlendirme Raporu. Ankara, Türkiye, 6601, 2019.
[17] Livaoğlu H, Irmak TS. "An empirical relationship between seismic bedrock depth and fundamental frequency for Değirmendere (Kocaeli-Turkey)". *Environmental Earth Sciences*, 76, 20-681, 2017.