

Zemin Hâkim Frekanslarının Farklı Algoritmalarla Belirlenmesi: İzmir Örneği

Ahu Kömeç Mutlu^{1*}, Ülgen Mert Tuğsal¹, Musavver Didem Cambaz²

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli.

²Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 34684, İstanbul.

Özet

30 Ekim 2020 günü yerel saat ile 14:51'de Ege Denizi'nde Samos Adası'nın kuzeyi ile Doğanbey-İzmir açıklarında meydana gelen deprem (Mw 6,9) İzmir, Samos Adası ve çevresindeki birçok il ve yerleşim yerinde hissedilmiştir. Deprem şiddet haritasına bakıldığında beklenen aksine en büyük etki merkez üssünden 70 km uzakta bulunan Bayraklı ilçesinde meydana gelmiş ve bölgede sadece ağır yapısal hasara değil can kayıplarına da neden olmuştur. Meydana gelen yapısal hasarlar değerlendirildiğinde, olası bir depremin etkilerinin tahmin edilmesi çalışmalarında yerel zemin özelliklerinin belirlenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Deprem anında yerin zemin hâkim frekansını ve zemin yükseltgenme faktörünü belirlemede HVSR (Yatay Düşey Spektral Oran) yöntemi yoğun deprem aktivitesi olmayan bölgelerde bile yaygın olarak kullanılabilmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada ivme-ölçer ve hız istasyonu kayıtlarından alınan deprem ve gürültü verilerinin farklı yazılımlar kullanılarak HVSR yöntemi ile analizi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca aynı istasyonların verileri kullanılarak farklı yerel zemin sınıfları için davranış spektrumları elde edilmiş ve deprem yönetmeliğinde yer alan tasarım spektrumları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda HVSR yöntemi ile elde edilen sonuçların bölgedeki zemin etkilerini ve buna bağlı olarak gelişen yapısal hasarları doğrular nitelikte olduğu gözlenmiştir. HVSRpy ve Geopsy programları kullanılarak elde edilen sonuçlar, birbiri ile uyum içerisinde olup HVSRpy fonksiyonel bir şekilde GEOPSY ile benzer kararlılıkta sonuçlar üretebilmektedir ve kullanıcının python açık kod kullanımındaki yatkınlığına göre araştırmacılar tarafından pratik bir şekilde kullanımı sağlanabilir.

Anahtar Sözcükler

Yatay Düşey Spektral Oran (HVSR), Zemin Hâkim Frekansı, Ege Denizi Depremi, Geopsy, HVSRpy

A Comparative Investigation of Soil Fundamental Frequencies: A Case Study for İzmir Province

Abstract

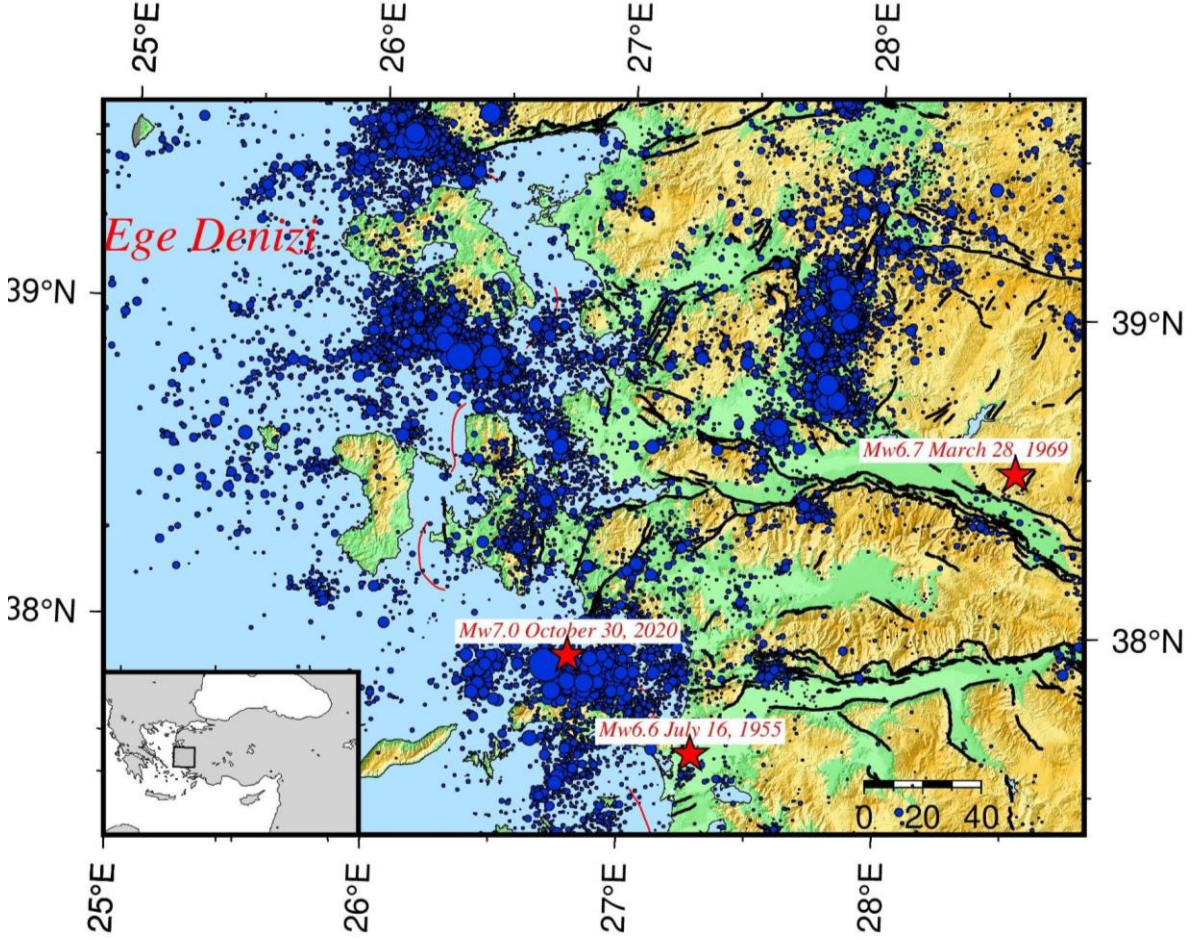
The earthquake (Mw 6.9) that occurred in the northern part of Samos Island and Doğanbey-İzmir offshore in the Aegean Sea at 14:51 local time on October 30, 2020 was felt in İzmir, Samos Island and many surrounding cities and settlements. Considering the earthquake intensity map, contrary to what is expected, the highest impact occurred in Bayraklı district, which is 70 km away from the epicenter, and caused not only severe structural damage but also fatalities in the region. When the structural damages are evaluated, determining the local soil properties has an important place in the studies to predict the effects of a possible earthquake. The HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio) method provides an advantage in determining the soil fundamental frequency and the soil amplification factor in the event of an earthquake, in that it can be widely used even in the seismically in-active regions. In this study, it is not only aimed to analyze the earthquake and ambient noise data obtained from the accelerometer and velocity stations but also to compare the results obtained by using HVSR method utilizing different softwares. Furthermore, response spectra were obtained for different local soil classes by using the data of the same stations and they are given in comparison with the design spectra included in the earthquake code. As a result of the study, it has been observed that the results obtained by the HVSR method are in good correlation with the soil effects in the region and the consequential structural damages. These examples illustrate HVSRpy's commitment to exactly reproduce the results of GEOPSY, wherever the processing parameters and functionality of HVSRpy and GEOPSY overlap. This was done to allow users to check HVSRpy and to encourage standardization in HVSR processing.

Keywords

Horizontal Vertical Spectral Ratio (HVSR), Soil Fundamental Frequency, Aegean Sea Earthquake, Geopsy, HVSRpy

1. Giriş

Batı Anadolu ve Ege Denizi dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden birisidir (Taymaz vd. 2007). Geçmişten bu yana bölgede çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Şekil 1). Dört milyonun üzerinde nüfusu bulunan İzmir, 2018’de yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına (Akkar vd. 2018) göre yüksek sismik risk bölgesinde yer almaktadır. Aletsel dönem öncesi yazılı kaynaklardan bu yana büyük depremlerin meydana geldiği (Tepe vd. 2021) ve yoğun nüfus dağılımı ile aktif fay zonlarının bir arada yer aldığı bu tür kentlerde olası depremlerde meydana gelebilecek kayıpların önüne geçebilmek için bölgedeki zemin yapısının ve olası bir deprem anındaki davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Depremlerin yapılar üzerindeki etkisi bu yapıların buldukları yerel zemin koşulları ile doğrudan ilişkilidir. Yapısal tasarım aşamasında zemin hâkim periyodu ile ilgili edinilecek her türlü bilgi olası bir depremde meydana gelebilecek hasarın belirlenmesi ve azaltılabilmesi için kullanılabilir.



Şekil 1: İzmir ve çevresinin son on yıllık sismisite haritası. Kırmızı yıldızlar $M > 6.5$ depremleri, siyah çizgiler fayları göstermektedir (Emre vd. 2018)

İzmir ili ve civarı sanayi, endüstri ve kentleşmenin yoğun olarak geliştiği bir bölge olduğundan meydana gelebilecek bir depremde olası deprem zararlarının tespiti ve bu zararların azaltılmasına yönelik alınacak tedbirlerin belirlenmesi için farklı üniversite, kurum ve kuruluş tarafından çeşitli detayda çalışmalar yapılmıştır. İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından bölgede 2010 yılında kapsamlı bir master planı hazırlanmıştır (URL-1 2021). Bu plana göre en önemli ve en kritik konulardan birinin, İzmir kent merkezindeki yapılarda oluşabilecek yapı hasarlarının ve bu hasara bağlı olarak yaşanabilecek kayıpların tahmin edilmesi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bölgede mikrotremör ve deprem çalışmalarından HVSZ (Yatay-Düsey Spektral Oran) yöntemi kullanılarak detaylı yerel zemin etkileri çalışmaları yapılmıştır (Gök 2011), P dalgası, S dalgası ve gürültü kayıtlarını kullanarak yapılan hesaplamalarda S dalgasının spektral oranından elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu elde edilmiştir (Durmuş 2012). İzmir ve civarının zemin özelliklerinin belirlenmesi için sismik hızlar detaylı olarak araştırılmıştır. Bölgedeki faylar çeşitli araştırmacılar tarafından çalışılarak haritalanmıştır (Aksu vd. 1987; Emre vd. 2005; Ocakoğlu vd. 2005). Ege Denizi’nde, 30 Ekim 2020’de meydana gelen (Mw 6.9) büyüklüğündeki depremden sonra yapılan sismoloji (Kıratzi vd. 2020), tsunami (Yalçın vd. 2020), geoteknik ve deprem mühendisliği konularındaki (Akkar vd. 2014; Çetin vd. 2020) kapsamlı çalışmalar depremden hemen sonra hızlı bir şekilde hazırlanarak yayınlanmıştır (Çetin vd. 2020).

Deprem anında yerin hâkim titreşim periyodu ve büyütme faktörünü belirleyen temel faktör S dalgası hız yapısıdır. S dalgası hız yapısı HVSR spektral oran yöntemi ile de belirlenebilir. Fakat HVSR yöntemi sediman kalınlığı ve S dalga hızı oranına duyarlı olduğu için güvenilir olduğu durumlar değişkenlik gösterebilir.

Bu yüzden, HVSR yöntemi ile yapılan çalışmalarda sonuçların daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için, yöntemin sismik kaynak, istasyon tipi kullanılan yazılıma bağlı hassasiyetini önceden bilmek gerekmektedir. Bu çalışmada, bölgede hâlihazırda işletilmekte olan istasyonlardan alınan veriler kullanılarak İzmir civarındaki zemin koşulları ve büyütme değerlerinin farklı alıcı, kaynak ve yazılımlarla hesaplanması ve sonuçların karşılaştırmalı olarak ele alınması üzerine çalışılmıştır. Bu amaçla yatay düşey spektral oran yöntemi (HVSR) kullanılmış ve hesaplanan zemin hâkim frekans değerleri yorumlanmıştır. Ayrıca meydana gelen deprem sonrasında yapılara etkiyen deprem yükünün belirlenmesi ve bölgede oluşan hasarın değerlendirilmesi amacıyla farklı zeminlerde konumlanmış olan istasyonlardan alınan kayıtlar kullanılarak davranış spektrumları elde edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler, hem yöntemin farklı parametrelere karşı duyarlılığının belirlenmesine hem de bölgedeki zemin özelliklerinin anlaşılması çalışmalarına katkı sağlayacaktır.

2. Jeoloji ve Tektonik

Alp Himalaya kuşağı üzerinde bulunan Türkiye birçok sismik zonu içerisinde bulunduran, sismolojik olarak aktif bir bölgede yer almaktadır (Taymaz vd. 1991). Ana karası Tetis okyanusunun kapanması sonucu bir araya gelen, çeşitli kıta ve okyanus parçaları ile şekillenmiş, dünyadaki sismik olarak en aktif neotektonik bölgelerden birisidir (Bozkurt 2001). Batı Anadolu’da aktif tektonik rejim açılma olup, yılda yaklaşık 20 mm/yıl K-G yönlü açılma gözlenmektedir (McKenzie 1972; Michael 1984; Şaroğlu vd. 1992; Şengör 1987; Taymaz vd. 1991). Bu nedenle, bölgede birçok graben gelişmektedir. Bölgede yoğun olarak yer almakta olan fay sistemleri çeşitli araştırmacı ve kurumlar vasıtasıyla haritalanmıştır (Emre vd. 2005, Emre vd. 2013). İzmir ve çevresinde hem tarihsel hem de aletsel dönem boyunca yoğun miktarda deprem aktivitesi gözlenmektedir (Şekil 1). İzmir ve yakın çevresinde tarihsel dönemde hasara yol açmış büyük depremler İzmir Deprem Senaryosu ve Deprem Master Planı (İDSMP) (URL-2, (2021)) detaylı olarak çalışılmıştır.

Bölgede genel olarak Sakarya Zonu, İzmir-Ankara Kenet kuşağı, Menderes Masifi, Likya napları dört temel birim olarak tanımlanmaktadır (Şengör vd. 1985; Şengör vd. 1987; Yılmaz 1997) (Şekil 2). İzmir- Ankara kenet kuşağı kuzeyde Sakarya zonu ile güneyde Menderes Masifi arasında kalmakta Antatolid Toridler boyunca devam etmektedir. Yer yer metamorfizma ve aşırı deformasyon geçirmiş volkanik sedimanter birimlerden oluşmaktadır. Menderes masifi bu bölgedeki en önemli metamorfik birim olarak yer almaktadır ve Batı Anadolu’nun temelini oluşturur (Emre vd. 2005). Yüksek derecede metamorfizma geçirmiş gnays ve şistler bu masifin çekirdeğini oluşturur (Şengör vd. 1984). Bölgede yapılmış detaylı jeolojik çalışmalar, fay araştırmaları ve metamorfizma yaşı ile ilgili çalışmalar literatürde yaygın olarak yer almaktadır (Yılmaz 1997; Şengör vd. 1984; Yılmaz vd. 2000; Emre vd. 2005).

3. Veri ve Yöntem

Deprem dalgalarının seyahati, zemin türüne bağlı olarak değişiklikler gösterir ve özellikle ana kaya ve gevşek zeminlerde önemli farklılıklarla gelişir. Zeminlerin fiziksel özellikleri hissedilen titreşimin karakteristiğini önemli ölçüde etkiler. Yerel sismik tepki tahmini için en yaygın teknik, iki bölgedeki deprem kayıtlarını karşılaştıran standart spektral oran (SSR) yöntemidir. Bu yöntemde, genellikle katı ana kaya üzerinde yer alan ve önemli saha etkilerinden yoksun olduğu düşünülen bir “referans bölge” ve bu bölgede kayıt alan “referans istasyon”a ihtiyaç vardır. Referans istasyona ihtiyaç duymayan başka bir yöntem ise, gürültü kayıtları (yani, mikrotremör ortam titreşimleri) kullanılarak yatay-dikey spektral oranına (HVSR) dayanır. Bu yöntem ilk olarak Nakamura (1989) tarafından yeraltı jeolojik birimlerinin transfer fonksiyonunu karakterize etmek için tanımlanmıştır. Yumuşak toprak birikintilerinin yüzeyindeki hâkim yer hareketi tepkisi sıklığının güvenilir bir tahminini sağladığı gösterildiğinden, son yirmi yılda yaygın olarak kullanılmaktadır (Lermo ve Chavez-Garcia 1993).

Farklı bölgelerdeki zemin koşullarının belirlenmesinde Nakamura (1989) Yöntemi olarak da bilinen HVSR yöntemi kullanılmıştır (Lermo ve Chavez-Garcia 1993). HVSR yöntemi yatay bileşenin aksine düşey bileşenin yerel zemin koşullarından etkilenmediği varsayımına dayanır böylece hareketin yatay bileşeninin düşey bileşenine oranı yerel zemin koşullarının etkisini verir (Lachet vd. 1994; Lachet vd. 1996; Bonilla vd. 1997; Field ve Jacop 1995; Triantafyllidis vd. 1999; Couter ve Mola 1998; Dimitriu vd. 1998; Riepl vd. 1998; Yalçınkaya 2002). HVSR yöntemi uygulanarak elde edilen yerel maksimum değerlerine karşı gelen frekans değerleri doğal frekansı vermektedir (Kramer 1996).

Türkiye’de meydana gelen depremlere ait veriler, Afet ve Acil Durum Yönetimi Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD) (Kadirioğlu ve Kartal 2016; Kadirioğlu vd. 2018) ve Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem ve Tsunami İzleme Merkezi (KRDAE-BDTIM) (Cambaz vd. 2019a; Cambaz vd. 2019b; Cambaz vd. 2021) tarafından işletilmekte olan sismik ağlar tarafından kayıt edilmekte ve bu veriler kullanıcılara açılmaktadır. Bu çalışmada AFAD ve KRDAE ağlarının hız ve ivmeölçer istasyon kayıtlarından faydalanılmıştır. Her iki sismik ağına ilgili web sayfasından ayrı ayrı hız ve ivmeölçer istasyonların verileri çekilerek veri işlem için hazırlanmıştır.

Çalışmada hem sismik gürültü hem de deprem verisi kayıtlarına yer verilerek farklı özellikteki istasyonların H/V spektral oran değişimlerinin gözlenebilmesi amaçlanmıştır. Verilerin işlenmesinde Geopsy (Wathalet vd. 2020) ve HVSRpy (Vantassel 2020) yazılımları ile yapılan çalışmanın sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

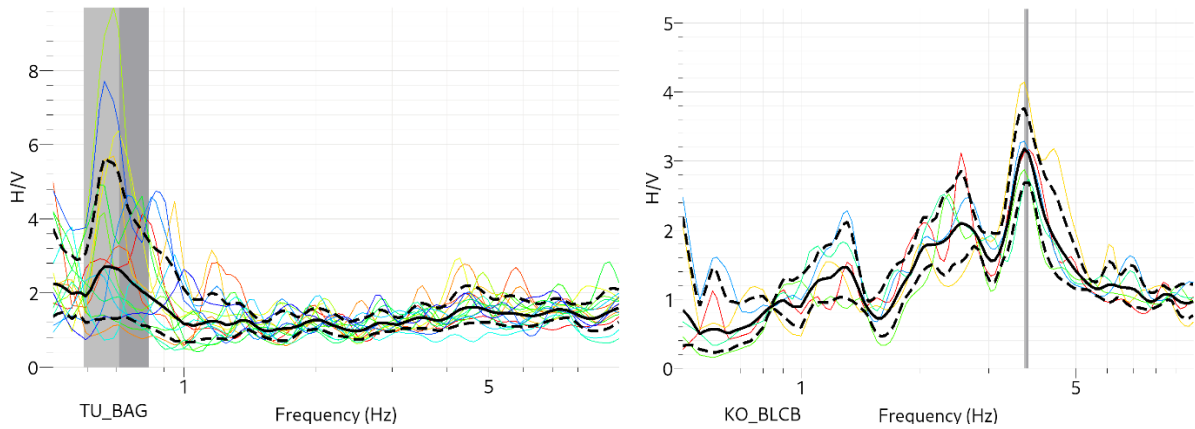
3.1 GEOPSY ile Deprem Verisi Analizi

Zemin baskın frekans tayini analizi için 30 Ekim 2020 (Mw6.9) Ege Denizi depremi sonrasında meydana gelen artçı deprem dağılımından 11 adet deprem seçilmiştir (Tablo 1). Deprem seçiminde, analizi yapılacak istasyonlarda SNR oranı yüksek kaydedilmiş olmaları ve yeterli pencere boyutunu sağlayacak mesafede başka deprem izi ile karışmamış sinyaller olmaları kriterleri göz önünde tutulmuştur. Seçilen depremler iki adet sismik hız istasyonu (BAG, BLCB) ve dört adet ivmeölçer istasyonu (TK-3512, TK-3513, TK3514, TK3519) olmak üzere 4 farklı zemin cinsi (ZC: Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kaya, ZD: Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları, ZB: Az ayrılmış, orta sağlam kaya, ZE: gevşek kum, çakıl veya yumuşak-katı kil tabakaları) için analiz edilmiştir. Deprem kayıtları analizinde, S dalga izini içerecek şekilde 40sn pencere uzunluğu kullanılarak, seçilen 11 deprem için 11 pencere belirlenerek, H/V oranları 0.1-10 Hz. frekans aralığında hesaplanmıştır. Bu çalışmada Gök vd. (2014) çalışmasına benzer şekilde farklı pencere aralıkları denenmiş, sonuçlarda çok belirgin bir etki görülmemesi üzerine çalışmaya en az 5 pencere aralığı kullanılarak devam edilmiştir (Gök vd. 2014). Fourier genlik spektrumu bant genişliği için Konno ve Omachi (1998) yumuşatma katsayısı 40 alınarak filtrelenmiştir.

Tablo 1: Deprem verisi ile H/V yöntemi uygulaması için seçilen depremler

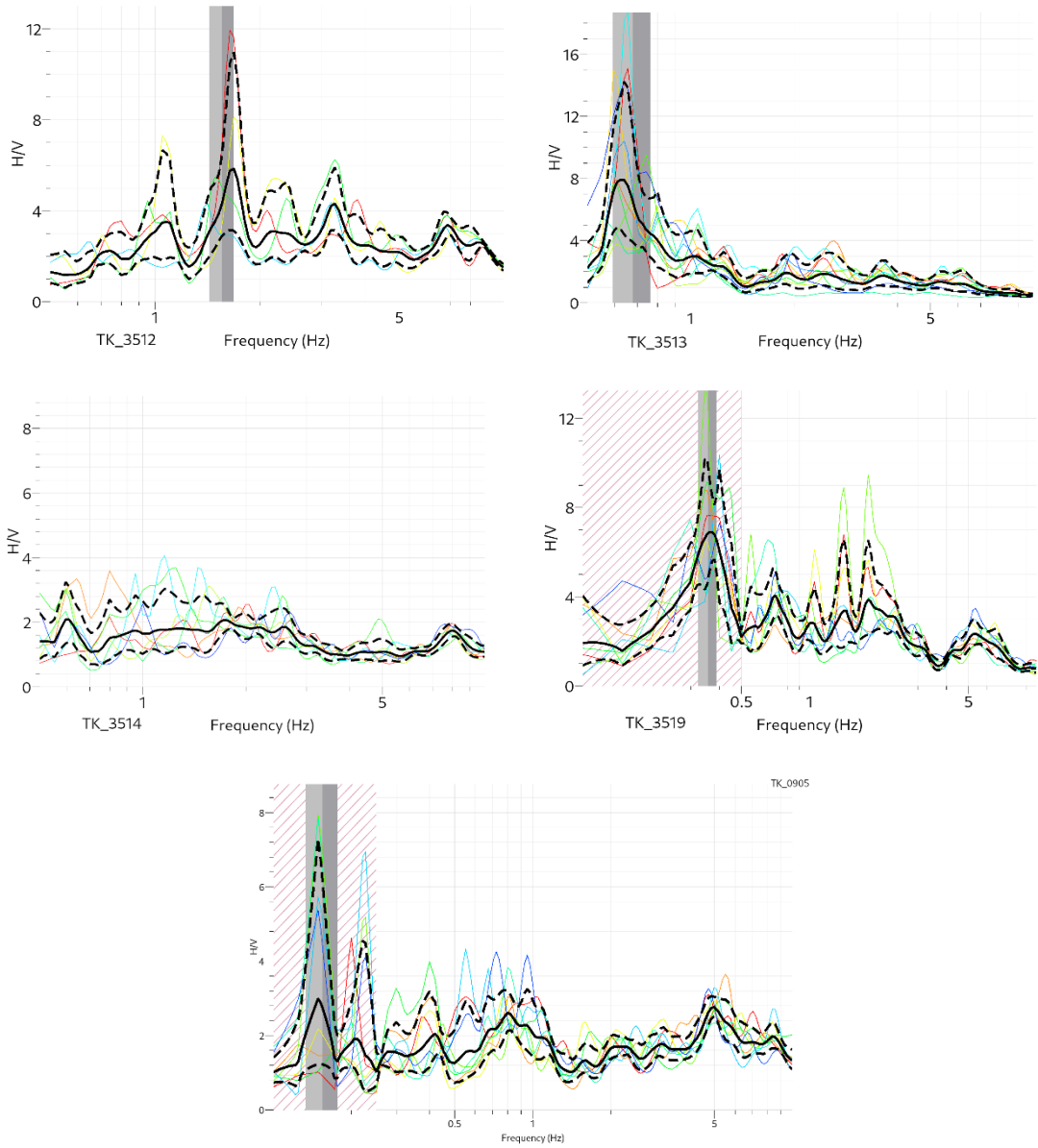
	Tarih	Saat (UTC)	Büyükölç (M _w)		Tarih	Saat (UTC)	Büyükölç (M _w)
1	2020.10.30	13:00:42	4.9	7	2020.10.30	16:40:16	4.1
2	2020.10.30	14:46:04	4.1	8	2020.10.31	05:31:29	5.1
3	2020.10.30	15:14:56	5.2	9	2020.10.31	06:03:12	3.5
4	2020.10.30	15:19:16	4.6	10	2020.10.31	06:34:38	3.9
5	2020.10.30	15:24:34	4.1	11	2020.10.31	07:05:50	3.3
6	2020.10.30	16:18:27	4.1				

Yapılan hesaplamalar sonucunda Acerra vd. (2002) kriterlerini karşılayan istasyonların verileri değerlendirmeye alınmıştır. BAG ve BLCB hız istasyonlarına ait H/V analiz sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir. BAG istasyonu analiz sonucu ± 0.12 standart sapma ile 0.71 Hz. baskın frekans ve 2.6 ortalama yükseltgenme değeri hesaplanmıştır. BLCB istasyonunda zemin hâkim frekans değeri ± 0.05 standart sapma ile 3.74 Hz. ve ortalama yükseltgenme 3.14 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2’de gösterilen kesikli çizgiler standart sapmaları, düz siyah çizgi ortalama baskın frekans değerinin değişimini ifade etmektedir. Farklı deprem sinyallerinden hesaplanan H/V dağılımları farklı renklerle ifade edilmiştir. BAG istasyonunun gürültü analizi sonuçları, yaklaşık 1 Hz. değerinde olup, yüksek gürültü seviyesine sahiptir. BAG istasyonunun görece yüksek standart sapma değeri, yüksek gürültü analizi seviyesi ile açıklanabilir. BAG istasyonu görece düşük sismik hızlı kuaterner jeolojik birimde yer almaktadır. BLCB istasyonu ise daha yüksek sismik hızlı metamorfik kayalık formasyonu üzerinde yer almaktadır. Her iki istasyonun bulunduğu yerdeki jeolojik birim farklılıkları da zemin hâkim maksimum genlik değerindeki farklılığı açıklamaktadır.



Şekil 2: BAG ve BLCB hız istasyonlarında kaydedilen 11 adet deprem sinyali kullanılarak yapılan H/V hesabı Geopsy grafikleri

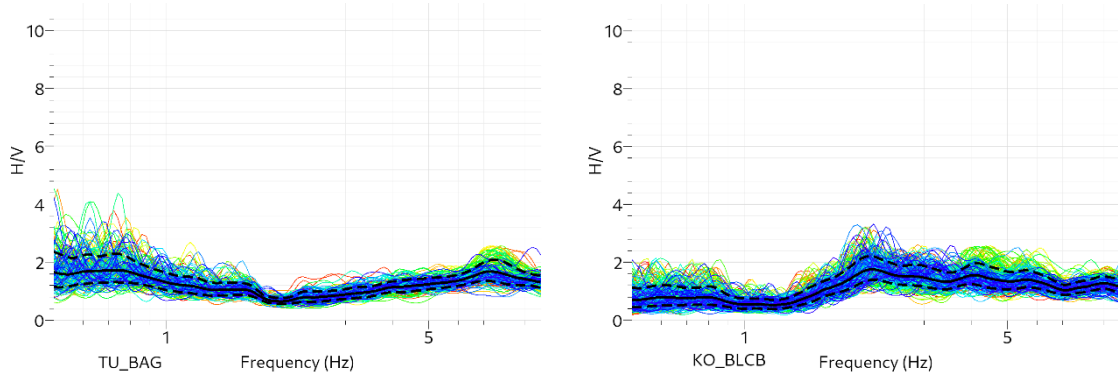
Benzer analizler, bölgede AFAD tarafından işletilen ivmeölçer kayıtçı istasyon verileri kullanılarak tekrarlanmıştır. Seçilen 11 adet deprem kaydı, farklı jeolojik birimlerde bulunan 12 adet ivmeölçer istasyonu kayıtları kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar dört farklı zemin sınıfı için karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Şekil 3'te TK-3512, TK-3513, TK-3514, TK-3519 ivmeölçer istasyonlarının, sırasıyla, ZC, ZD, ZB, ZE yerel zemin sınıfları üzerindeki sonuçları göstermektedir. Şekilde kesikli çizgiler standart sapmaları, düz siyah çizgi ortalama baskın frekans değerinin değişimi ifade etmekte kullanılmıştır. Farklı deprem sinyallerinden hesaplanan H/V dağılımları farklı renklerle gösterilmiştir. TK-3512 istasyonu verileri ile hesaplanan baskın frekans değeri $1.55 \pm 0.13 \text{ Hz}$ ve A_0 4.29 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen baskın frekans değeri, AFAD Kuvvetli Yer Hareketi İstasyon Ağı (KYHİA) kataloğunda yer alan ZC zemin sınıfına ait $V_{s,30}=468$ ve $f_0=1.8 \text{ Hz}$ değerleri ile uyumludur. ZD zemin türünde bulunan TK-3513 istasyonundan elde edilen baskın frekans değeri $0.68 \pm 0.08 \text{ Hz}$ ve A_0 yükseltgenme değeri 6.54 olarak hesaplanmıştır. AFAD-(KYHİA) TK-3513 istasyonu için listelenen $f_0=0.7$ değeri ile uyumlu baskın frekans değeri elde edilmiştir. TK3519 istasyonu için yapılan hesaplamalarda baskın zemin frekansı ve yükseltgenme değerleri sırasıyla $0.36 \pm 0.03 \text{ Hz}$ ve 6.83 olarak hesaplanmıştır. Hâkim frekans değeri AFAD-(KYHİA) $f_0=0.4 \text{ Hz}$ değeri ile uyumludur. TK3514 istasyonunda yapılan hesaplamalarda baskın frekans değeri elde edilmemiştir. Merkez üssüne en yakını bulunana ve en yüksek yer ivmesi değerinin kaydedildiği TK-0905 istasyonunda yapılan H/V spektral oran hesabı sonucunda hâkim frekans değeri $0.156 \pm 0.09 \text{ Hz}$ ve yükseltgenme değeri 2.701 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Daha fazla sayıda veri ile elde edilen sonuçların desteklenmesi gerekir.



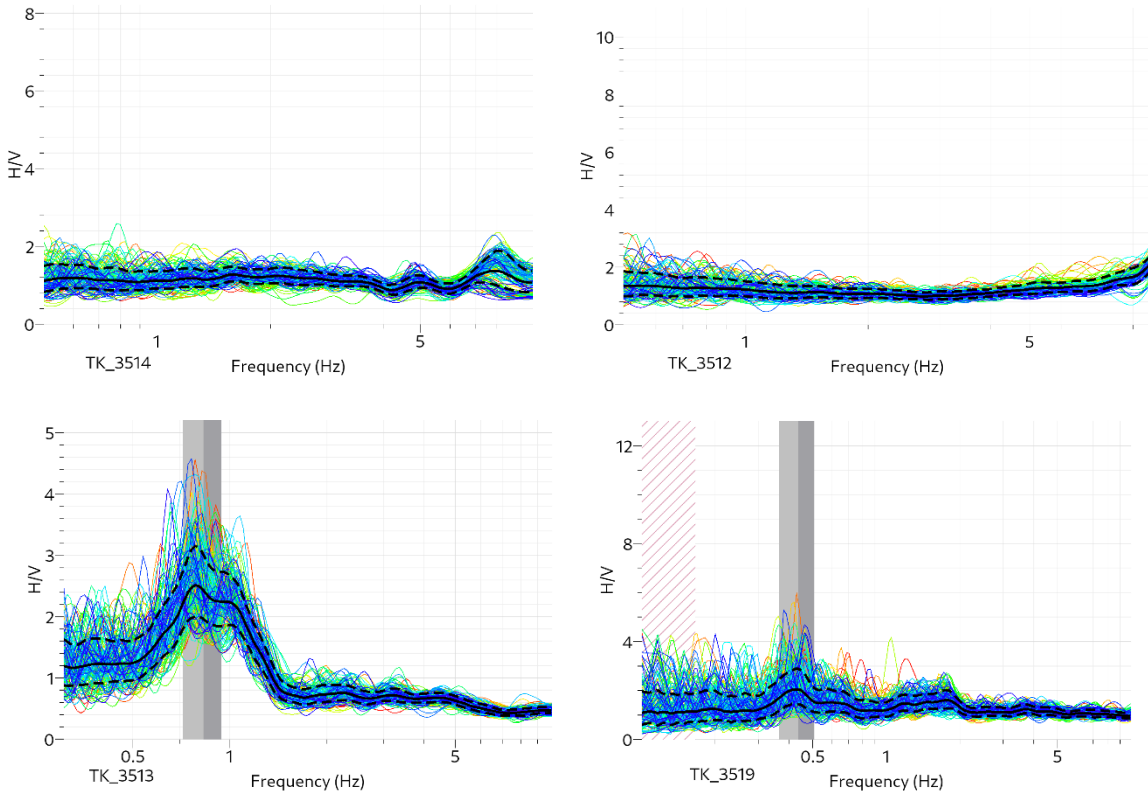
Şekil 3: TK-3512, TK-3513, TK-3514, TK-3519, TK-0905 ivmeölçer istasyonlarında kaydedilen 11 adet deprem sinyali kullanılarak yapılan H/V hesabı Geopsy grafikleri

3.2 GEOPSY ile Gürültü Verisi Analizi

Çalışma kapsamında uygulanan, Nakamura yöntemi ile tek noktada üç bileşen gürültü kaydı kullanılarak H/V spektral oran hesaplanmıştır. Zemin hâkim periyodunu hesaplamak için çevresel ve aletsel gürültü kayıtları dikkatle değerlendirilmiştir. Aletsel-endüstriyel gürültü kaynağı kirliliğini ayırt edebilmek için günün farklı zaman dilimlerinden ve mevsimsel etkiyi filtrelemek için yılın farklı günlerinden alınan 3-6 saatlik gürültü kayıtları incelenmiştir. Analiz edilen zaman diliminde deprem kaydı olmamasına özen gösterilmiştir. Dalga formları 100sn pencere aralıkları ve 0,10-10 Hz. frekans aralığı kullanılarak analiz edilmiştir. Her bir analizde en az 70 adet pencere kullanılmış ve [Konno ve Ohmachi \(1998\)](#) yuvarlatma b katsayısı 40 alınmıştır. Şekil 4'de hız istasyonları için üçer saatlik sismik gürültü verisi ile elde edilen H/V gösterilmiştir. Ortalama H/V oranı ikinin altında kaldığından bu istasyonlar için herhangi bir hâkim frekans değeri belirlenememiştir.



Şekil 4: BAG ve BLCB hız istasyonlarında kaydedilen gürültü sinyali kullanılarak yapılan H/V hesabı Geopsy grafikleri.

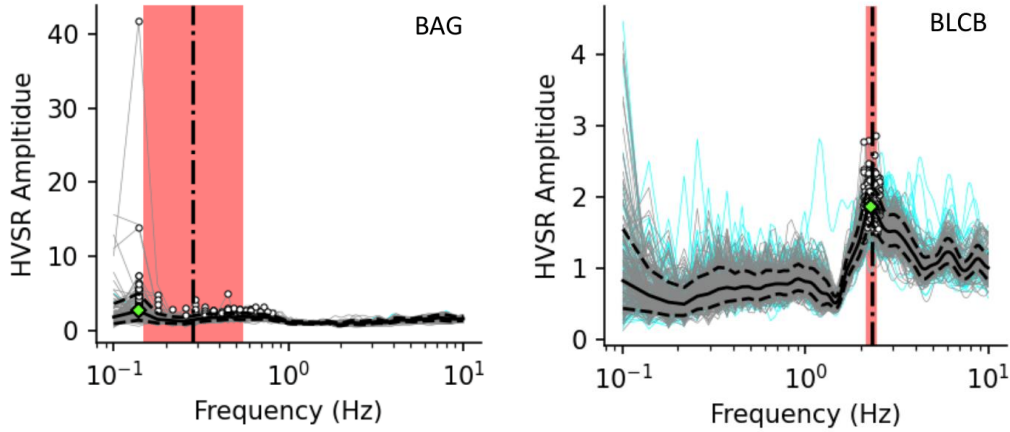


Şekil 5: TK-3512, TK-3513, TK-3514, TK-3519 ivmeölçer istasyonlarında kaydedilen gürültü sinyali kullanılarak yapılan H/V hesabı Geopsy grafikleri.

Şekil 5’de TK-3512, TK-3513, TK3514, TK3519 ivmeölçer istasyonları için üçer saatlik sismik gürültü verisi ile yapılan HVSR grafikleri yer almaktadır. TK-3513 ve TK-3519 istasyonları gürültü kaydı analizi sonucu hâkim frekans değerleri sırasıyla $0.83\pm 0.11\text{Hz}$ ve $0.44\pm 0.07\text{ Hz}$. olarak bulunmuştur. TK-3512 ve TK-3514 istasyonu deprem kayıtlarının analizinden elde edilen hâkim frekans değerine, gürültü ile yapılan analizlerde ulaşamamıştır. Deprem kayıtları analizi sonuçları ile uyumlu olmakla beraber A0 yükseltgenme değerleri görece düşüktür (sırasıyla 2.43, 2.03). TK-3514 istasyonu gürültü sinyallerinden elde edilen hesaplamalar sonucu yataya yakın H/V oranı dağılımı elde edilmiştir. Bu sonuç deprem kayıtlarından elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

3.3 HVSRpy ile Gürültü Verisi Analizi

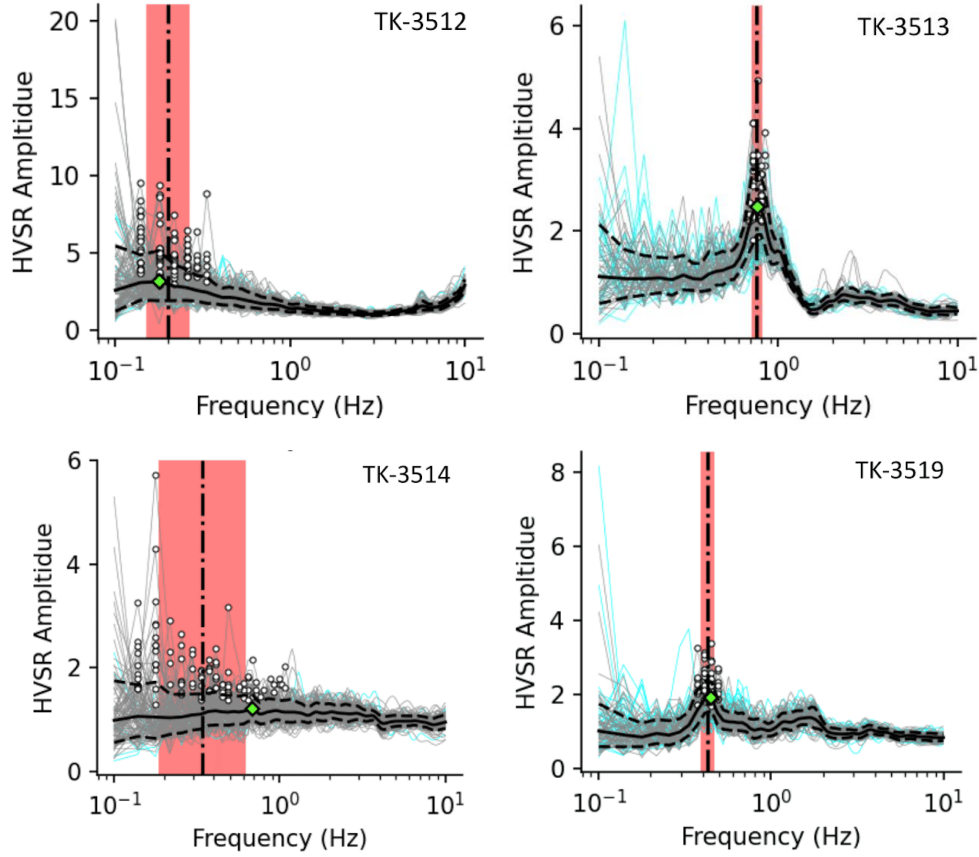
H/V oranı hesaplama araçları arasında en yaygın kullanımı olan Geopsy programına alternatif olacak şekilde, hâkim frekans hesabında yatay ve düşey bileşenlerin geometrik ortalamalarını kullanarak benzer analizleri yapabilmek ve sonuçları otomatik olarak [Acerra vd. \(2002\)](#) kriterleri açısından değerlendirebilmek için HVSRpy yazılımı tercih edilmiştir ([Vantassel 2020](#)). HVSRpy, sismik gürültü verileri kullanılarak HVSR analizi için yazılmış açık kaynaklı bir Python yazılımıdır ([Cheng vd. 2020](#); [Cheng 2020](#); [Cheng vd. 2021](#)). Bu çalışmada, HVSRpy yazılımı kullanılarak, hız (BAG, BLCB) (Şekil 6) ve ivmeölçer (TK-3512, TK-3513, TK-3514, TK-3519) istasyonları için Geopsy ile yapılan analizlerde kullanılan veri seti ile hesaplamalar yapılmıştır. Analizlerde 0,1-10 Hz. frekans band genişliği ve [Konno ve Omachi \(1998\)](#) yumuşatma katsayısı 40 alınmıştır. Her bir analizde en az 70 adet olacak şekilde, 100sn pencere uzunluğu seçilmiştir. HVSRpy yazılımı ile yapılan analizlerde anti-trigger algoritması kullanılmış, otomatik filtreleme yapılarak anomali yaratan sinyal pencereleri hesaplamalara katılmamıştır.



Şekil 6: BAG ve BLCB hız istasyonlarında kaydedilen gürültü sinyali kullanılarak yapılan H/V hesabı HVSRpy grafikleri

Şekil 6’da BAG ve BLCB istasyonları gürültü verisi ile yapılan HVSRpy yazılım sonuçları grafiği verilmiştir. Kırmızı ile taranmış alan içinde kalan kesikli çizgi olası hâkim frekans değerini, taranmış alan genişliği ise standart sapma değerini ifade etmektedir. Anti-trigger algoritması sonucu hesaba katılmayan pencere izleri mavi ile gösterilmiştir. BLCB istasyonu için hâkim frekans değeri $2.27\pm 0.05\text{Hz}$ ve yükseltgenme değeri 1.86 olarak hesaplanmıştır. [Acerra vd. \(2002\)](#) kriterlerine göre (Şekil 8) $A0 < 2$ olduğu durumlarda, hâkim frekans değeri güvenilir değildir. BAG istasyonu analizi sonucu hâkim frekans hesaplanamamıştır (Şekil 6).

HVSRpy yazılımı kullanılarak analizi yapılan ivmeölçer istasyon kayıtları sonuç grafikleri Şekil 7’de gösterilmiştir. TK-3512 ve TK-3514 istasyonları için hâkim frekans değeri hesaplanamamıştır. TK-3513 istasyonu hâkim frekans ve A0 yükseltgenme değerleri sırasıyla $0.76\pm 0.06\text{Hz}$ ve 2.47, TK-3519 istasyonu hâkim frekans ve A0 yükseltgenme değerleri sırasıyla $0.43\pm 0.08\text{Hz}$ ve 2.34 olarak bulunmuştur (Şekil 7). Sonuçlar Geopsy programı ile elde edilen değerler ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 7: TK-3512, TK-3513, TK-3514, TK-3519 ivmeölçer istasyonlarında kaydedilen gürültü sinyali ile yapılan H/V hesabı HVSARpy grafikleri

Elde edilen istasyonlarda [Acerra vd. \(2002\)](#) kriterlerini göz önünde bulundurularak güvenilir bir H/V eğrisi belirlemek ve belirgin bir tepe noktası belirlemek temel prensip olmuştur. Yapılan ölçümler ve değerlendirme kriterleri sonrasında genel olarak ortalama iki üzerinde H/V değeri gözlemlenen istasyonlar üzerinden yoruma gidilmiştir.

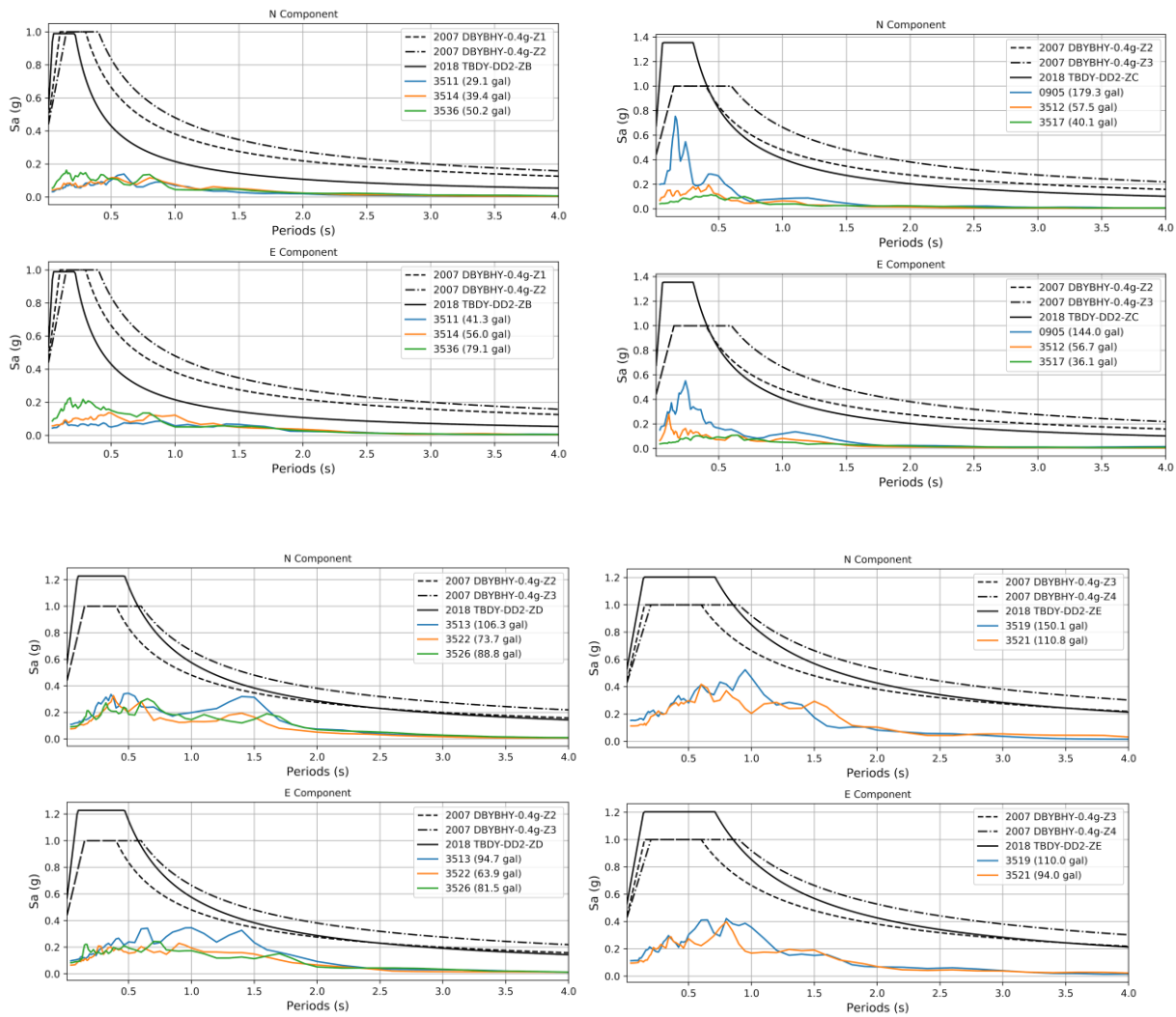
```
Assessing SESAME (2004) reliability criteria ...
Criteria i): Pass
Criteria ii): Pass
Criteria iii): Pass
The chosen peak PASSES the peak reliability criteria, with 3 of 3.
Assessing SESAME (2004) clarity criteria ...
Criteria i): Fail
Criteria ii): Fail
Criteria iii): Pass
Criteria iv): Pass
Criteria v): Fail
Criteria vi): Pass
The chosen peak FAILS the peak clarity criteria, with 3 of 6.
```

Şekil 8: HVSARpy yazılımı [Acerra vd. \(2002\)](#) kriterleri analizi çıktı ekranı örneği

4. Davranış Spektrumları ve Bölgedeki Hasarın Değerlendirilmesi

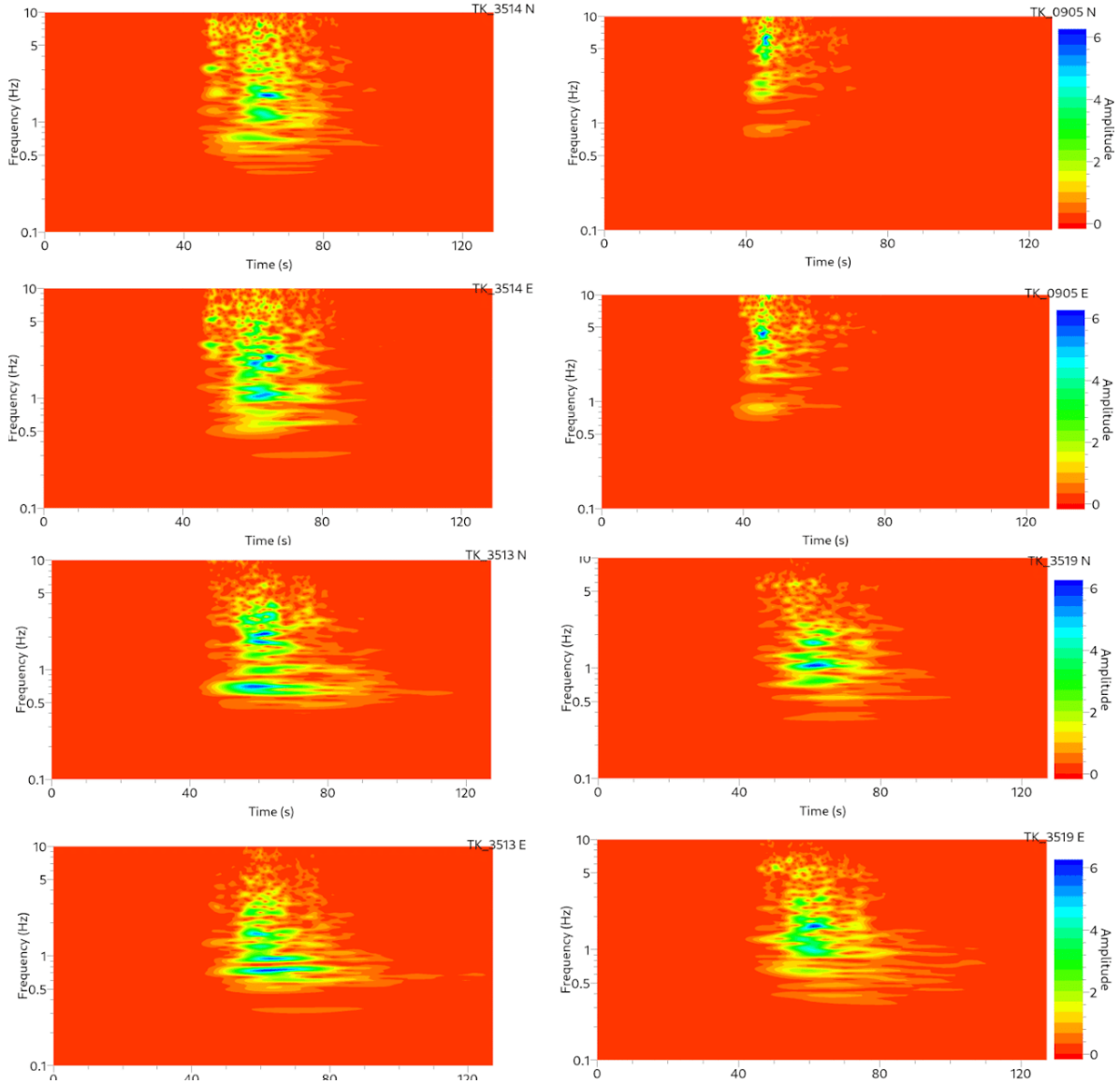
Meydana gelen 30 Ekim 2020 İzmir depremi sonrasında yapılara etkiyen deprem yükünün belirlenmesi ve bölgede oluşan hasarın değerlendirilmesi amacıyla farklı zeminlerde konumlanmış olan istasyonlardan alınan kayıtlar kullanılarak davranış spektrumları elde edilmiştir. Depremin ana şoku, merkez üssüne uzaklığı 100 km içerisinde bulunan 33 kuvvetli yer hareketi istasyonu tarafından kaydedilmiştir. Zemin etkisinin incelenmesi amacıyla bu çalışmada dört farklı yerel zemin sınıfı için 11 adet AFAD deprem izleme istasyonu gösterilmiştir. İstasyonlarda kaydedilen ivme kayıtlarının her iki bileşeninden elde edilen davranış spektrumları, güncel deprem yönetmeliği ([TBDY 2018](#)) ve geçmiş deprem yönetmeliği ([DBYBHY 2007](#)) içinde yer alan tasarım spektrumları ile ilgili zemin sınıfları göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Az ayrılmış, orta sağlam kayalardan oluşan bir zemin cinsine sahip olan ZB grubu için 3511, 3514 ve 3536 no'lu istasyon kayıtlarından elde edilen davranış spektrumları, her iki yönetmelik için elde edilen tasarım spektrumu değerlerinin oldukça altında kalmaktadır (Şekil 9a).

Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalardan oluşan bir zemin cinsine sahip olan ZC grubu için bir değerlendirme yapıldığında (Şekil 9b); merkez üssüne en yakın mesafede bulunan 0905 istasyonu kaydından elde edilen davranış spektrumu özellikle kısa periyot bölgesinde geçmiş deprem yönetmeliğinde verilen tasarım spektrumu değerlerine yaklaşmaktadır. Bu durum 0.2-0.3 saniye arasında bir zemin büyütmesine işaret etse de bölgede kayda değer bir yapısal hasar bildirilmemiştir. Aynı yerel zemin sınıfı için 3512 ve 3517 no'lu istasyon kayıtlarından elde edilen davranış spektrumu değerleri ise her iki tasarım spektrumunun oldukça altında kalmaktadır. Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarından oluşan ZD yerel zemin sınıfı için 3513, 3522 ve 3526 no'lu istasyonlardan elde edilen kayıtlar 0.5-1.5 saniye (5-10 katlı betonarme yapıların hâkim titreşim periyoduna denk gelen değerler) arasında bir zemin büyütmesi göstermektedir (Şekil 9c). Yapısal hasarın yoğun olduğu bölge olan Bayraklı'da yer alan 3513 no'lu istasyon kaydı özellikle 1.5 saniyeye kadar uzun periyot zemin büyütmesini işaret etmektedir ve bölgedeki 7-9 katlı yapılarda meydana gelen hasarlar bu etkiyle açıklanabilir. Bölgedeki en yumuşak zemin olan ZE yerel zemin sınıfına göre yapılan değerlendirmeler de ZD grubuna benzer özellikler göstermektedir. Göz önüne alınan 3519 ve 3521 no'lu istasyon kayıtları özellikle 0.5-1.0 saniye aralığında zemin büyütmesine işaret etmektedir (Şekil 9d). Bu anlamda göz önüne alınan istasyonlarda kaydedilen tüm bu kuvvetli yer hareketi kayıtları değerlendirildiğinde; yumuşak zeminlerde artan uzun periyot içerikleri göze çarpmakta ve gözlenen zemin büyütmelerinin özellikle yapısal kusurlara sahip binalarda hasara neden olduğu düşünülmektedir.



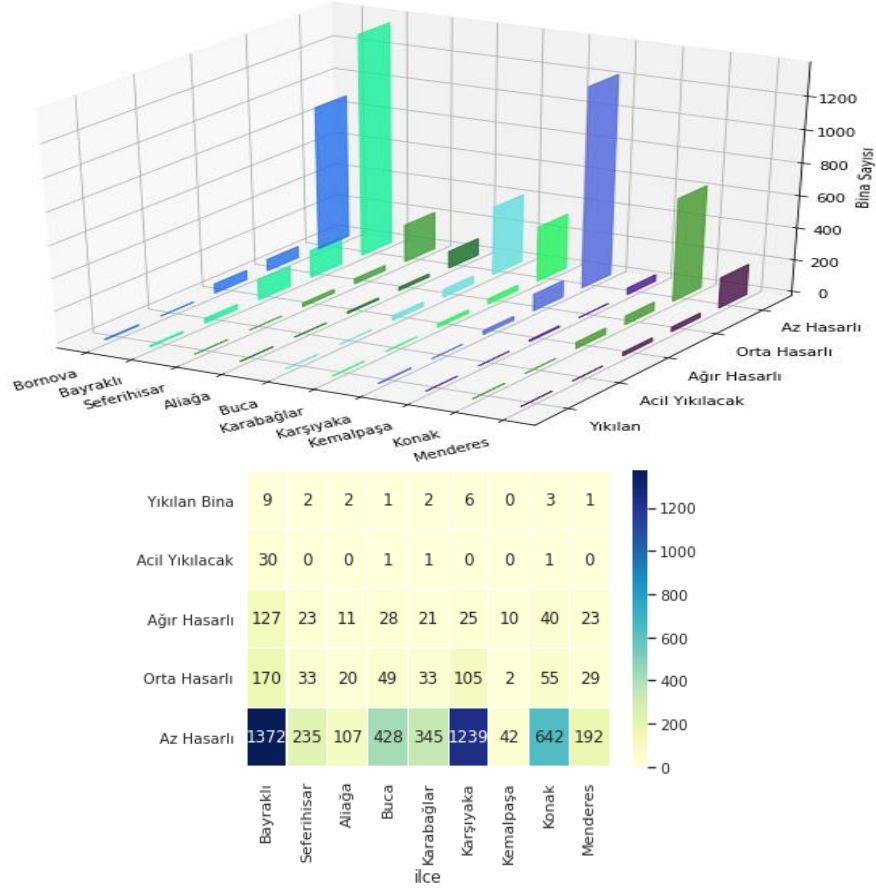
Şekil 9: Dört farklı yerel zemin sınıfı için seçilen istasyonlardan elde edilen kayıtlara ait davranış spektrumlarının deprem yönetmeliklerinde yer alan tasarım spektrumları ile karşılaştırılması.

TK-0905, TK-3513, TK-3514 ve TK-3519 istasyonları için Ege Denizi depremi ana şok kayıtları kullanılarak elde edilen frekans-zaman grafikleri Şekil 10 ile gösterilmiştir. TK-0905 istasyonunda 0.2-0.3 saniye zemin yükseltme periyodu ile yaklaşık 5 Hz. maksimum frekans içeriği değeri uyumludur. TK-3513 istasyonu için elde edilen 0.7-2.0 Hz. ile TK-3514 ve TK-3519 istasyonları için elde edilen 1.0-2.0 Hz. aralığındaki frekans spektrumu değerleri, davranış spektrumlarında gözlemlenen zemin büyütmesi periyotları ile uyumlu sonuçlar vermiştir (Şekil 9, Şekil 10).



Şekil 10: TK-0905, TK-3513, TK-3514 ve TK-3519 istasyonları Ege Denizi anaşok kaydı fourier spektrum analizi

İzmir’de meydana gelen deprem sonrasında yerel yönetim tarafından bölgede detaylı bir hasar tespit çalışması yapılmış ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’na (URL-1, (2021)) bağlı bir hizmet birimi olan Mekânsal Planlama Genel Müdürlüğü tarafından 20 Kasım 2020’de detaylı bir rapor yayımlanmıştır. Raporla İzmir ili için genel hasar tespit tablosu verilmekte ve yine bakanlığa ait olan hasartespit.csb.gov.tr web sitesi üzerinden binalara ait hasar durumları sorgulanabilmektedir. AFAD ve ÇŞB verilerine göre İzmir’de yapıların %1.3’ü hasar görmüş ve Şekil 11-a’da verilen hasar dağılımlarında da görüldüğü üzere yapısal hasar en çok İzmir’in Bayraklı, Bornova, Karşıyaka ve Konak ilçelerinde yoğunlaşmıştır. En fazla hasarın görüldüğü ilçe yerel zemin etkilerinin yoğun olduğu gözlemlenen Bayraklı’dır. İlçedeki hasar dağılımı incelendiğinde, ağır hasarlı yapıların diğer hasar durumlarına göre oranının en fazla bu bölgede olduğu görülmektedir (Şekil 11-b).



Şekil 11: Yapısal hasar seviyelerine göre İzmir İlçeleri bazında yapısal hasar dağılımlarının sayısal büyüklük grafikleri (URL-2 2021)

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

HVSR yöntemi zeminle ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir. Ege Denizi'nde meydana gelen depremlerden sonra yöntemi karşılaştırmalı olarak kullanmak amacıyla bölgede farklı istasyonlarda zemin hâkim frekansı değerleri hesaplanmıştır. Her bir istasyonda yapılan hesaplama sonrasında ölçümlerin güvenilirliğini sorgulamak amacıyla her bir veri Acerra vd. (2002) kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Çalışma için farklı yerel zemin sınıflarında yer alan (ZB, ZC, ZD, ZE) dört adet ivmeölçer istasyonu ve iki adet hızölçer istasyonu seçilmiştir. Seçilen istasyonlarda kaydedilmiş, 11 adet deprem kaydı ile günün farklı saatlerinde kaydedilmiş üçer saatlik gürültü kaydı kullanılarak zemin hâkim frekansı ve yükseltgenme değerleri hesaplanmıştır. Gürültü verisi kullanılarak elde edilen sonuçlarda, deprem verisi ile yapılan hesaplamalara görece düşük A0 değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Acerra vd. (2002) kriterlerini de sağlamadığı için hâkim bir zemin frekansından bahsetmek mümkün olmamıştır. Geopsy ve HVSRpy yazılımları kullanılarak yapılan gürültü analizi sonuçları birbirleri ile örtüşmektedir. HVSRpy ve Geopsy programları kullanılarak elde edilen sonuçlar, birbiri ile uyum içerisinde olup HVSRpy fonksiyonel bir şekilde GEOPSY ile benzer kararlılıkta sonuçlar üretebilmektedir ve kullanıcının python açık kod kullanımındaki yatkınlığına göre araştırmacılar tarafından pratik bir şekilde kullanımı sağlanabilir. Çalışma genelinde en belirgin pik değerleri BLCB ve TK-3513 istasyonlarında gözlenmektedir. Zemin özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, görece yumuşak zeminlerde (BLCB ve TK-3513) belirgin H/V genlikleri gözlenmiştir. Alüvyon üzerinde bulunmakta olan bu tür istasyonlarda pik değerine karşılık gelen yüksek H/V değerleri o noktadaki zemin yapısının daha yumuşak, gevşek veya boşluklu olduğunu göstermektedir. Alüvyon zemine oturan bu istasyonlarda elde edilen sonuçlar bölgede daha önce yapılan çalışmalarla da uyumlu ve benzer sonuçlar vermiştir.

Çalışmanın amacı gereği yapılan farklı sismometre türü kaynak ve yöntemle bağlı çalışmada deprem verilerinin gürültü verisine göre genel olarak daha belirgin H/V eğrileri daha yüksek genlikli bir pik noktası verdiği gözlenmiştir. Hız istasyonlarının gürültü analizi sonuçlarına bakıldığında bazı istasyonların en yüksek ve en düşük gürültü modelleri dışında gürültü seviyelerine sahip olduğu gözlenmiştir. İvmeölçer istasyonları için bu tür hesaplamalar henüz yapılmamış olduğundan bu tür bir karşılaştırma yapmak mümkün olmamıştır. İvmeölçer istasyonlara ait gürültü analizleri ve gürültü modelleri elde edilebildiğinde daha kapsamlı bir karşılaştırma yapmak mümkün olabilir.

Teşekkür

Bu çalışmada AFAD (<https://doi.org/10.7914/SN/TK>), (<https://doi.org/10.7914/SN/TU>) ve KRDAE-BDTIM (<https://doi.org/10.7914/SN/KO>) sismik verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verileri araştırmacıların kullanımına açtıkları için her iki kuruma da teşekkür ederiz. Çalışmada sunulan bazı şekiller GMT (Wessel ve Smith 1998) ile üretilmiştir.

Kaynaklar

- Acerra, C., Alguacil, G., Atakan, K., Azzara, R., Bard, P.-Y., Blarel, F., et al. (2002). *Site EffectS assessment using AMbient Excitations (SESAME)*, European Commission—Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, http://sesame.geopsy.org/Delivrables/SESAME-Finalreport_april05.pdf, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Akkar S., Eroğlu Azak T., Çan T., (2014), *Türkiye sismik tehlike haritasının güncellenmesi*, Proje No: UDAP- Ç-13-06, Ulusal Deprem Araştırma Programı, Ankara, Türkiye.
- Akkar S., Azak T., Çan T., (2018), *Evolution of seismic hazard maps in Turkey*, Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3197-3228.
- Aksu A.E., Piper D.J.W., Konuk T., (1987), *Quaternary growth patterns of Büyük Menderes and Küçük Menderes deltas, western Turkey*, Sedimentary Geology, 52(3-4), 227-250.
- Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., Archuleta R.J., (1997), *Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods*, Bulletin of the Seismological Society of America, 87(3), 710-730.
- Bozkurt E., (2001), *Neotectonics of Turkey-a synthesis*, European Journal of Geodynamics, 14(1-3), 3-30.
- Cambaz M.D., Turhan F., Yılmaz M., Kekovalı K., Necmioğlu Ö., Kalafat D., (2019a), *An investigation on the evaluation of seismic network and catalogue of regional earthquake-tsunami monitoring center*, Yerbilimleri, 40(1), 110-135.
- Cambaz M.D., Turhan F., Yılmaz M., Kekovalı K., Necmioğlu Ö., Kalafat D., (2019b), *A review on Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI) seismic network and earthquake catalog: 2008-2018*, Advances in Geosciences, 51, 15-23.
- Cambaz M.D., Özer M., Güneş Y., Ergün T., Ögütçü Z., Altuncu-Poyraz S., Köseoğlu A., Turhan F., Yılmaz M., Kekovalı K., Necmioğlu Ö., Kalafat D., Çaktı E., Özener H. (2021), *Evolution of the Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI) Seismic Network and the Data Center Facilities as a Primary Node of EIDA*, Seismological Research Letters, 92(3), 1571-1580.
- Cheng T., Cox B. R., Vantassel J. P., Manuel L., (2020), *A statistical approach to account for azimuthal variability in single-station HVSR Measurements*, Geophysical Journal International, 223(2), 1040-1053.
- Cheng T., Hallal M. M., Vantassel J. P., Cox B. R., (2021), *Estimating Unbiased Statistics for Fundamental Site Frequency Using Spatially Distributed HVSR Measurements and Voronoi Tessellation*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147(8), doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002551.
- Cheng T., (2020), *Statistical methods for determining f_0 and its variance from single- and multi-station HVSR Measurements*, Doctoral Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- Coutel F., Mora P., (1998), *Simulation based comparison of four site response estimation techniques*, Bulletin of the Seismological Society of America, 88(1), 30-42.
- DBYBHY, (2007), *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik*, Resmi Gazete Tarih: 06 Mart 2007, Sayı: 26454, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/03/20070306-3.htm>, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Dimitriu P. P., Papaioannou C. A., Theodulidis N. P., (1998), *EURO-SEISTEST strong-motion array near Thessaloniki, Northern Greece: A study of site effects*, Bulletin of the Seismological Society of America, 88(3), 862-873.
- Çetin K.O., Mylonakis G., Sextos A., Stewart J. P., (2020), *Seismological and Engineering Effects of the M 7.0 Samos Island (Aegean Sea) Earthquake*, Earthquake Engineering Association of Turkey, http://learningfromearthquakes.org/images/earthquakes/2020_Samos_Greece_Izmir_Turkey/Samos_Island_Earthquake_Final_Report.pdf, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Durmuş L., (2012), *İzmir metropolitan alanı zemin özelliklerinin deprem kayıtları kullanılarak HVSR yöntemi ile incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Emre O., Özalp S., Dogan A., Özaksoy V., Yıldırım C., Goktas F., (2005), *İzmir Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri*, MTA Raporu, Rapor No: 10754, Ankara, 80ss.
- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu Ş., (2013), *Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası Ölçek 1:1.250.000*, MTA Genel Müdürlüğü, Özel yayın serisi - 30, Ankara, 69ss.
- Emre Ö., Duman T. Y., Özalp S., Olgun Ş., Elmacı H., Şaroğlu F., Çan T., (2018), *Active fault database of Turkey*, Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3229-3275.
- Field E. H., Jacob K. H., (1995), *A Comparison and Test of Various Site-Response Estimation Techniques, including Three That Are Not Reference-Site Dependent*, Bulletin of Seismological Society of America, 85(4), 1127-1143.
- Gök E., (2011), *Investigation of earthquake hazard and seismic site characteristics in the examples of Bursa and İzmir*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Gok E., Chavez-Garcia F. J., Polat O., (2014), *Effect of soil conditions on predicted ground motion: case study from Western Anatolia, Turkey*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 229, 88-97.
- Kadirioglu F.T., Kartal R.F., (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.
- Kadirioglu F.T., Kartal R.F., Kılıç T., Kalafat D., Duman T.Y., Eroğlu Azak T., Özalp S., Emre Ö., (2018), *An improved earthquake catalogue ($M \geq 4.0$) for Turkey and its near vicinity (1900–2012)*, Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3317-3338.

- Kiratzi A., Özacar A.A., Papazachos C., Pınar A., (2020), *Regional tectonics and seismic source*, Seismological and Engineering Effects of the M 7.0 Samos Island (Aegean Sea) Earthquake'in İçinde, (Cetin K.O., Mylonakis G., Sextos A., Stewart J. P., Ed.), Earthquake Engineering Assoc of Turkey, Earthquake Foundation of Turkey, EERI, GEER-069, ss.1-61.
- Konno K., Ohmachi T., (1998), *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*, Bulletin of Seismological Society of America, 88(1), 228-241.
- Kramer S.L., (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 653ss.
- Lachet C., Bard P. Y., (1994), *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the Nakamura's technique*, Journal of Physics of Earth, 42(5), 377-397.
- Lachet C., Hatzfeld D., Bard P. Y., Theodulidis N., Papaioannou C., Savvaidis A., (1996), *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches*, Bulletin of the Seismological Society of America, 86(6), 1692-1703.
- Lermo J., Chavez-Garcia F.J., (1993), *Site effect evaluation using spectral ratios with only one station*, Bulletin of Seismological Society of America, 83(5), 1574-1594.
- McKenzie D.P., (1972), *Active tectonics of the Mediterranean regions*, Geophysical Journal International, 30(2), 109-185.
- Michael A.J., (1984), *Determination of stress from slip data: faults and folds*, Journal of Geophysical Research, 89(B13), 517-526.
- Nakamura Y., (1989), *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1), 25-33.
- Ocañoğlu N., Demirbağ E., Kuscu I., (2005), *Neotectonic structures in İzmir Gulf and surrounding regions (Western Turkey): evidence of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime*, Marine Geology, 219(2-3), 155-171.
- Riepl J., Bard P.Y., Hatzfeld D., Papaioannou C., Nechtschein S., (1998), *Detailed evaluation of site response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (EURO-SEISTEST)*, Bulletin of the Seismological Society of America, 88(2), 488-502.
- Şaroğlu F., Emre Ö., Kuşçu İ., (1992), *Türkiye Diri Fay Haritası, 1:2,000,000 ölçekli*, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Şengör A.M.C., Satır M., Akkök R., (1984), *Timing of tectonic events in the Menderes Massif, Western Turkey: implications for tectonic evolution and evidence for Pan-African basement in Turkey*, Tectonics, 3(7), 693-707.
- Şengör A.M.C., Görür N., Şaroğlu F., (1985), *Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study*, Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation'in İçinde, (Biddle K.T., Christie-Blick N., Ed.), Society for Sedimentary Geology, doi: 10.2110/pec.85.37.0211.
- Şengör A.M.C., (1987), *Cross faults and differential stretching of hanging walls in regions of low-angle normal faulting: examples from western Turkey*, Continental extensional tectonics'in İçinde, (Coward M.P., Dewey J.F., Hancock P.L., Ed.), Geological Society Special Publication, 28(1), 575-589.
- Taymaz T., Jackson J.A., McKenzie D., (1991), *Active tectonics of the north and central Aegean Sea*, Geophysical Journal International, 106(2), 433-490.
- Taymaz T., Yılmaz Y., Dilek Y., (2007), *The geodynamics of the Aegean and Anatolia: introduction*, Geological Society, London, Special Publications, 291(1), 1-16. doi: 10.1144/SP291.1.
- TBDY, (2018), *Türkiye bina deprem yönetmeliği*, Resmi Gazete Tarih: 18 Mart 2018, Sayı: 30364, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Tepe Ç., Sözbilir H., Eski S., Sümer Ö., Özkaymak Ç., (2021), *Updated historical earthquake catalog of İzmir region (western Anatolia) and its importance for the determination of seismogenic source*, Turkish Journal of Earth Sciences, 30(8), 779-805.
- Triantafyllidis P., Hatzidimitriou P.M., Theodulidis N., Suhadolc P., Papazachos C., Raptakis D., Lontzetidis K., (1999), *Site effects in the city of Thessaloniki (Greece) estimated from acceleration data and 1D local soil profiles*, Bulletin of the Seismological Society of America, 89(2), 521-537.
- URL-1, (2021), *İzmir Deprem Senaryosu ve Deprem Master Planı*, T.C. İzmir Büyükşehir Belediyesi, <http://www.izmir.bel.tr/izmirdeprem/index.html>, [Erişim 10 Haziran 2021].
- URL-2, (2021), *30 Ekim 2020 İzmir deprem afeti*, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü, https://webdosya.csb.gov.tr/db/izmir/haberler/2020_20201121031632.pdf, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Vantassel J., (2020), *jpvantassel/hvsrpy: latest (Concept)*, Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3666956>, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Wathelet M., Chatelain J. L., Cornou C., Di Giulio G., Guillier B., Ohrnberger M., Savvaidis A., (2020), *Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing*, Seismological Research Letters, 91(3), 1878-1889.
- Wessel P., Smith W. H. F., (1998), *New, improved version of Generic Mapping Tools released*, EOS Science News, AGU, 79(47), 579-579.
- Yalçın A.C., Doğan G.G., Ergin Ulutaş E., Polat O., Tarih A., Yapar E.R., Yavuz E., (2020), *The 30 October 2020 (11:51 UTC) İzmir-Samos earthquake and tsunami; post-tsunami field survey preliminary results*, Teknik rapor, <https://avesis.deu.edu.tr/publication/showdocument/6865b31f-1ea9-4b05-b95a-327a7456b04c>, [Erişim 10 Haziran 2021].
- Yalçınkaya E., (2002), *Zemin özelliklerinin deprem yer hareketine etkisi: 1 Ekim 1995 Dinar ve 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan depremi örnekleri*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz Y., (1997), *Active tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project*, Geology of Western Anatolia'nın İçinde, (Schindler C., Pfister M., Ed.), Hochschulverlag Ag Ander, ETH Zürich, ss.31-54.
- Yılmaz Y., Genç S.C., Gürer F., Bozcu M., Yılmaz K., Karacık Z., Altunkaynak Ş., Elmas A., (2000), *When did the western Anatolian grabens begin to develop?*, Tectonics and Magmatism in Turkey and The Surrounding Area'nın İçinde (Bozkurt E., Winchester J.A., Piper J.D.A., Ed.), Geological Society Special Publication, London, England.