



T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI
AFET VE ACIL DURUM
YÖNETİMİ BAŞKANLIĞI

AFAD

TÜRK DEPREM ARAŞTIRMA DERGİSİ

Aralık
December

2022

Cilt
Volume

4

Sayı
Number

2

TURKISH
JOURNAL OF
EARTHQUAKE
RESEARCH



TUSAK
Türkiye Ulusal
Sismoloji ve Arzıçığa
Komisyonu
Ankara / TÜRKİYE

e-ISSN: 2687-301X

Türk Deprem Araştırma Dergisi (TDAD)

(c) 2022

Cilt 4 - Sayı 2

(Volume 4 - Issue 2)

Türkiye Ulusal Sismoloji ve Arziçi Fiziği Komisyonu (TUSAK)
Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)

National Seismology and Earth's Interior Physics Commission of Turkey (TUSAK)
Disaster and Emergency Management Authority (AFAD)

30.12.2022

Sıra (Nr)	İÇİNDEKİLER (CONTENT)	Sayfa No (Page Nr)
1	Deprem Verileri Kullanılarak Hızölçer ve İvmeölçer Kayıtlarının Karşılaştırılması (<i>Comparison of Broadband and Accelerometer Records Using Earthquake Data</i>) Erkan Ateş, Recai Feyiz Kartal ve Turgay Kuru	174
2	Van Gölü ve Civarı (Türkiye) İçin Deprem Tahmini ve Tehlikesi Üzerine İstatistiksel Bir Analiz ve Değerlendirme (<i>A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye)</i>) Serkan Öztürk ve Hamdi Alkan	191
3	Sıvılaşma Riskinin Azaltılması için Kullanılan Jet Grout Kolonlarının Verimliliği Üzerine Bir Sayısal Çalışma (<i>A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation</i>) Gizem Şahin, Onur Toygar ve Mehmet Rifat Kahyaoğlu	210
4	Karayolu Viyadüklerindeki Trafik Kaynaklı Titreşimlerin Analizi (<i>Analysis of Traffic-Induced Ground Vibration in Highway Viaducts</i>) Nida Erdem ve Emre Timur	230
5	Elazığ-Sivrice Depremi'nin (24 Ocak 2020) Öncül Belirtileri (<i>Precursors of The Elazığ-Sivrice Earthquake (January 24th, 2020)</i>) Seval Gürbüz ve Yusuf Arif Kutlu	246



Comparison of Broadband and Accelerometer Records Using Earthquake Data

Ates Erkan¹, Recai Feyiz Kartal¹ and Turgay Kuru¹

¹ Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Earthquake Department, Türkiye
ORCID: 0000-0002-5646-9778, 0000-0003-2093-6669, 0000-0002-6105-3849

Keywords

Earthquake, Saturation, Accelerometer, Broadband

Highlights

- * Positioning of broadband and accelerometer devices in the same place
- * Clipping of the broadband device
- * Comparison of broadband and accelerometer devices

Aim

Comparing accelerometer and broadband seismometers with earthquake records

Location

Four different regions in Turkey

Methods

Comparison of broadband and accelerometer records in the same station by bringing them into the same format

Results

When earthquakes with different epicenters and sources are examined, it is seen that broadband cannot measure high amplitude movements due to their structure and accelerometer, which reach saturation, measure the movement exactly. On the other hand, it has been observed that accelerometer devices cannot measure motion in distant and small magnitude earthquakes

Supporting Institutions

--

Financial Disclosure

The author declares that this study has received no financial support.

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 17.06.2022

Revised: 16.08.2022

Accepted: 22.09.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1132404



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

Corresponding Author

Erkan Ates

Email: erkan.ates@afad.gov.tr

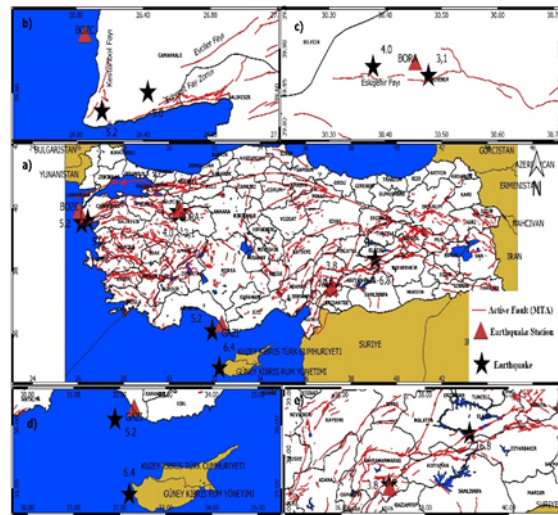


Figure
Earthquakes used in the study

How to cite:

Ates E., Kartal R.F., Kuru T., 2022. Comparison of Broadband and Accelerometer Records Using Earthquake Data, Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 174-190, <https://doi.org/10.46464/tdad.1132404>



Deprem Verileri Kullanılarak Hızölçer ve İvmeölçer Kayıtlarının Karşılaştırılması

Erkan Ateş¹, Recai Feyiz Kartal¹ ve Turgay Kuru¹

¹ Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Deprem Dairesi Başkanlığı, Türkiye
ORCID: 0000-0002-5646-9778, 0000-0003-2093-6669, 0000-0002-6105-3849

ÖZET

Ülkemizdeki deprem etkinliğinin yakından izlenmesi, değerlendirilmesi ve arşivlenmesi önemlidir. AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı, hızölçer, ivmeölçer ve sabit Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (KKUS) cihazlarından oluşan toplam 1.169 kayıt cihazı ile Avrupa'nın en büyük 2'nci deprem gözlem ağına sahiptir. Büyük depremlerde hızölçerler belli bir genlik değerinin üzerindeki hareketi ölçmemekte ve doyuma (clip) ulaşmaktadır. Bu çalışmada, farklı istasyonlardaki hızölçer ve ivmeölçerlerin farklı büyüklükteki depremler için kaydettiği kayıtlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde 7 deprem için hızölçerlerin doyuma ulaştığı, ivmeölçerlerin ise deprem genliğini tam olarak ölçtüğü görülmüştür. Hızölçer ve ivmeölçerlerin aynı konumda kullanılması durumunda, uzak ve yakın kaynaklı yer hareketinin bütün genliği ve frekans içerikleri kaydedilebilmektedir. Bu nedenle, depremselliği yüksek bölgelerde bulunan bazı istasyonlarda, hızölçer ve ivmeölçer kayıtçılarının aynı yerde yerleştirilmesi ile sismoloji çalışmalarına önemli katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler

Deprem, Doyum, İvmeölçer, Hızölçer

Öne Çıkanlar

- * Hızölçer ve ivmeölçer cihazlarının aynı yerde konumlandırılması.
- * Hızölçer cihazının doyuma ulaşması.
- * Hızölçer ve ivmeölçer cihazlarının karşılaştırılması.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.06.2022

Düzeltilme: 16.08.2022

Kabul: 22.09.2022

Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1132404

Sorumlu yazar

Erkan Ateş

Eposta:

erkan.ates@afad.gov.tr

Comparison of Broadband and Accelerometer Records Using Earthquake Data

Erkan Ates¹, Recai Feyiz Kartal¹ ve Turgay Kuru¹

¹ Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Earthquake Department, Türkiye
ORCID: 0000-0002-5646-9778, 0000-0003-2093-6669, 0000-0002-6105-3849

ABSTRACT

Monitoring, analyzing, and archiving the seismic activity in our country are crucial. The AFAD Earthquake Department, with 1.169 recording equipment consisting of broadband, accelerometer, and fixed Global Positioning Satellite Systems (GNSS) units, has the second-largest earthquake observation network in Europe. Broadband becomes saturated and unable to detect movement in large earthquakes beyond a particular amplitude value (clip). The recordings kept by the broadband and accelerometers at several sites during earthquakes of various magnitudes were compared in this study. The broadband attained clipped for 7 earthquakes, and the accelerometer precisely assessed the earthquake amplitude, according to the analysis of the findings. All amplitude and frequency contents of distant and near-source ground motion may be captured if the broadband and accelerometer are deployed in the same place. Hence, it is thought that placing broadband and accelerometer in the same place at some stations located in regions with high seismicity will make a significant contribution to seismology studies.

Keywords

Earthquake, Saturation, Accelerometer, Broadband

Highlights

- * Positioning of broadband and accelerometer devices in the same place.
- * Clipping of the broadband device.
- * Comparison of broadband and accelerometer devices.

Manuscript

Research Article

Received: 17.06.2022

Revised: 16.08.2022

Accepted: 22.09.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1132404

Corresponding Author

Erkan Ates

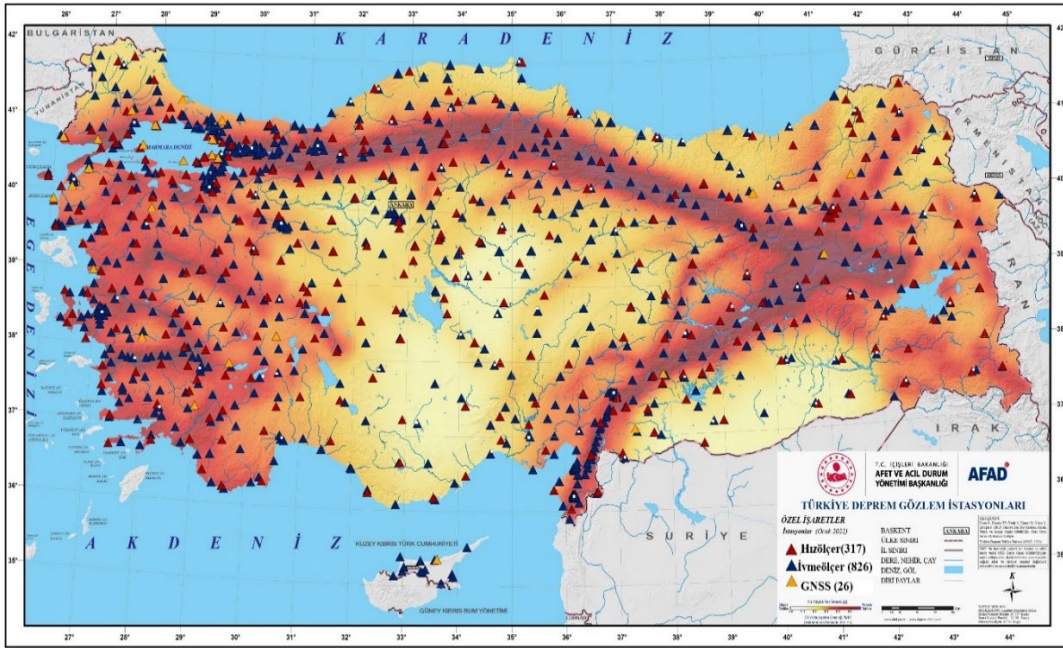
Email:

erkan.ates@afad.gov.tr

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere ülkemiz, yakın geçmişi de dâhil olmak üzere, büyük can ve mal kayıplarının yaşanmasına neden olan yıkıcı depremlerin meydana geldiği dünyanın en aktif deprem kuşaklarından (Alp-Himalaya) birinin üzerinde yer almaktadır. Deprem önlenemeyen bir doğa olayıdır, bu nedenle toplumca depremle yaşamayı öğrenmek gerekmektedir. Bu amaçla, risk azaltma hedefli imar planları çerçevesinde depreme dayanıklı bina yapımı ile ilgili tekniklerin geliştirilmesine altlık oluşturacak deprem tehlike haritalarının hazırlanması önemli bir işlev olacaktır. Deprem tehlike haritalarının elde edilmesinde başvuru en önemli kaynaklardan birisi de meydana gelen depremlerin kayıtlarından elde edilen bilgilerdir. Bu kayıtlar, ancak gelişmiş bir sismolojik gözlem ağı alt yapısı ile oluşturulabilir.

İstanbul'da 2004 yılında düzenlenen Deprem Şurası'nda; "Ülke çapında depremlerin izlenmesi, kaydedilmesi, değerlendirilmesi, arşivlenmesi ve duyurulması işleri gelişmiş bir Ulusal Deprem İzleme Ağı Sistemi altında ele alınmalıdır" kararı alınmıştır. Bu kapsamda; 1989 yılında Türkiye genelinde 12 istasyonla başlanan Telemetrik Deprem Gözlem Ağı; 2004 yılından itibaren Ulusal Sismik Ağın Geliştirilmesi (USAG) projesi ile dünya standartlarında, gerçek zamanlı, yüksek kaliteli kayıt alan geniş bant istasyonlarla Türkiye Ulusal Ağı'na (Şekil 1) dönüştürülmüş ve ülke çapına yayılarak geliştirilmiştir (Kılıç ve diğ. 2011).



Şekil 1: Türkiye ulusal sismolojik gözlem ağı (2022)
Figure 1: National seismic monitoring network of Türkiye (2022)

Hızölçer, depremin herhangi bir uzaklıktaki noktada oluşturduğu parçacık hızını ölçer ve birimi m/s dir. Bu kayıtlardan yola çıkarak; meydana gelen bir depremin büyüklüğü, konumu (enlem ve boylam), derinliği ve oluş zamanı gibi temel veriler hızlı bir şekilde değerlendirilip toplum ve ilgili kişi, kurum ve kuruluşlar bilgilendirilmektedir. Hızölçer cihazların genel anlamda yerel zemin etkilerinin etkisinde kalmaması ve dolayısıyla kayıtlarda zemin büyütmesinin en az olması için anakaya niteliğindeki sağlam zeminlerde ve gürültülü ortamlardan uzakta kurulması gerekmektedir. Bu doğrultuda kurulmuş olan ulusal sismolojik gözlem ağı ile Türkiye ve yakın çevresinde meydana gelen deprem aktivitesi 7/24 gerçek zamanlı izlenmekte, değerlendirilmekte, arşivlenmekte ve web sayfası aracılığıyla kamuoyu hizmetine sunulmaktadır.

Ülkemizde ivmeölçer istasyonlarının kurulumuna 1973 yılında başlanmış ve ilk kayıt 1976 yılında Denizli'de kaydedilmiştir. Deprem sırasında ölçülen ivme değerleri, deprem anında zeminin ne miktarda ve ne hızla sarsıldığının anlaşılması açısından önemlidir. İvme kaydı bir deprem sırasında kaydedilen yer ivmesidir ve bu kayıt ivmeölçerler tarafından alınmaktadır. İvmeölçerin ölçtüğü değer birimi cm/sn^2 (gal)'dir. Yer ivmesi, zemine gömülü veya zemin üzerindeki yapılara depremle etki eden yıkıcı kuvveti temsil eder. Deprem anında yapısal hasarların gelişmesi genel olarak 3 temel başlıkta toplanabilir. Bunlar; ilk olarak zemin-yapı arasındaki özelliklere bağlı ilişki, ikincisi yapısal unsurlardaki eksiklik ve üçüncü adımda ise en büyük yatay yer ivmesinin (PGA) doğru olarak hesaba alınmamış olmasıdır. Zemine gömülü veya üstündeki mühendislik yapılarının kendi yüklerine ilave olarak, deprem anında zeminde oluşacak dinamik yükler de yapısal unsurlara ilave bir yük ve etki yapacaktır. Dolayısıyla yapısal hasarlarda zeminin durağan yani statik bir yapıda olmadığı, deprem dalgaları ile harekete geçen zemindeki dinamik etkilerin dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Yapılar zeminin hareketine direnmekte ve sonuçta bina içinde yer hareketine ters yönde atalet kuvvetleri oluşmaktadır. İvmeölçer cihazlarının kaydettiği veriler, depreme dayanıklı binaların tasarımını geliştirmek, sivilaşma ve heyelan gibi deprem kaynaklı jeolojik tehlikeleri anlamak için kullanılır (Perk ve Ozer 2019).

İvmeölçer ve hızölçerler cihazlarının bazı özellikleri benzer olmasına rağmen farklı tasarlanmışlardır. İkisi de üç yönlüdür (kuzey-güney, doğu-batı, düşey). İvmeölçerler büyük depremlere ait yüksek genlikli ve frekanslı sismik dalgaları ölçmek için tasarlanmıştır. Hızölçerler ise güçlü veya yakında meydana gelen depremlerin neden olduğu büyük yer hareketlerini iyi ölçemezler. Güçlü sarsıntılar, hızölçer cihazlarının doyumuna girmesine neden olabilir.

AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı 1.143 deprem (826 ivmeölçer, 317 hızölçer) ve 26 Sabit KKUS (Küresel Konumlama Uydu Sistemleri) istasyonu ile Avrupa'nın en büyük ikinci deprem gözlem ağına sahiptir. Ülkemizde yine Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) tarafından kurulan ulusal düzeyde deprem istasyonları ile Bursa ve Eskişehir'de Anadolu Üniversitesi tarafından işletilen deprem istasyon ağı bulunmaktadır (Tun ve diğ. 2020). Hızölçerler deprem parametrelerinin hesaplanmasında etkili bir şekilde kullanıldığından zemin büyütmesinden etkilenmemesi için anakaya üzerine konumlandırılırken; ivmeölçerler deprem yüklerinin belirlenmesi ve büyütme etkilerinin ölçülebilmesi için yapılaşmanın yoğun olduğu il ve ilçe merkezlerinde konumlandırılmıştır. Amasya ilinde kurulu bulunan ivmeölçerlerin deprem kayıtları ile hızölçer cihazlarının gürültü kayıtları kullanılarak büyütme karşılaştırılmıştır (Ateş 2020). Ülkemizde deprem gözlemi genel olarak hızölçer ve ivmeölçerler ile yüksek örnekleme aralıklı (100-200 Hz) dalga formları kullanılarak yapılmaktadır. Ancak hızölçer kayıtçıları yakın ve güçlü depremlerde doyumuna ulaştıklarından deprem genliğini tam ölçememektedir.

Ülkemizde meydana gelen 23.10.2011 Van Depremi'nde ($M_w=7.4$) 500 km, 20.07.2017 Muğla Bodrum Depremi'nde ise ($M_w=6.5$) 200 km'ye kadar olan hızölçer cihazları doyumuna ulaşmıştır. İvmeölçer cihazları ise uzak ve düşük magnitüdü depremleri ölçemeyecektir. Bir depremin genlik ve frekansların tam olarak ölçülmesi araştırmacılar için önemlidir. Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından işletilen Güney Kaliforniya Sismik Ağı'ndaki istasyonlara hızölçer, ivmeölçer ve Küresel Konumlama Sistemi (KKS) cihazı konumlandırılmış ve farklar karşılaştırmışlardır (Allen ve Ziv 2011). Sarsma tablası yardımıyla bazı depremler simule edilerek ivmeölçer ve KKUS ölçümleri sonuçları karşılaştırılmıştır (Senturk ve Aktug 2019). Yine araştırmacılar yüksek sismisiteye sahip bölgelerde, tüm dalga genliklerinin kaydedilmesini ivmeölçer ve KKUS'larının beraber kullanılmasını önermektedirler (Michel ve diğ. 2017).

Deprem Dairesi Başkanlığı 11 adet istasyona hızölçer ve ivmeölçer cihazları yerleştirmiş ve deprem kayıtlarındaki farklılıkların incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada 4 farklı istasyonda bulunan ivme ve hızölçer tarafından algılanan 8 adet deprem kaydı kullanılmış ve

sonuçlar karşılaştırılmıştır (Tablo 1). Depremlerin istasyonlara olan uzaklığı 02-199 km, büyüklükleri ise 3.1-6.8 arasında değişmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, hızzler cihazlarının doyuma ulaştığı anlarda ivmezlerlerin deprem genliğini tam olarak zltğ gözlenmiştir. Hızzlerin doyuma ulaşmadığı zamanlarda ise ivmezlerin zlmleri benzerdir. Uzak ve magnitüdü kk depremlerde ise ivmezlerler hareketi zlememektedir. Aynı istasyona hem hızzler ve ivmezler kurulduğunda depremin tüm genlik ve frekansları zlmş olacaktır. Ancak her istasyona 2 farklı cihaz konulması maliyet açısından bir yük oluşturacağından deprem aktivitesi yüksek bölgelerdeki istasyonlara konulması znerilmektedir. Bu şekilde uzak ve düşük magnitdl depremler hızzlerler, güçlü ve yakın depremler de ivmezlerler yardımıyla kayıt edeceğinden tüm genlikler kaydedilmiş olacaktır.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan hızzler ve ivmezlerler tarafından kaydedilen depremler.
Table 1: Earthquakes recorded by the broadband and accelerometers used in the study.

İstasyon Kodu	Tarih	Saat	Enlem	Boylam	Derinlik (km)	Büyüklük	R _{epi} (km)
GAZI	05.12.2020	12:44	36.0878	31.8998	77.22	5.2 (M _w)	40.7
GAZI	11.01.2022	01:07	34.9190	32.1663	5.06	6.4 (M _w)	147.0
BOZC	20.02.2019	18:23	39.6011	26.4261	5.20	5.0 (M _w)	41.7
BOZC	07.02.2017	02:24	39.5205	26.1510	6.24	5.2 (M _w)	36.7
BORA	11.06.2018	09:11	39.8658	30.4770	6.99	3.1 (M _L)	2.6
BORA	17.01.2015	00:42	39.8775	30.3785	5.08	4.0 (M _w)	6.4
NAR	02.02.2020	23:44	37.4658	37.1430	7.06	3.8 (M _w)	8.3
NAR	24.01.2020	17:55	38.3593	39.0630	8.06	6.8 (M _w)	198.8

2. İVMEZLER VE HIZZLER KAYITÇILAR

Sismik senszrlerin frekans tepkileri, kendi gürültüleri ve dinamik aralıkları ile ifade edilebilirler. Buna karşın senszrn dinamik aralığı ise, zlceği zst ve en alt sınır oranıyla ifade edilir.

Dinamik aralık (DA) kaydedecek en büyük (A_{max}) ve en kk (A_{min}) genliklerin oranıdır. Dinamik aralık logaritmik olarak zllr ve decibel (dB) olarak ifade edilir (Denklem 1).

$$DA = 20 \log_{10} (A_{max} / A_{min}) \quad (1)$$

Modern bir hızzler senszrn genlik oranı 100 milyondur. Bu yukarıda 1 numaralı formülde yerine konursa DA=160 dB olacaktır. Bu aralık oldukça geniş olsa da büyük depremlerde yeterli olmayacaktır.

Hızzlerlerde dinamik aralığın alt sınırı, senszrn kendi iç gürültüsü ile sınırlandırılmıştır. Bu seviyenin altında kalan hareket senszr tarafından algılanmayacaktır. Dinamik aralığın zst sınırı senszrn duyarlılığı ve çıkış voltajı ile sınırlıdır. Bir senszr zst sınırı olan duyarlılığı aştığı zaman doyuma (clip) ulaşacaktır. Bu durumda deprem hareketini zlemeyecektir.

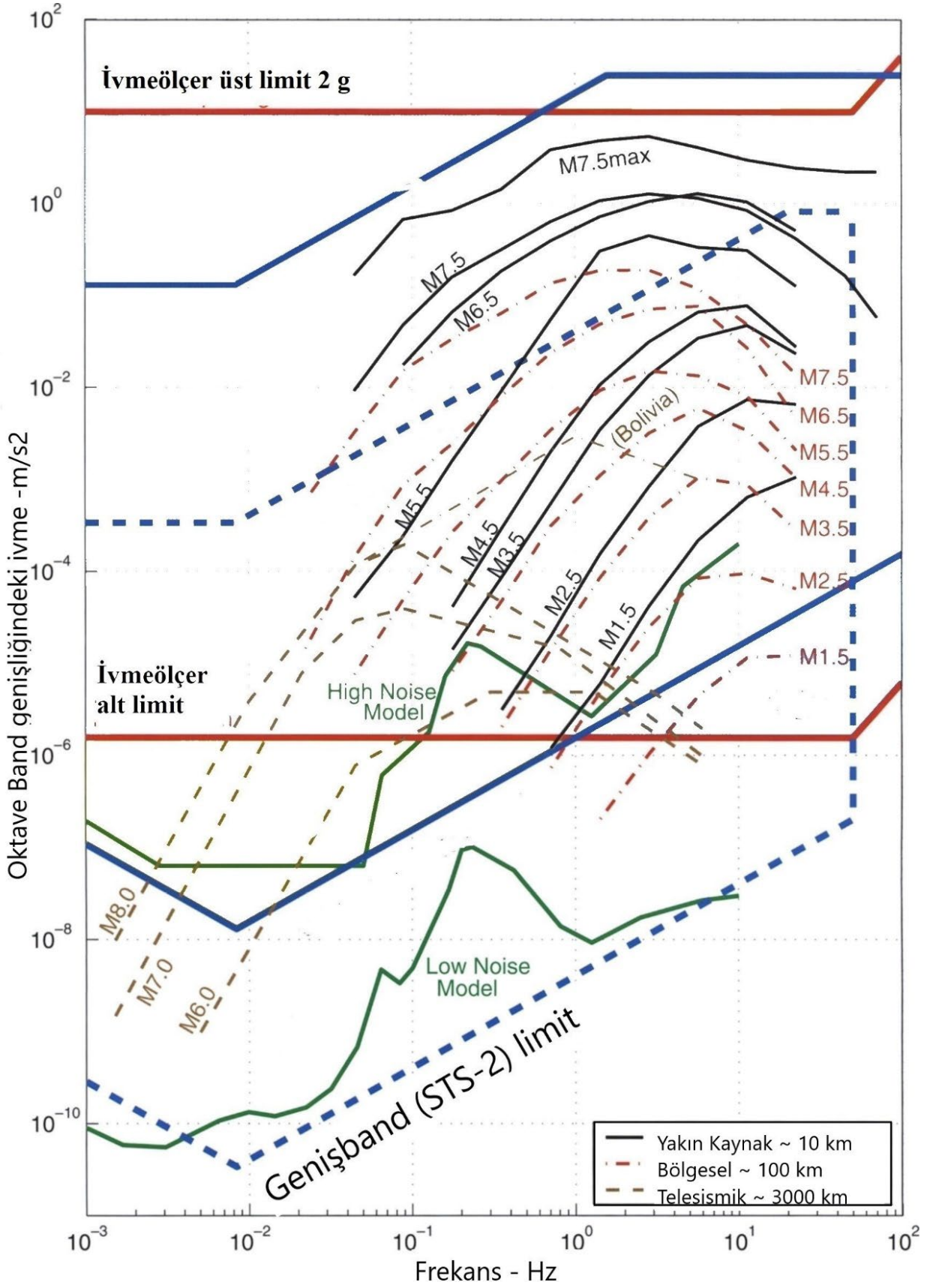
zrneğin bir hızzler 1500 V/m/s duyarlığa ve ± 20 V maksimum çıkış voltajına sahipse, kaydedilebilecek en büyük genlik 1.33 cm/s'dir. Aynı zamanda duyarlılığı 750 V/m/sn, ıkışı ± 10 V senszrde de kaydedilebilecek en büyük genlik bu seviyelerdedir. Çalışmada kullanılan Güralp CMG-3T hızzler cihazının ıkışı 10 V, duyarlılığı 3000 V/m/s olduğundan doyum seviyesi 0.33 cm/s'dir (Tunç ve diğ. 2015) Bazı hızzler duyarlık ve doyum seviyeleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Farklı kayıtçıların doyum seviyeleri (Hauksson ve diğ. 2001).
Table 2: Clip levels of different recorders Hauksson et al. 2001).

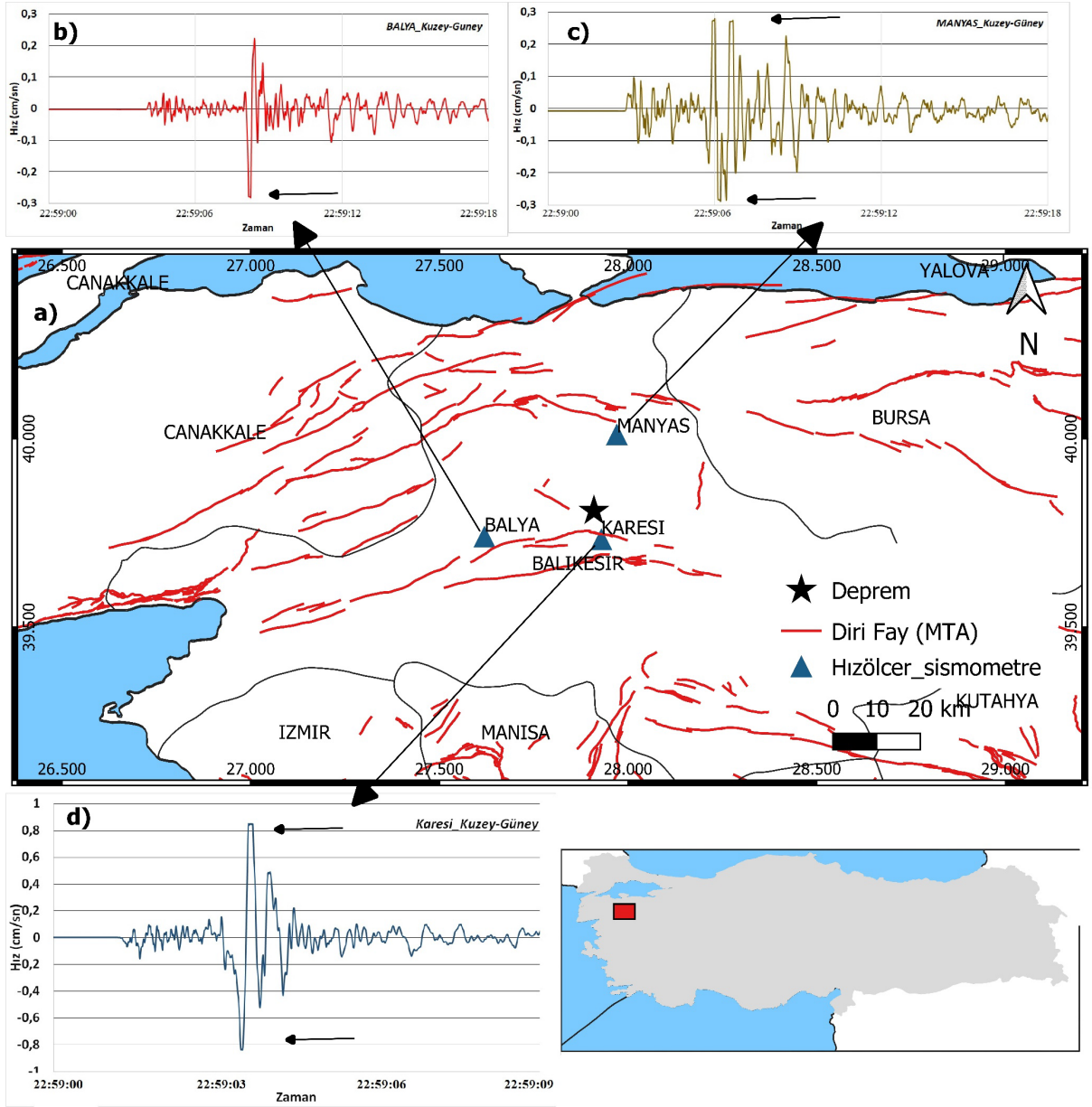
Marka	Model	Duyarlık (V/m/s)	Doyum (cm/s)
Geotech	KS-2000	2000	1.0
Güralp	CMG-3ESP	400	2.5
Nanometrics	Trillium Compact	750	2.6
Reftek	151B-120	2000	1.0
Streckeisen	STS-1 Vertical	2500	0.8
Streckeisen	STS-1 Horiz.	2300	0.9
Streckeisen	STS-2	1500	1.3

Hızölçerin büyük depremlerde doyuma ulaşmamasını sağlamak için farklı duyarlılıklı cihazlar tercih edilebilir. Ancak bu halde düşük genlikli hareketler kaydedemeyeceğinden genişband özelliklerini kaybedeceklerdir. Şekil 2'de STS marka genişband ile bir ivmeölçer cihazı karşılaştırılmıştır. İvmeölçer cihazı tarafından kaydedilebilen veriler kırmızıçizgiler arasında yer alacaktır. Hızölçerler tarafından kaydedilecek olayları ise mavi kesikli çizgileri göstermektedir. Yeşil çizgiler, USGS'in yüksek ve düşük gürültü seviyesi modelleridir. Siyah çizgiler yakın kaynaktan gelen depremleri, kırmızı çizgiler 100 km çapındaki bölgesel depremleri, kahverengi kesikli çizgiler telesismik olayları göstermektedir. Mavi kesikli çizgiler ile belirlenen alanın üstündeki herhangi bir genlikte, hızölçer doyuma ulaşacaktır.

03.06.2022 tarihinde Balıkesir'in Karesi ilçesinde meydana gelen büyüklüğü 4.7 olan depremin merkez üssüne yakın bulunan 3 adet hızölçerin (Karesi, Balya, Manyas) konumu Şekil 3'te gösterilmiştir. Depremin merkez üssüne en yakın konumda bulunan Karesi istasyonu 9 km, Balya ve Manyas istasyonlarının dışmerkeze mesafesi ise sırasıyla 23 ve 26 km'dir. Depremin merkez üssü çevresinde bulunan bu hızölçerlerin her 3'ü de doyuma ulaşmıştır. Hızölçerlerin doyuma ulaştıkları noktalar oklarla gösterilmiştir. Balya, Manyas ilçelerinde bulunan hızölçerlerin duyarlılığı 3000 V/m/s olduğundan doyum seviyesine daha erken ulaşmışken, duyarlılığı 1000 V/m/s olan Karesi ilçesinde bulunan hızölçer sismometrenin doyum seviyesi daha yüksektir. Buradan farklı duyarlılıklı hızölçerlerin doyum seviyeleri daha iyi anlaşılabilir.



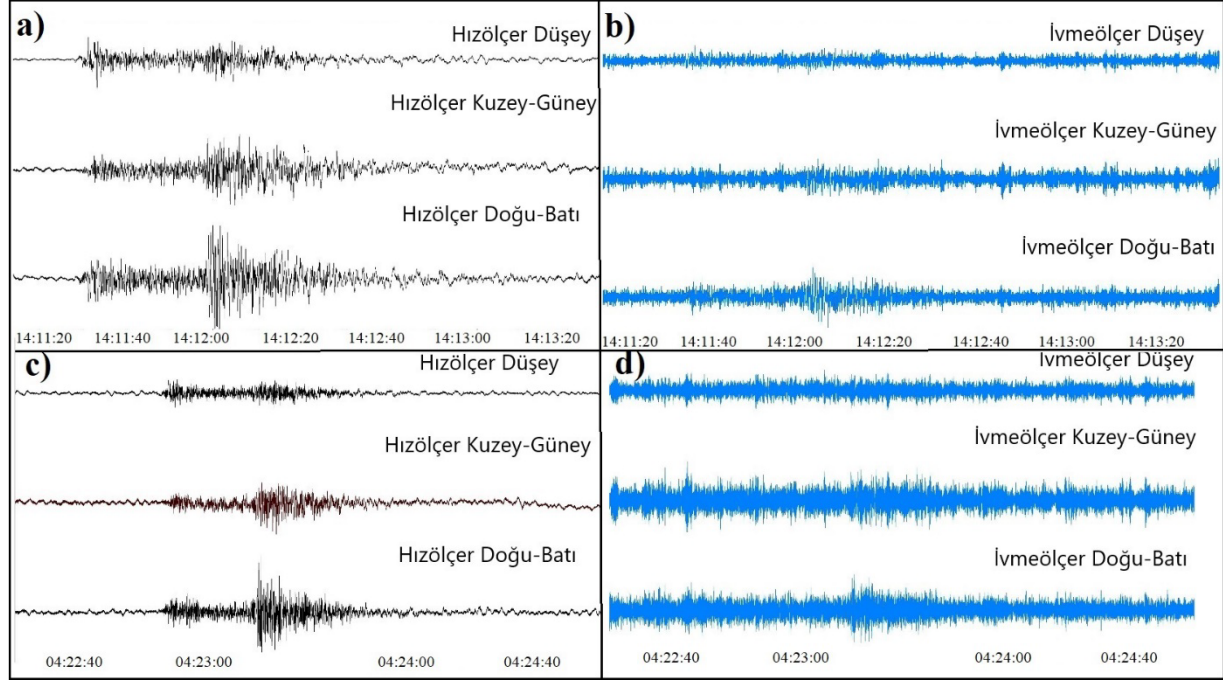
Şekil 2: Farklı tür kayıtçıların karşılaştırması (Clinton ve Heaton 2002).
Figure 2: Comparison of different type of recorders (Clinton and Heaton 2002).



Şekil 3: a) Balıkesir Karesi depremini kaydeden en yakın hızölçer kayıtçı konumları ve kuzey-güney bileşen sismogram kayıtları, b) Balya, c) Manyas ve d) Karesi istasyonları
 Figure 3: a) Locations of closest broadband seismometers that record Balıkesir Karesi earthquake and seismograms of North-South component, b) Balya, c) Manyas and d) Karesi stations

İvmeölçerlerde üst sınır duyarlılığı aşıldığında onlar da doyuma ulaşacaktır. Ancak bu aralık oldukça yüksektir. Bu sınır cihazın çıkış voltajı ve duyarlılığı ile alakalıdır. Örneğin 20 V çıkış voltajına, 1.02 V/m/s² duyarlılığa sahip bir Güralp 5TD cihazı 2g yani yaklaşık olarak 1962 cm/s² ivmeye sahiptir. Ülkemizde, ivmeölçerlerle kuvvetli yer hareketi ölçümlerinin başladığı 1976 yılından günümüze, bu ivme değerinde bir deprem meydana gelmemiştir.

İvmeölçerler düşük büyüklükte uzak depremleri kaydetmede hızölçerler kadar başarılı değildir. 22.03.2022 tarihinde Bursa Mustafakemalpaşa ilçe sınırlarında büyüklükleri 4.3 ve 3.8 olan depremler meydana gelmiştir. Bu depremlerin merkez üssü, Bozcaada istasyonuna 220 km mesafededir. Bozcaada istasyonunda bulunan ivmeölçer ve hızölçerler tarafından kaydedilen deprem kayıtları Şekil 4'te gösterilmiştir. Hızölçer tarafından deprem kaydının P ve S dalgaları her 3-bileşende net gözlemlenirken ivmeölçerler bu deprem hareketini ölçememiştir.



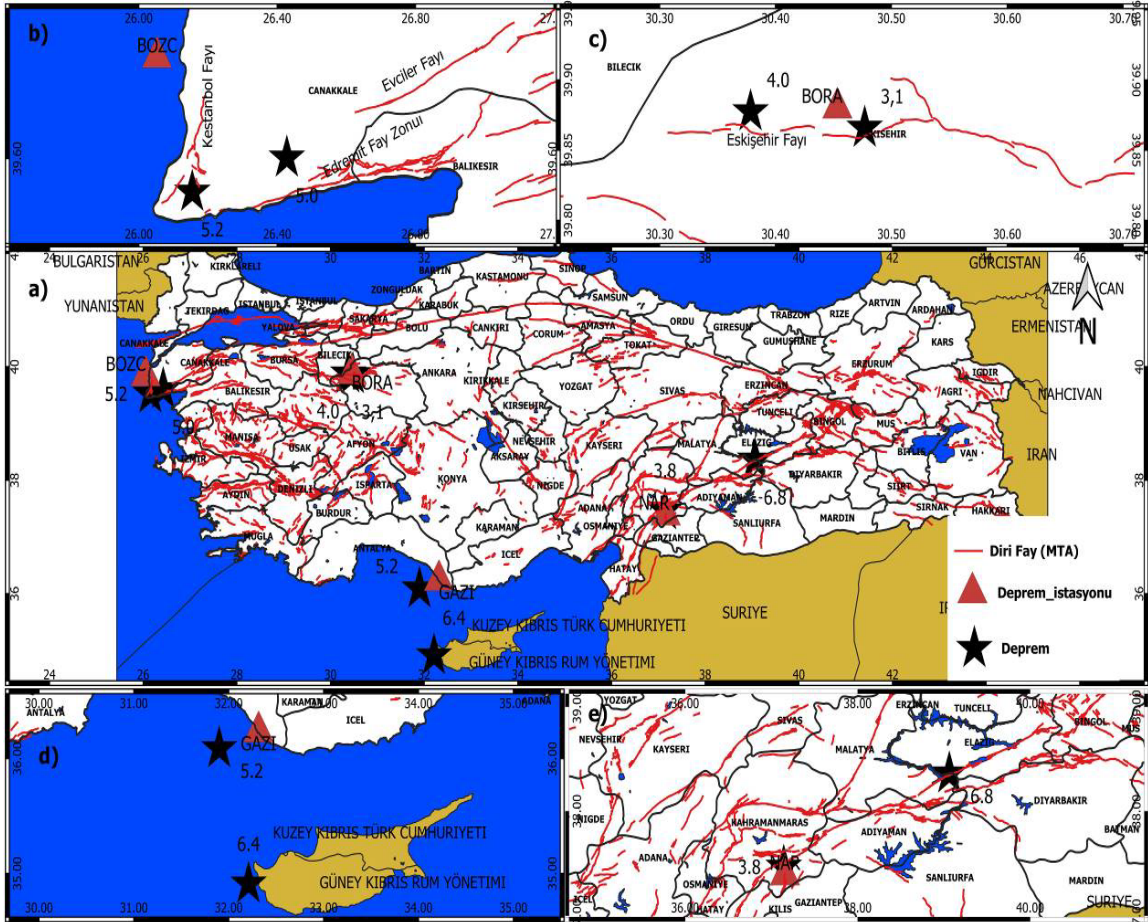
Şekil 4: 22.03.2022 (Mw 4.3) Mustafakemalpaşa depremi Bozcaada istasyon kayıtları; a) Hızölçer, b) İvmeölçer. 22.03.2022 (Mw 3.8) Mustafakemalpaşa depremi kayıtları; c) Hızölçer, d) İvmeölçer.
 Figure 4: 22.03.2022 (Mw 4.3) Mustafakemalpaşa earthquake recorded by Bozcaada station ; a) Broadband, b) Accelerometer. 22.03.2022 (Mw 3.8) Mustafakemalpaşa earthquake recorded by c) Broadband, d) Accelerometer.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

İstasyondan sayısal olarak alınan hızölçer kayıtlarının alet, yönseme (trend) etkisi giderilmiş ve kayıtlara 0.1-25 Hz band geçişli süzgeç uygulanmış, kayıt birimleri m/s'den cm/s'ye dönüştürülmüştür. İstasyondan sayısal olarak alınan ivmeölçer kayıtları cm/s²'ye çevrilmiş, aynı şekilde yönseme etkisi giderilmiş ve 0.1-25 Hz frekans aralığında süzgeç uygulanmıştır. Kaydedilen cm/s² birimindeki ivme verileri sayısal integrasyon yöntemlerinden birisi olan yamuk (trapez) kuralıyla kümülatif olarak integralinin alınması ile birimi cm/s olacak şekilde hız verisine dönüştürülmüştür. Hız birimine (cm/s) dönüştürülen ivmeölçer ve hızölçer kayıtları birbiriyle karşılaştırılmıştır.

3.1) İncelenen Depremler

Depremlerin kaydedildiği istasyonların tamamı zemin büyütmesinden etkilenmemesi için anakayaya kurulmuştur. MTA yer bilimleri haritasından alınan verilere göre; Eskişehir İli Merkez İlçe'de bulunan BORA istasyonu üst Paleozoyik-Triyas yaşlı, şistlerden oluşmaktadır. Çanakkale İli Bozcaada İlçesinde bulunan BOZC istasyonu Orta Miyosen yaşlı andezit birimleri üzerinde kuruludur. Antalya İli Gazipaşa İlçesi'nde bulunan GAZİ istasyonu Kambro-Ordovisiyen yaşlı şist, Kahramanmaraş İli Narlı İlçesi'nde bulunan NAR istasyonu ise Eosen yaşlı kireçtaşı üzerinde konumlandırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: a) Çalışmada kullanılan ve b) BOZC, c) BORA, d) GAZİ ve e) NAR istasyonu tarafından kaydedilen depremler.

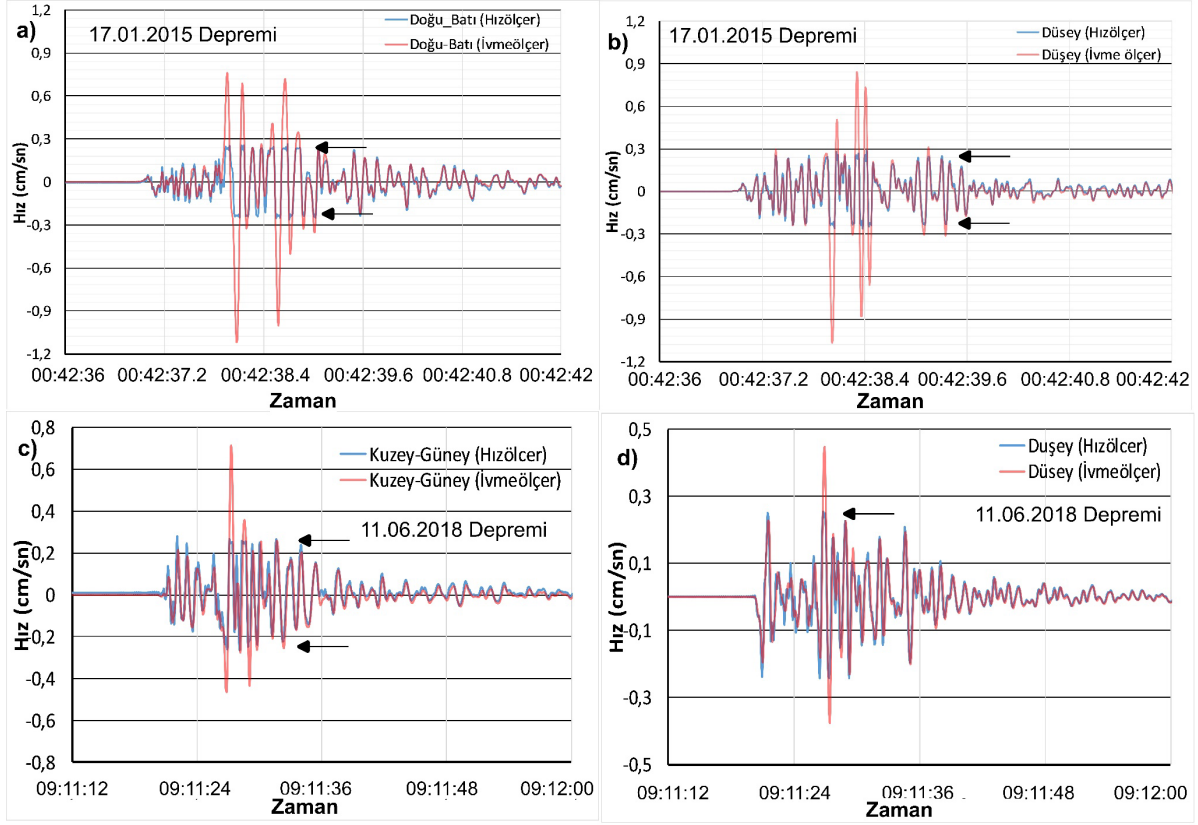
Figure 5: a) Earthquakes that are used in this study and are recorded by; b) BOZC, c) BORA, d) GAZI and e) NAR stations.

4. BULGULAR

Bozcaada, Eskişehir, Gazipaşa (Antalya) ve Pazarcık (Kahramanmaraş)'da kurulu bulunan ivmeölçer ve hızölçer kayıtçıları tarafından kaydedilen depremlerin konumları, ivmeölçer ve hızölçer sismogram görüntüleri, farklı bileşenlerde farklı sensörler tarafından büyük depremlerde doyuma ulaşmış-ulaşmadığı ya da küçük depremleri kaydedip-kaydedemedikleri ile ilgili bulgular aşağıda özetlenmiştir.

4.1) Bora (BORA) İstasyonu Kayıtları

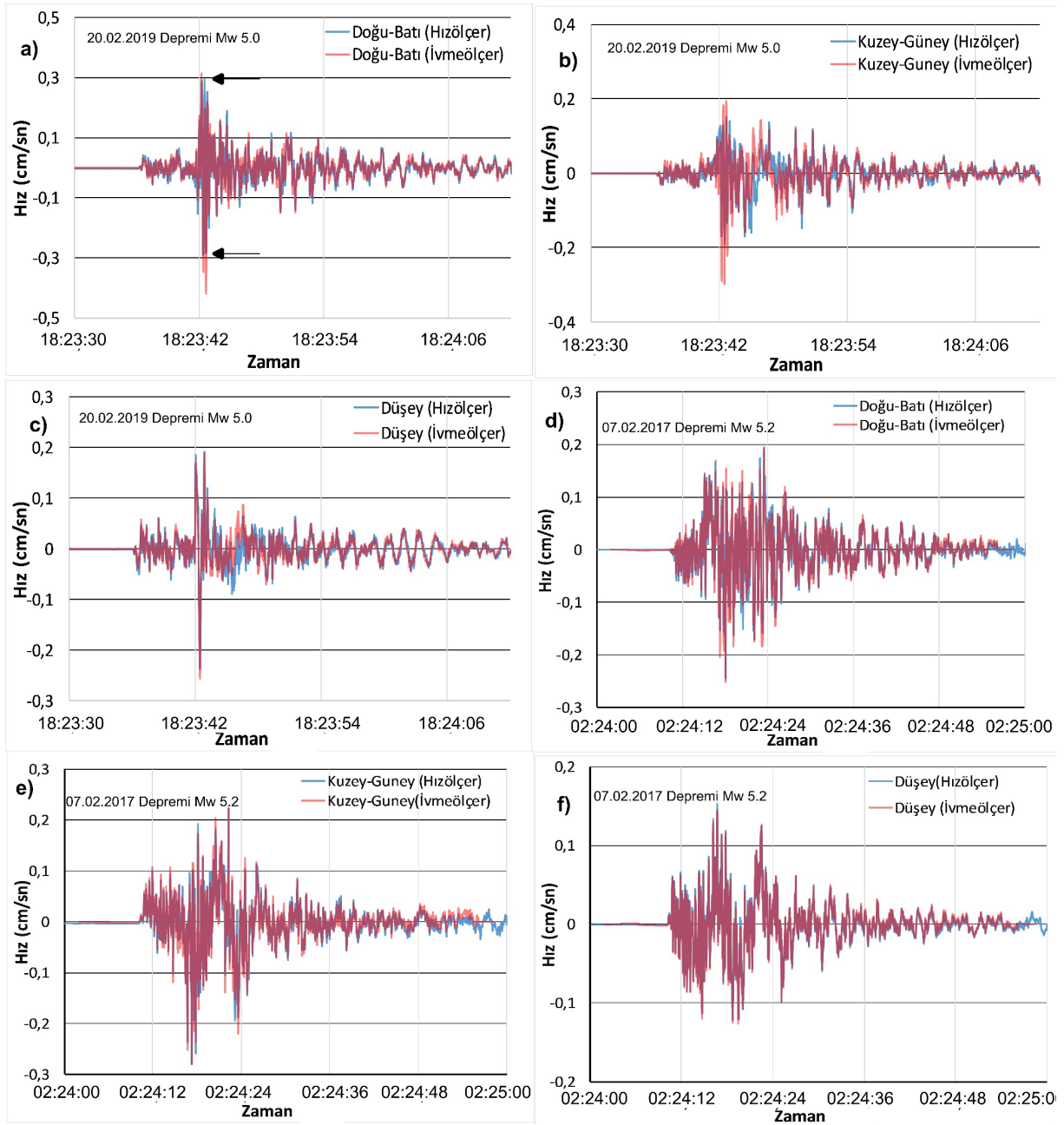
Eskişehir Merkez'de bulunan BORA istasyonunda kaydedilen 2 depremin konumu ve sismogram görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Bu istasyonda bulunan hızölçer cihazında 17.01.2015 tarihindeki depremde kuzey-güney bileşeni, 11.06.2018 tarihindeki depremde ise doğu-batı bileşeni kayıt alamadığından ivmeölçer kayıtları ile karşılaştırma imkânı bulunamamıştır. Bu iki depremde de hızölçer 0.3 cm/s hıza ulaşmadan doyuma ulaşmıştır ki ivmeölçer cihazının genlikleri oldukça yüksektir. İki depremin de merkez üssü istasyona yakındır ancak doğu-batı ve düşey bileşenlerde de görüleceği üzere yakın mesafedeki depremlerde hızölçerler doyuma ulaşmıştır. 17.01.2015 tarihinde meydana gelen depremin maksimum ivmesi 82 cm/s^2 , 11.06.2018 tarihinde meydana gelen depremin maksimum ivmesi 76 cm/s^2 'dir ve Güralp CMG 5TD cihazın doyum limitinin oldukça altındadır.



Şekil 6: BORA istasyonu (hızölçer ve ivmeölçer) tarafından kaydedilen deprem kayıtları
 Figure 6: Earthquakes recorded by the BORA station (broadband and accelerometer seismometers)

4.2) Bozcaada (BOZC) İstasyonu Kayıtları

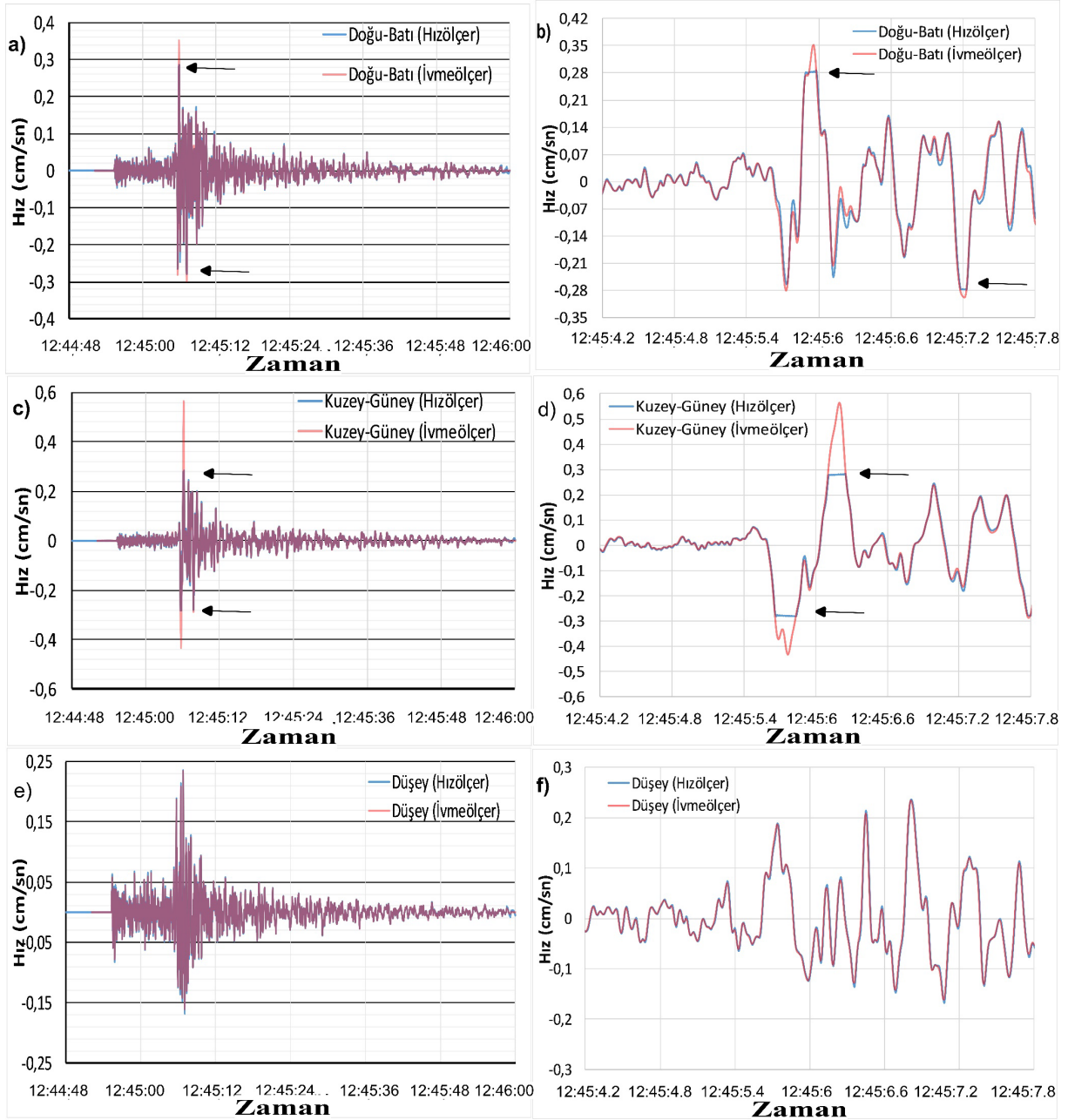
BOZC istasyonu tarafından kaydedilen 2 depremin konumu ve sismogram görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. 20.02.2019 tarihinde meydana gelen 5.0 büyüklüğündeki depremde Şekil 7.a da gösterilen doğu-batı bileşeninde hızölçer cihazı yaklaşık 0.3 cm/s'de doyuma ulaşmıştır. İvmeölçerin aynı bileşende ölçtüğü genlik değeri ise 0.42 cm/s dir. Bu istasyon yalnızca bu bileşende doyuma ulaşmış olup diğer bileşenlerdeki genlik değerleri hızölçerin duyarlık seviyesi içerisinde olduğundan ivmeölçer ile uyumludur. Şekil 7 b.c.d.e ve f'de gösterilen kayıtlarda ise ivmeölçer ve hızölçer kayıtları uyumludur.



Şekil 7: BOZC istasyonu (hızölçer ve ivmeölçer) tarafından kaydedilen deprem kayıtları
 Figure 7: Earthquakes recorded by (broadband and accelerometer located at) BOZC station

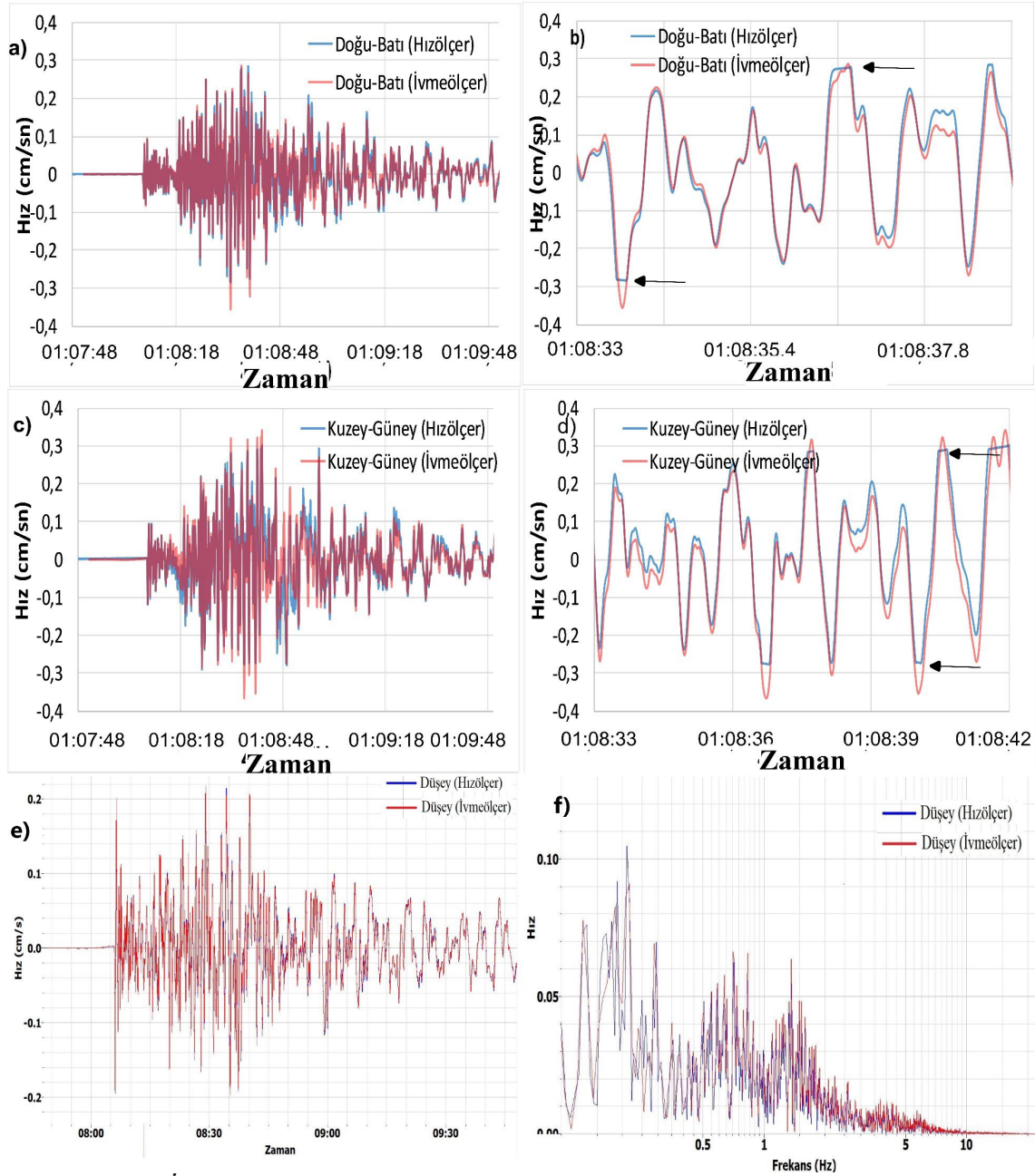
4.3) Gazipaşa (GAZİ) İstasyonu Kayıtları

Antalya Gazipaşa'da bulunan GAZİ istasyonu tarafından kaydedilen 2 depremin konumu ve sismogram görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. 05.12.2020'de meydana gelen 5.1 büyüklüğünde ve merkez üssü istasyona 40 km mesafede hızölçer doğu-batı ve kuzey-güney bileşen S-dalgası fazında (0.3 cm/s hıza ulaşmadan) doyuma ulaşmıştır (Şekil 8 a,c). S-dalgasının başlangıcı yaklaştırılmış olarak Şekil 8 b,d'de gösterilmiştir. Hızölçer cihazının düşey bileşeni, duyarlılığın altında kaldığı için doyuma ulaşmamıştır (Şekil 8e,f). İvmeölçerin ölçtüğü genlik değeri kapasitesinin çok altındadır. İvmeölçer cihazının 05.12.2020 depreminde ölçtüğü en büyük ivme değeri doğu-batı bileşende 10 cm/s^2 'dir. Hızölçer sismometrenin doyuma ulaştığı noktalar dışında iki sensördeki sismogram görüntüsü benzerdir.



Şekil 8: GAZİ istasyonu (hızölçer ve ivmeölçer) tarafından kaydedilen 05.12.2020 deprem kayıtları
 Figure 8: Earthquakes recorded by (broadband and accelerometer located at) GAZI station for 05.12.2020 earthquake

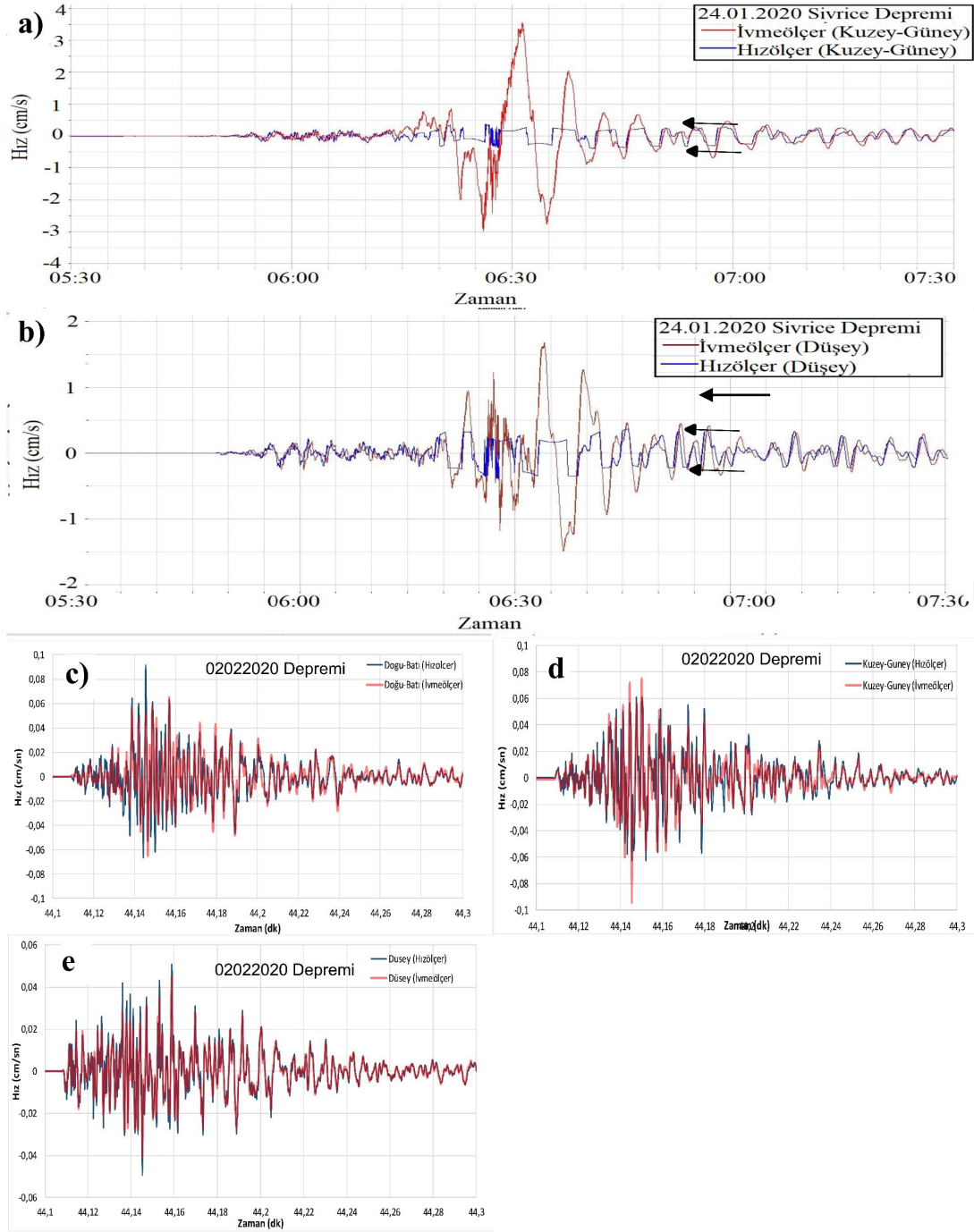
10.01.2022 tarihinde Kıbrıs Adasının batısında 6.4 büyüklüğünde meydana gelen deprem merkez üssü GAZİ istasyonuna uzaklığı 147 km'dir. İstasyonda bulunan hızölçer cihazı yatay bileşenlerde (Şekil 9 a,b,c,d) yalnızca birkaç noktada 10-20 ms gibi çok kısa süreli doyuma ulaşmıştır. Hızölçer cihazı doyuma ulaşmadığı diğer zamanlarda ve ivmeölçer düşey bileşen kayıtları ile uyumludur. Ancak düşey bileşende hızölçer ve ivmeölçerin düşük frekanslarında farklılıklar mevcuttur (Şekil 9 e f).



Şekil 9: GAZİ istasyonu (hızölçer ve ivmeölçer) tarafından kaydedilen 10.01.2022 deprem kayıtları
 Figure 9: Earthquakes recorded by (broadband and accelerometer located at) GAZI station for 10.01.2022 earthquake

4.4) Narlı (NAR) İstasyonu Kayıtları

Kahramanmaraş Pazarcık ilçesinde kurulan NAR istasyonu tarafından kaydedilen 2 depremin konumu ve sismogram görüntüleri Şekil 10'da verilmektedir. 24.01.2020 tarihinde 6.8 büyüklüğünde meydana gelen Elazığ, Sivrice depremi kuzey-güney ve düşey bileşenlere ait hız ve ivmeölçer kayıtlar Şekil 10 a-b'de görülmektedir. İstasyon depremin merkez üssüne 198 km uzaklıktadır. Şekil 10 c,d ve e'de ise 02.02.2020 tarihli depremin hız ve ivmeölçerlere ait yatay ve düşey bileşen kayıtları verilmiştir. Hızölçer, doğu-batı bileşende kayıt alamadığından ivmeölçer ile karşılaştırılamamıştır.



Şekil 10: NAR istasyonu (hızölçer ve ivmeölçer) tarafından kaydedilen 24.01.2020 deprem kayıtları
 Figure 10: Earthquakes recorded by (broadband and accelerometer located at) NAR station for 24.01.2020 earthquake

Şekil 10 a,b'de hızölçerin ~ 0.3 cm/s değerinde doyuma ulaştığı gözlenmiştir. Kuzey-güney bileşende ivme değeri 54 cm/sn², düşey bileşende 42 cm/s²'dir ve sensor üst sınırı olan ~ 2 g'nin altındadır. Hızölçer, depremin merkez üssüne uzak olmasına rağmen doyuma ulaşmıştır ve en büyük genliği ölçmemiştir. Şekil 10 c,d,e'de, 3.8 büyüklüğünde istasyona 8 km mesafede meydana gelen bir depremin hız ve ivme kaydı verilmiştir. Bu depremde ivmeölçer ve hızölçer kayıtlarında, frekans içeriği değişiminden dolayı pik değerlerde bazı farklılıklar bulunmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı amaçlar için tasarlanmış ivmeölçer ve hızölçer cihazlarının kaydettiği deprem kayıtları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, 4 farklı bölgede meydana gelen 8 deprem kaydı kullanılmıştır. Merkez üsleri ve odak mekanizmaları farklı olan depremlere bakıldığında, yapısı gereği hızölçer cihazlarının yüksek genlikli hareketleri ölçemediği ve doyuma ulaştığı, ivmeölçerlerin ise deprem dalgalarına ait genlikleri tam olarak ölçtüğü gözlenmiştir. Buna karşın ivmeölçer cihazların, uzak ve küçük büyüklüklü depremlerde deprem dalgasına ait fazları tam olarak ölçemediği gözlenmiştir. Hızölçerin doyuma ulaşmadığı zamanlarda ise ivmeölçerin ölçümleri ile benzerdir.

Bu nedenle Türkiye gibi sismik etkinliği yüksek bazı bölgelerde aynı istasyonun içerisine, farklı nesil ve teknolojiye sahip hem ivmeölçer, hem de hızölçer cihazlarının kurulması halinde küçükten büyüğe bütün genlikler kapsanmış olacak, böylece yakın ve kuvvetli depremler ölçülebilir hale gelecektir. Ancak, her istasyona 2 farklı yapıda cihaz konulması maliyet açısından bir yük oluşturacağından deprem aktivitesi yüksek bölgelerdeki istasyonlara kurulması önerilmektedir. Bu şekilde, hem uzak ve düşük büyüklükteki depremler hızölçerler yardımıyla, hem de güçlü ve yakın depremler ivmeölçer ile kaydedileceğinden tüm genlikler elde edilmiş olacaktır. Öngörülen sayıdaki istasyonlara burada önerilen ve tamamlayıcı nitelikte ek kayıtçıların kurulması, sonrasında gerekli testlerin yapılması, avantaj ve dezavantajların daha net analiz edilmesini sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Çalışmada kullanılan deprem verilerinin kaydedilmesi ve arşivlenmesini sağlayan AFAD Deprem Dairesi personeline, faydalı eleştirileri nedeniyle çalışmaya katkı koyan hakemlere, Türk Deprem Arastirma Dergisi sekreteri Cenk Erkmen'e ve dergi editörü Orhan Polat'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Allen R.M., Ziv A., 2011. Application of real-time GPS to earthquake early warning, *Geophys. Res. Lett.* 38, L16310.

Ates E., 2020. Comparison of Horizontal / Vertical Spectral Ratios Obtained Using Earthquake and Microtremor Records: The Example of Amasya, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 2(2), 160-175.

Clinton J.F., Heaton T.H., 2002. The Potential Advantages of a Strong-motion Velocity Meter Over a Strong-motion Accelerometer, *Seismological Research Letters* 73, 332-342.

Kılıç T., Kartal R.F., Zünbül S., Kadirioğlu F.T., Kaplan M., Yanık K., Türkoğlu M., Demir M., İde A., Karaağaç D., 2011. Deprem Tehlike ve Risk Çalışmalarında Sismolojik Gözlem Ağlarının Önemi: Türkiye Ulusal Gözlem Ağındaki Son Gelişmeler, 1.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 11-14 Ekim 2011, Erişim adresi: http://www.tdmd.org.tr/TR/Genel/11.Oturum/1.TDMSK_049.pdf.

Hauksson E., Small P., Hafner K., Busby R., Clayton R., Goltz J., Heaton T., Hutton K., Kanamori H., Polet J., Given D., Jones L.M., Wald D. 2001. Southern California Seismic Network: Caltech/USGS Element of Trinet 1997-2001, *Seismological Research Letters* 72(6), 690-704.

Michel C., Kelevitz K., Houlie N., Edwards B., Psimoulis P., Su Z., Clinton J., Giardini D., 2017. "the potential of high-rate gps 123 for strong ground motion assessment." *Seismological Society of America*, 107, 1849- 1859.

Perk S., Ozer C., 2019. Investigation of Soil Properties based on Accelerometer Stations using Earthquake Recording: The Case Study of Hatay, Turkey, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 1(2), 167-179.

Senturk M.D., Aktug B., 2019. Precision of Global Navigation Satellite Systems Based Earthquake Observations, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 1(1), 48-62.

Tun M., Mutlu S., Pekkan E., 2020. EstuNet: A new Weak/Strong-Motion Network with Geodatabase for Metropolitan Eskisehir and Bursa, West Anatolia, Turkey, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 2(2), 193-208.

Tunç S., Tunç B., Çaka D., 2015. Genişband Sismometreler Neden Clip Olurlar?, 3.Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 14-16 Ekim 2015, Erişim adresi: http://www.tdmd.org.tr/TR/Genel/pdf2015/TDMSK_138.pdf.

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Çalışma kapsamında kullanılan deprem kayıtları AFAD Deprem Dairesi Başkanlığından, Fay verileri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünden alınmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

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



A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye)

Serkan Ozturk¹ and Hamdi Alkan²

¹ Gumushane University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysics, Baglarbasi 29100 Gumushane, Türkiye

² Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Engineering, Department of Geophysics, Tusba 65080 Van, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1322-5164, 0000-0003-3912-7503

Keywords

Lake Van, *b*-value, Z-value, Combined forecast method, Earthquake hazard

Highlights

* Lake Van and its adjacent area, seismicity
* *b*-value, Z-value, RI model, PI model, hotspot region
* Combined earthquake forecasting in the intermediate term and hazard analysis

Aim

Make a statistical evaluation of the earthquake forecasting and hazard for Lake Van and its adjacent area

Location

Lake Van and its adjacent area

Methods

Gutenberg-Richter Relation, Standard Normal Deviate, Relative Intensity, Pattern Informatics, Combined Forecast Method

Results

In this study, the current earthquake hazard is tried to present at the beginning of 2020 and earthquake forecasting is made for the next five years between 2022 and 2027 for Lake Van and its adjacent area, Türkiye

Supporting Institutions

--

Financial Disclosure

The author declares that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 25.04.2022

Revised: 05.08.2022

Accepted: 13.10.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1108730



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

Corresponding Author

Serkan Ozturk

Email: serkanozturk@gumushane.edu.tr

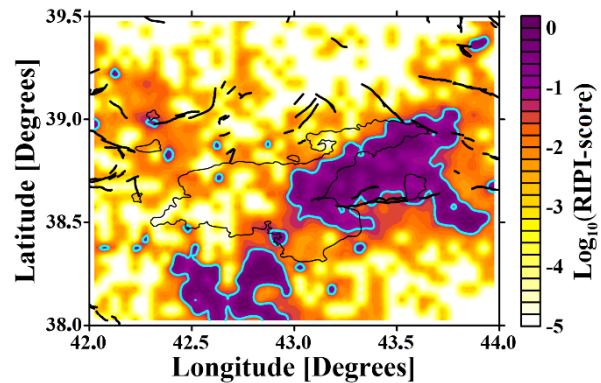


Figure
Forecast map with the combined method (RIPI) for the future 5-years between 2022 and 2027

How to cite:

Ozturk S., Alkan H., 2022. A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye), Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 191-209, <https://doi.org/10.46464/tdad.1108730>



Van Gölü ve Civarı (Türkiye) İçin Deprem Tahmini ve Tehlikesi Üzerine İstatistiksel Bir Analiz ve Değerlendirme

Serkan Öztürk¹ ve Hamdi Alkan²

¹ *Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Bağlarbaşı 29100 Gümüşhane, Türkiye*

² *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Tuşba 65080 Van, Türkiye*
ORCID: 0000-0003-1322-5164, 0000-0003-3912-7503

ÖZET

Bu çalışmada, Van Gölü ve civarı için güncel deprem tehlikesi ortaya konmaya çalışılmış ve gelecek beş yıl için deprem tahmini yapılmıştır. Bu amaçla, *b*-değeri, *Z*-değeri, göreceli yoğunluk (RI) ve oluşum bilgisi (PI) verilerinin birlikte kullanımı ile istatistiksel bir analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, orta vadede deprem tahmini ve tehlikesi için literatürdeki farklı sismolojik ve jeofiziksel değişkenleri analiz eden çalışmalarla detaylı bir tartışma yapılmıştır. Bu parametreler arasındaki ilişkiler daha doğru ve güvenilir yaklaşımlar ortaya koymuştur. Sonuç olarak, 2022 yılı başında, özellikle düşük *b*-değeri ve yüksek *Z*-değerine sahip bölgelerle birleştirilmiş tahmin haritasında 2022-2027 yılları arasındaki sıcak noktalar (olası deprem bölgeleri) Çaldıran, Yeniköşk, Erciş ve Malazgirt fayları ile Saray ve Van Fay zonlarını içeren Muradiye, Çaldıran, Özalp, Van şehir merkezi ve Gevaş civarında tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Van Gölü, *b*-değeri, *Z*-değeri, Birleşik tahmin yöntemi, Deprem tehlikesi

Öne Çıkanlar

- * Van Gölü ve civarı, depremsellik.
- * *b*-değeri, *Z*-değeri, RI modeli, PI modeli, sıcak nokta.
- * Orta vadede birleştirilmiş deprem tahmini ve tehlike analizi.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.04.2022
Düzeltilme: 05.08.2022
Kabul: 13.10.2022
Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1108730

Sorumlu yazar

Serkan Öztürk
Eposta:
serkanozturk@gumushane.edu.tr

A Statistical Analysis and Evaluation on the Earthquake Forecasting and Hazard for Lake Van and its adjacent area (Türkiye)

Serkan Ozturk¹ and Hamdi Alkan²

¹ *Gumushane University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysics, Baglarbasi 29100 Gumushane, Türkiye*

² *Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Engineering, Department of Geophysics, Tusba 65080 Van, Türkiye*
ORCID: 0000-0003-1322-5164, 0000-0003-3912-7503

ABSTRACT

In this study, current earthquake hazard is tried to present and earthquake forecasting is made for Lake Van and its adjacent area for the next five years. For this purpose, a statistical analysis is achieved with the concomitant use of the *b*-value, *Z*-value, relative intensity (RI) and pattern informatics (PI) data. In addition, for the earthquake forecasting in the intermediate term and hazard, a comprehensive discussion is made with the studies analyzing the different seismological and geophysical variables in literature. The relations between these parameters reveal more accurate and reliable approaches. Consequently, at the beginning of 2022, particularly the areas having small *b*-value and large *Z*-value with the hotspots (possible earthquake areas) between 2022 and 2027 from the combined forecast map are determined in and around Muradiye, Çaldıran, Özalp, Van city centre and Gevaş including Çaldıran, Yeniköşk, Erciş and Malazgirt faults with Saray and Van Fault zones.

Keywords

Lake Van, *b*-value, *Z*-value, Combined forecast method, Earthquake hazard

Highlights

- * Lake Van and its adjacent area, seismicity.
- * *b*-value, *Z*-value, RI model, PI model, hotspot region.
- * Combined earthquake forecasting in the intermediate term and hazard analysis.

Manuscript

Research Article

Received: 25.04.2022
Revised: 05.08.2022
Accepted: 13.10.2022
Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1108730

Corresponding Author

Serkan Ozturk
Email:
serkanozturk@gumushane.edu.tr

1. GİRİŞ

Depremlerin bölge-zaman oluşumları rastgele değildir ve çoğu zaman bir öncü veya belirti vermeden meydana gelir. Bu da depremleri en tehlikeli ve en yıkıcı doğal afetlerden biri yapar. Dolayısıyla depremlerin tahmini istatistiksel bir tabana oturtulabilirse deprem oluşumlarının istatistiksel karakterleri, gelecekteki olası depremlerin tahmininde oldukça önemli hale gelir. Deprem tahmin yöntemleri genellikle iki sınıfta toplanabilir: birinci yaklaşım öncü değişimlerin deneysel ölçümlerini dikkate alırken, ikinci yaklaşım sismik aktivitenin istatistiksel oluşumunu kullanır (Holliday ve diğ. 2007). Buna bağlı olarak Türkiye ve Dünya'nın farklı deprem bölgeleri için deprem oluşumlarının bölge-zaman analizlerini ve deprem tahmini çalışmalarını kapsayan farklı birçok fiziksel model, ölçek yasaları, parametreler, gözlemler ve yaklaşımları kullanan çok sayıda çalışma mevcuttur (Varatos ve Alexopoulos 1984, Keilis-Borok 1996, Tiampo ve diğ. 2002, Polat ve diğ. 2008, Utkucu ve diğ. 2013, Ozturk 2020, Ozer ve diğ. 2022).

Deprem istatistiği çalışmalarında en iyi bilinen ve en sık kullanılan parametrelerden birisi deprem dağılımlarının magnitüd-frekans ilişkisini ortaya koyan Gutenberg-Richter (G-R) ilişkisidir (Gutenberg ve Richter 1944). G-R ilişkisindeki b -değeri, yalnızca küçük ve büyük depremlerin göreceli oranlarını yansıtmaz, bununla birlikte gerilmenin bölge-zaman-derinlik değişimleri ve bölgenin sismojenik özellikleriyle de ilişkilidir. Dolayısıyla, depremlerin oluşum sayıları ile sismik moment, enerji veya fay uzunluğu arasındaki ilişki b -değerinin analizi ile açıklanabilir. Dünyanın farklı sismotektonik bölgeleri için G-R ilişkisini kullanan birçok çalışma mevcuttur (Enescu ve Ito 2002, Scholz 2015) ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular deprem dağılımlarının fraktal özelliklerinin gelecek deprem oluşumları ve sismojenik gerilme durumuyla ilişkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

Deprem davranışları üzerine diğer önemli bir istatistik, depremin öncüsü veya işaretçisi olarak depremsellik oranının anormal bölge-zaman değişimlerinin incelenmesini kapsar. Öncü sismik durgunluk varsayımı, bir deprem bölgesindeki mevcut deprem aktivite oranına kıyasla ortalama depremsellikteki önemli bir azalış olarak tanımlanabilir (Wiemer ve Wyss 1994). Ana şoktan önceki öncü sismik durgunluk olgusu üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur (Console ve diğ. 2000, Ozturk 2011; 2020, Derode ve diğ. 2021). Bu çalışmalardan elde edilen genel bulgular ise, deprem odak bölgesi ve civarında ana şoktan önceki birkaç yıl içerisinde deprem aktivitesinde önemli bir azalışın gözlenmiş olmasıdır.

G-R ilişkisi ve öncü sismik durgunluk analizlerine ek olarak, deprem tahmini için alternatif bir yaklaşım sunulmuştur (Rundle ve diğ. 2002, Tiampo ve diğ. 2002). Bu yaklaşım, Oluşum Bilgisi (Pattern Informatics, PI) olarak adlandırılır ve depremselliğin güçlü bölge-zaman ilişkisine dayandırılır. Bu tahmin yöntemi öncü sismik aktivite veya durgunluğu tanımlamak için kullanılabilir ve elde edilen sonuçlar, depremlerin gelecek bir zaman aralığında, genellikle 5-10 yıl içerisinde, meydana gelebileceği sismojenik bir alanı ortaya koyabilir (Holliday ve diğ. 2006). PI yönteminden elde edilen bulgular özellikle Göreceli Yoğunluk (Relative Intensity, RI) analizinden elde edilen verilerle birlikte değerlendirildiğinde önemli sonuçlar ortaya çıkar. RI yöntemi, deprem tahmini için diğer bir alternatif yöntemdir ve orta büyüklükteki geniş deprem aktivite bölgelerini ortaya koyabilir. Sonuçta bu tahminler, çoğu orta büyüklükte ve yakın geçmişte olmuş depremlerin gelecekteki olası depremlerin meydana gelebileceği yerleri ortaya koyabileceği hipotezine dayalıdır (Holliday ve diğ. 2005; 2006).

Türkiye, sismotektonik açıdan dünyanın en önemli bölgelerinden bir tanesidir ve dolayısıyla, depremlerin istatistiksel davranışları ve deprem tehlikesi üzerine bölgede çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğu Anadolu Bölgesi (DAB), orta ve uzun vadede güçlü ve yıkıcı deprem oluşumları açısından Türkiye'nin en aktif bölgelerinden biridir (Biro ve diğ. 2020, Bayrak ve diğ. 2021). Özellikle, Van ve civarında aletsel dönemde, 29 Nisan 1903 Malazgirt ($M_s=6.7$, yüzey dalgası magnitüdü), 10 Eylül 1941 ($M_s=5.9$), 26 Şubat 1960 Başkale-Van ($M_s=5.8$), 24 Kasım 1976 Muradiye-Van ($M_s=7.5$), 25 Haziran 1988 Van Gölü ($M_s=5.3$), 15 Kasım 2000 Gevaş-

Van ($M_s=5.0$), 23 Ekim 2011 Van ($M_s=7.2$), 24 Haziran 2012 Karagündüz-Van ($M_s=5.0$) ve 6 Aralık 2021 Van Gölü ($M_s=5.0$) depremleri gibi güçlü ve yıkıcı depremler meydana gelmiştir (KRDAE-BDTİM, 2022). Van Gölü ve civarı için farklı içerikte birçok çalışma mevcut olmasına rağmen, bu tür değerlendirmeler ve gelecekteki olası depremlerin tahmini üzerine çalışmaların sayısı oldukça azdır. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, 2022 başlangıcı itibarıyla Van Gölü ve civarındaki deprem aktivitesinin bölge-zaman değerlendirmesini yaparak deprem tahmini ve tehlikesi için farklı bir bakış açısı sunmaktır. Bu amaçla, G-R ilişkisindeki b -değeri, standart normal sapma (öncü sismik durgunluk) Z -değeri üzerine detaylı istatistiksel analizler yapılmış, PI ve RI algoritmaları ile bunların birleşiminin (RIPI) bu bölgedeki güçlü/büyük depremlerin tahmini için kullanılabilirliği ilk olarak test edilmiştir. Ayrıca, orta vadede deprem tahmini için daha güvenilir ve daha doğru yorumlar yapabilmek amacıyla farklı sismolojik ve jeofiziksel değişkenleri içeren çalışmalarla detaylı bir tartışma yapılmıştır. Böylece, Van Gölü ve civarı için gelecekte beklenebilecek depremlerin zaman ve bölge oluşumlarının istatistiksel bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

2. İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

Van Gölü ve civarı için deprem tahmini ve tehlikesi üzerine yapılan istatistiksel değerlendirmeler, G-R ilişkisindeki b -değeri ve ilişkili olarak tamlık magnitudü M_c -değeri, standart normal sapma Z -değeri (sismik durgunluk), göreceli yoğunluk (RI) ve oluşum bilgisi (PI) gibi sismotektonik parametrelerin bölge-zaman değişimlerinin analizi ile gerçekleştirilmiştir.

2.1) Gutenberg-Richter İlişkisi ve Magnitud-Deprem Sayısı Analizi (b -değeri)

Deprem oluşumlarının magnitud-frekans ilişkisi Gutenberg-Richter (1944) tarafından bir ölçek yasası ile verilmiştir. Deprem istatistiğinin bu temel bağıntısı 1 numaralı denklemle verilir:

$$\log_{10} N(M) = a - bM \quad (1)$$

Burada $N(M)$, magnitudü M 'ye eşit veya daha büyük olan depremlerin belirli bir zaman aralığındaki kümülatif sayısı, a ve b -değerleri pozitif katsayılardır. b -değeri magnitud-frekans dağılımının eğiminden hesaplanırken, a -değeri sismik aktivite oranı ile ilişkilidir. a -değeri farklı bölgeler için önemli değişimler gösterir ve bu değişimler çalışma alanının boyutuna, kataloğun süresine ve deprem sayısına bağlıdır. b -değeri dünyanın farklı sismotektonik bölgeleri için 0.3-2.0 arasında değişim gösterir (Utsu 1971) ve ortalama b -değeri 1.0 civarındadır (Frohlich ve Davis 1993). Tektonik özellikler, anizotropik yapı ve gerilme değişimleri gibi birçok faktör b -değerindeki değişimleri etkiler. Ayrıca, jeolojik yapı, çatlak yoğunluğu, termal gradyan, malzeme özellikleri, fay uzunluğu, sismik dalga hızlarındaki değişimler ve soğurulma, deformasyon koşulları ve atım dağılımı gibi birçok özellik b -değeri üzerinde etkilidir (Scholz 2015).

Özellikle b -değeri tahmininde ve sismik durgunluk hesaplamalarında kaliteli ve güvenilir istatistiksel sonuçlar için tamlık magnitudü, M_c -değeri, önemli parametrelerden bir tanesidir ve bu tür tahminler analizlerin ilk aşaması olarak düşünülmelidir. M_c -değeri tam bir veri setinin minimum magnitudü olarak tanımlanır ve depremlerin magnitud-frekans bağıntısından tahmin edilebilir (Wiemer ve Wyss 2000). M_c -değerinin zamanla değişimi istatistiksel sonuçları etkiler ve dolayısıyla doğru tahminler için maksimum deprem sayısının kullanılması hedeflenir. Sonuçta, bu çalışma kapsamında, zamanla M_c -değerindeki değişimlerin analizi ilk adım olarak gerçekleştirilmiştir. Çünkü bu değer, b -değeri, sismik durgunluk, RI, PI ve birleştirilmiş tahmin haritalarının hazırlanması için kullanılmıştır.

2.2) Standart Normal Sapma ve Öncü Sismik Durgunluk (Z-değeri)

Sismik durgunluk hipotezi ilkez Wyss ve Haberman (1988) tarafından önerilmiştir ve sismojenik bir zonda meydana gelen deprem aktivitesindeki önemli bir azalma öncü durgunluk olarak tanımlanmıştır (Wiemer ve Wyss 1994). Depremsellik oran değişimlerini tanımlayan birçok farklı yöntem mevcuttur ve bu uygulamaların çoğu ana şoklardan önceki sismik durgunluğun bölge-zaman modellemesini kullanır. Bu tür değerlendirmeler içerisinde en yaygın uygulamalardan biri standart normal sapma Z-değeri olarak verilir ve ZMAP yazılımında (Wiemer 2001) verilen yöntem Wiemer ve Wyss (1994) tarafından tanımlanır. Standart normal sapma Z-testi, standart sapma birimindeki güven seviyesinin istatistiksel değerlendirmesi için Uzun Vadeli Ortalama LTA(t) fonksiyonunu kullanır:

$$Z(t) = \frac{R_1 - R_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2)$$

Denklem 2'de R_1 ; tüm zaman penceresindeki ortalama depremsellik oranı (deprem sayısı), R_2 ; düşünülen zaman penceresindeki ortalama aktivite oranı, σ_1 ; R_1 zaman penceresindeki sismik yoğunluk fonksiyonunun standart sapması, σ_2 ; R_2 zaman penceresindeki sismik yoğunluk fonksiyonunun standart sapması, n_1 ; R_1 zaman diliminde ölçülen depremsellik oranındaki örneklerin sayısı ve n_2 ; R_2 zaman diliminde ölçülen depremsellik oranındaki örneklerin sayısı ile ilişkilidir. Z-değeri zamanın bir fonksiyonu olarak tahmin edilir ve tüm zaman penceresinin kataloğun periyodu boyunca kaymasını sağlar.

2.3) Göreceli Yoğunluk (RI) ve Oluşum Bilgisi (PI)

Deprem tahmini için alternatif bir yaklaşım, geçmişteki küçük deprem oluşum oranlarının kullanılmasını ve yüksek sismik aktivite veya durgunluk gösteren bölgelerin dikkate alınmasını kapsar. Bu bölgeler gelecekte olması muhtemel büyük depremlerin beklendiği yerlerdir (Holliday ve diğ. 2007). Bu yöntemler aslında deprem kestirimi yapmaz fakat depremlerin gelecek 5-10 yıllık içerisinde meydana gelmesi muhtemel sismojenik bölgeleri (sıcak noktalar) tahmin eder. RI ve PI yöntemleri birçok çalışmada bulunabilir ve RI tahmin yöntemi beş adımda açıklanabilir (Nanjo ve diğ. 2006a; b, Holliday ve diğ. 2005; 2006; 2007):

- i. Çalışma alanı doğrusal bir Δx grid aralığına bölünür.
- ii. j grid aralığındaki küçük bir Mc -değerinden büyük veya ona eşit bir M magnitüdü depremlerin sayısı t_s , t_E (sırasıyla kataloğun başlangıç ve bitiş zamanları) zaman aralığı için hesaplanır. Bu sayı $n_j(t_s, t_E)$ olarak tanımlanan gün başına düşen sayıyı hesaplamak için kullanılan ortalamadır.
- iii. Bu sayının göreceli değeri RI-değeridir. Bu değer $n_j(t_s, t_E)/n_{\max}$ formunda verilir. Burada n_{\max} , $n_j(t_s, t_E)$ 'nin en yüksek değeridir ve RI-değeri 0-1 arasında değişim gösterir.
- iv. Başlangıç bir w -değeri için 0-1 aralığı ($0 \leq w \leq 1$) dikkate alınırsa, gelecek büyük depremlerin yalnızca w değerinden daha büyük RI-değerine sahip grid içerisinde olması beklenir. Başlangıçtaki w -değerinden daha küçük RI-değerine sahip gridler, gelecek büyük deprem oluşumlarının beklenmediği alanlardır.
- v. Sonuçta, RI tahmin çerçevesine göre, büyük olayların daha yüksek deprem aktivitesine sahip bölgelerde olması beklenir.

PI yöntemi ise on iki adımda verilebilir (Nanjo ve diğ. 2006b):

- i. RI tahmininde olduğu gibi, çalışma alanı doğrusal bir Δx grid aralığına bölünür.
- ii. t_0 ile tanımlanan alandan itibaren $M \geq Mc$ olan bölgedeki tüm olaylar hesaplamaya katılır.

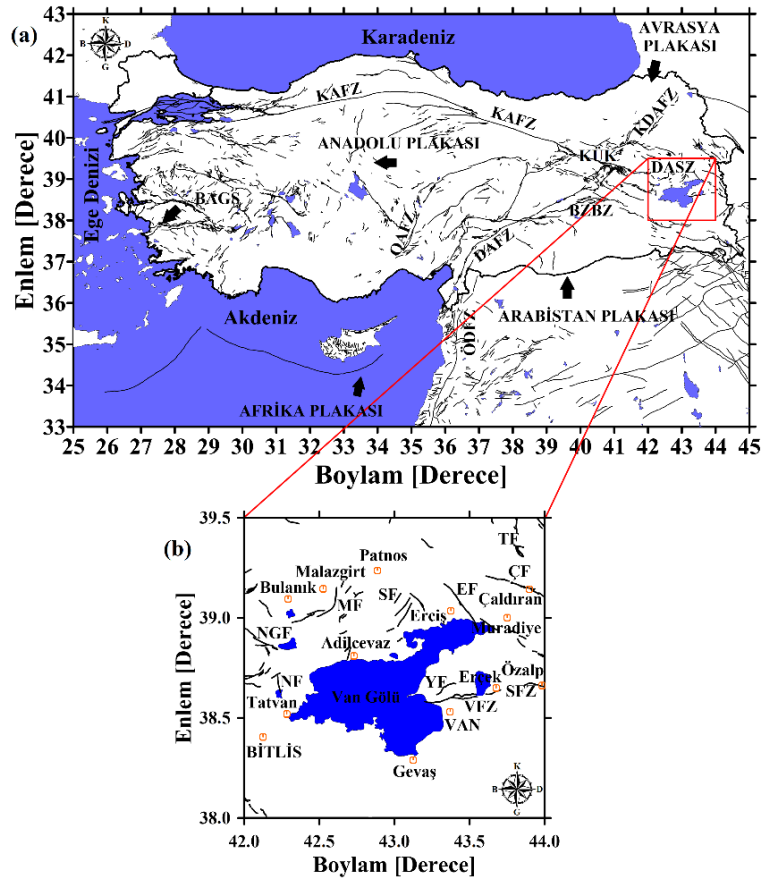
- iii. Üç referans zaman aralığı dikkat alınır:
- t_b-t_1 arasındaki bir referans zaman aralığı.
 - t_b-t_2 ($t_2 > t_1$) arasındaki ikinci bir zaman aralığı. Dolayısıyla, sismik aktivite değişimlerinin hesaplandığı değişim periyodu t_1-t_2 aralığında değişir. t_b zamanı t_0-t_1 aralığında seçilir. Burada amaç, t_b ile t_1 referans aralığına kıyasla t_1-t_2 arasındaki değişim periyodu içerisinde anormal sismik aktivite değişimlerini hesaplamaktır.
 - t_2-t_3 arasındaki tahmin zamanı tahminin geçerli olduğu aralıktır. Değişim ve tahmin aralıkları aynı uzunlukta olmalıdır.
- iv. Bir zaman periyodu için bir grid içerisindeki deprem yoğunluğu, zaman periyodu boyunca oluşan $M \geq M_c$ olan bir depremin ortalama sayısıdır. Referans periyodu t_b-t_1 üzerindeki j gridinin deprem yoğunluğu $n_j(t_b, t_1)$, t_b-t_1 arasındaki ortalama deprem sayısıdır. t_b-t_2 periyodu üzerindeki j gridinin deprem yoğunluğu $n_j(t_b, t_2)$, t_b-t_2 arasındaki ortalama deprem sayısıdır.
- v. İki farklı zaman periyodundaki deprem yoğunluklarını kıyaslamak için benzer istatistiksel özelliklere sahip olmaları gerekir. Dolayısıyla, deprem yoğunlukları, tüm grid bölgelerini ortalama deprem aktivitesinden çıkarılarak ve tüm grid bölgelerindeki deprem aktivitesinin standart sapmasına bölünerek standart hale getirilir (normalize edilir). Bu standart hale getirilmiş yoğunluklar $n_j^*(t_b, t_1)$ ve $n_j^*(t_b, t_2)$ olarak tanımlanır.
- vi. j gridi içerisindeki anormal depremsellik ölçümü, standart hale getirilmiş iki deprem yoğunluğu arasındaki farktır, $\Delta n_j^*(t_b, t_1, t_2) = n_j^*(t_b, t_2) - n_j^*(t_b, t_1)$.
- vii. Deprem aktivitesindeki rastgele dalgalanmaların göreceli önemini azaltmak için, ortalama değişim $\Delta n_j^*(t_b, t_1, t_2)$, $t_0 - t_1$ arasındaki tüm olası başlangıç zamanları t_b üzerinde hesaplanır ve sonuç $\Delta n_j^*(t_0, t_1, t_2)$ olarak verilir.
- viii. j gridi içerisindeki gelecek depremin olasılığı $P_j(t_0, t_1, t_2)$, ortalama yoğunluk değişiminin karesi olarak tanımlanır, $P_j(t_0, t_1, t_2) = \{\Delta n_j^*(t_0, t_1, t_2)\}^2$.
- ix. Değişim bölgelerini tanımlayabilmek için geçmiş aktiviteye kıyasla $P_j(t_0, t_1, t_2)$ olasılığındaki değişimin hesaplanması gerekir, yani ortalama olasılık tüm grid bölgeleri üzerinden çıkarılır $\langle P_j(t_0, t_1, t_2) \rangle$. Olasılıktaki bu değişim $P_j'(t_0, t_1, t_2) = P_j(t_0, t_1, t_2) - \langle P_j(t_0, t_1, t_2) \rangle$ şeklinde tanımlanır.
- x. Olasılıktaki değişimin göreceli değeri PI-değeridir. Bu değer $P_j'(t_0, t_1, t_2)/P_{\max}$ formunda verilir. Burada P_{\max} , $P_j'(t_0, t_1, t_2)$ 'nin en büyük değeridir. Geçmiş aktiviteye kıyasla deprem aktivitesi veya durgunluğu ile ilgilenildiği için eğer gridler sıfırdan küçük PI-değerine sahipse bu değerler sıfır olarak kabul edilir. Dolayısıyla PI-değeri 0-1 arasında hesaplanır.
- xi. Eğer başlangıç w -değeri için 0-1 aralığı dikkate alınırsa gelecek büyük depremler bu w -değerinden daha büyük PI-değerlerinin olduğu gridlerde beklenir. Başlangıç w -değerinden daha küçük PI-değerine sahip gridler, gelecek büyük deprem oluşumlarının beklenmediği bölgelerdir.
- xii. Sonuçta, PI tahmin çerçevesine göre, büyük olayların daha yüksek deprem aktivitesine veya durgunluğa sahip bölgelerde olması beklenir.

PI uygulamasından elde edilen sonuçlar beklenen depremin olası yerini verir ve PI ile RI değerleri bir tahmin haritası oluşturmak için birleştirilir. Bu tahmin haritası gelecek 5-10 yıllık zaman aralığında olasılık için tekrar standart hale getirilir. Yöntemin uygulaması üç adımda açıklanabilir (Holliday ve diğ. 2007):

- İlk adımda, tüm bölgeler için göreceli bir yoğunluk haritası hazırlanır ve 10^{-1} 'den büyük göreceli değerler 10^{-1} olarak, 10^{-4} 'ten daha küçük sıfır olmayan değerler ise 10^{-4} olarak tanımlanır. Son adımda ise, sıfır deprem geçmişine sahip her bir gride 10^{-5} değeri atanır.
- PI hesabı, çalışma alanının çoğunlukla aktif bölgesinin %10'un üzerinde gerçekleştirilir. Hesaplamalar için t_0 , t_1 , ve t_2 zamanları tanımlanır. Gelecek depremlerin sıcak noktalarda olması beklendiği için bu depremler birim olasılık değeri içerisinde verilir.
- Son adımda, RI haritası üzerinde PI haritası ve onun Moore civarı (piksel + sekiz komşu bölge) üst üste getirilerek birleştirilmiş tahmin haritası elde edilir. Tüm sıcak nokta pikselleri (deprem beklenen bölgeler) 1 olasılığına sahipken diğer tüm pikseller 10^{-1} - 10^{-5} arasında olasılıklara sahiptir.

3. ÇALIŞMA ALANININ TEKTONİK YAPISI ve DEPREM VERİSİ

Doğu Anadolu Bölgesi, Alp-Himalaya orojenik sisteminde oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve güneyde Arabistan plakası ile kuzeydeki Avrasya plakası arasındaki aktif çarpışma zonundan oldukça etkilenir. Bu ana plakaların K-G yönlü basınç tektonik rejimleri ~13 milyon yıl önce başlamıştır ve halen devam etmektedir. Bu gerilme tektoniği, sağ yönlü doğrultu atımlı fay olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve sol yönlü doğrultu atımlı fay olan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) olarak tanımlanan iki büyük transform fay boyunca Anadolu Plakasından saat yönünün tersine ve batıya doğru bir kaçışına neden olur. Bu iki fay zonu Karlıova Üçlü Kesişim (KÜK) noktasında birleşir ve bu basınç rejimi bölgede farklı birçok fay ve fay segmentine neden olur (Şekil 1a). Van Gölü bölgesi KÜK noktasının güneydoğusunda (~125 km) ve Bitlis Zagros Bindirme Zonunun (BZBZ) kuzeyinde (~100 km) bulunur (Bozkurt 2001, Keskin 2003, Reilinger ve diğ. 2006, Alkan ve diğ. 2020). Van Gölü güncel olarak üç derin havzadan (Kuzey, Tatvan ve Deveboynu havzaları) ve taban sırtından (Kuzey ve Ahlat) oluşur ve genel olarak K-G uzanımlı oblik faylar ile karakterize edilir (Cukur ve diğ. 2017). Ayrıca, Türkiye ve civarındaki tektonik yapı genel hatlarıyla Şekil 1a'da verilmiştir. Türkiye ve civarı için diğer tektonik yapılar genel hatlarıyla Batı Anadolu Graben Sistemi (BAGS), Orta Anadolu Fay Zonu (OAFZ), Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ), Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu (KDAFZ) ve Doğu Anadolu Sıkıştırma Zonu (DASZ) olarak verilebilir.

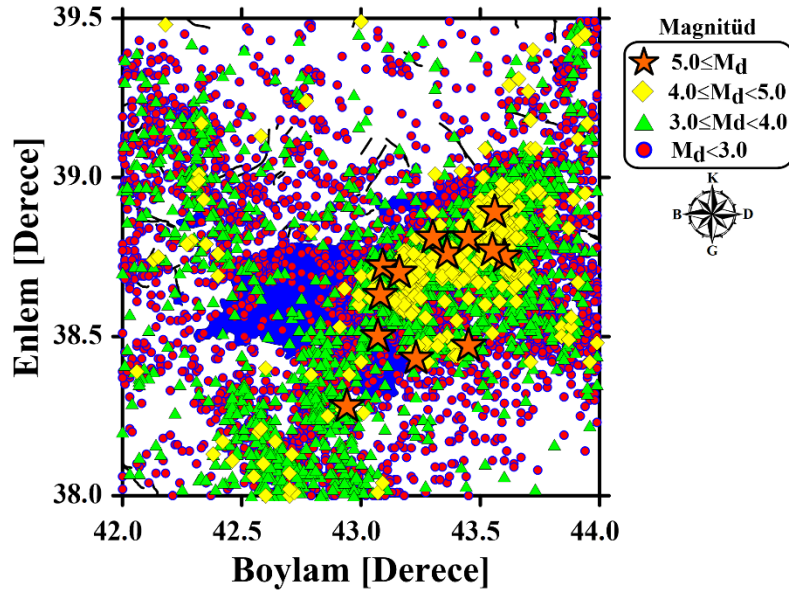


Şekil 1: a) Türkiye ve civarındaki ana tektonik yapılar (Bozkurt 2001 ve Emre ve diğ. 2018'den değiştirilerek alınmıştır.) (Geniş oklar plaka hareket yönlerini göstermektedir. Çalışma alanı kırmızı dikdörtgen içerisinde verilmiştir.), b) Van Gölü ve civarındaki aktif tektonik faylar (Emre ve diğ. 2018'den değiştirilerek alınmıştır.) (Fay isimleri metin içerisinde tanımlanmıştır. Kahverengi daireler yerleşim merkezlerini göstermektedir.)

Figure 1: a) Main tectonic structures in and around Türkiye (modified from Bozkurt 2001; Emre et al. 2018) (Large arrows indicate the direction of plate movements. The study area is given in red rectangular.), b) Active tectonic faults in Lake Van and its adjacent areas (modified from Emre et al. 2018.) (Names of faults are defined in the text. Brown circles show the settlements.)

Van Gölü ve civarındaki aktif faylar ve fay zonları Emre ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada detaylı olarak tanımlanmış olup Şekil 1b'de gösterilmiştir. Çalışma bölgesi ve civarındaki ana tektonik yapılar Erciş Fayı (EF), Çaldıran Fayı (ÇF), Süphan Fayı (SF), Nemrut Fayı (NF), Nazik Gölü Fayı (NGF), Malazgirt Fayı (MF), Yeniköşk Fayı (YF), Saray Fay Zonu (SFZ) ve Van Fay Zonu (VFZ) olarak verilebilir. EF, ÇF, NGF ve SFZ sağ yönlü doğrultu atımlı faylar iken, SF ve MF ana sol yönlü doğrultu atımlı fay karakteristiğine sahiptir. Bununla birlikte, YF ve VFZ D-B uzanımlı ters fay veya bindirme fayı iken, NF ve Tendürek Fayı (TF) gibi genişleme çatlakları normal faylanma mekanizması gösterirler.

Bu çalışma kapsamında kullanılan deprem verisinin 1970-2006 yılları arasındaki kısmı Öztürk (2009)'tan alınmıştır (detaylar için Bayrak ve diğ. 2009). Bu katalog süre magnitudü M_d için homojendir ve 1970-2006 yılları arasında 392 deprem mevcuttur. Bu kataloğa ek olarak 2006-2022 yılları arasındaki deprem verisi KRDAE-BDTİM (2022) web sayfasından derlenmiştir ve bu zaman aralığında 13786 depremi içermektedir. Çalışma alanını kapsayan DAB için sismojenik derinlik 40-45 km arasında tanımlandığı için (Alkan ve diğ. 2020) istatistiksel analizler için sığ depremler (derinlik <70 km) kullanılmıştır. Sonuç olarak, 28 Kasım 1970 ile 31 Aralık 2021 arasında yaklaşık 51.09 yıllık bir zaman diliminde magnitudleri $1.0 \leq M_d \leq 6.6$ arasında değişen 14178 depremi içeren bir katalog oluşturulmuştur. Depremlerin episantır dağılımı Şekil 2'de verilmiştir.

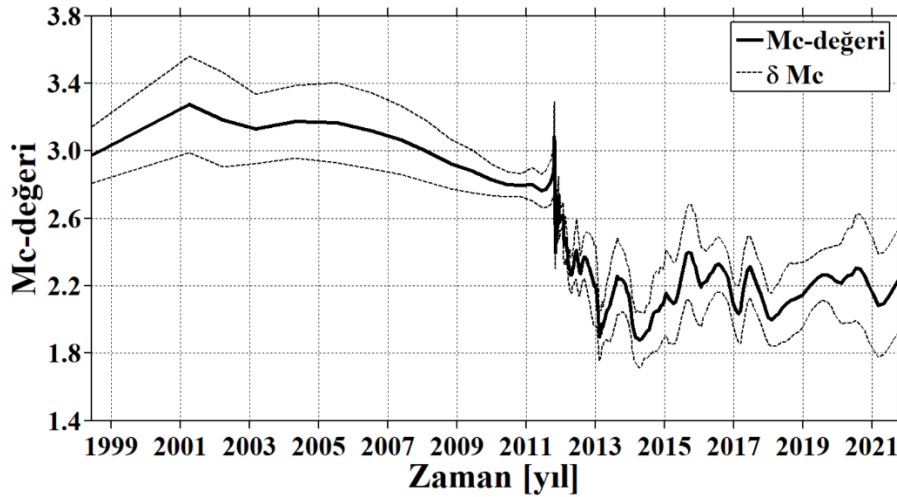


Şekil 2: Van Gölü ve civarı için 1970-2022 yılları arasında $M_d \geq 1.0$ olan 14178 sığ depremin (Öztürk 2009, KRDAE-BDTİM, 2022) episantır dağılımı (Deprem büyüklükleri farklı sembollerle çizilmiştir.)
Figure 2: Epicenter distributions of 14178 shallow earthquakes with $M_d \geq 1.0$ between 1970 and 2022 for Lake Van and its adjacent areas (The earthquake magnitudes are drawn with different symbols.)

4. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında, son yıllarda deprem oluşumları açısından Türkiye'nin en aktif alanlarında biri olan ve çok sayıda orta büyüklükte ve güçlü/yıkıcı depremlerin meydana geldiği Van Gölü ve civarı için deprem tahmini ve tehlikesi üzerine istatistiksel bir analiz ve değerlendirme yapılmıştır. Bu amaçla, G-R ilişkisindeki b -değeri, öncü sismik durgunluk Z -değeri, göreceli yoğunluk, oluşum bilgisi ve birleşik tahmin modeli gibi çoklu parametreler değerlendirilerek 2022 başlangıcı için tehlike analizi ve 2022-2027 yılları arası içinde deprem tahminine yönelik bölge-zaman analizleri gerçekleştirilmiştir.

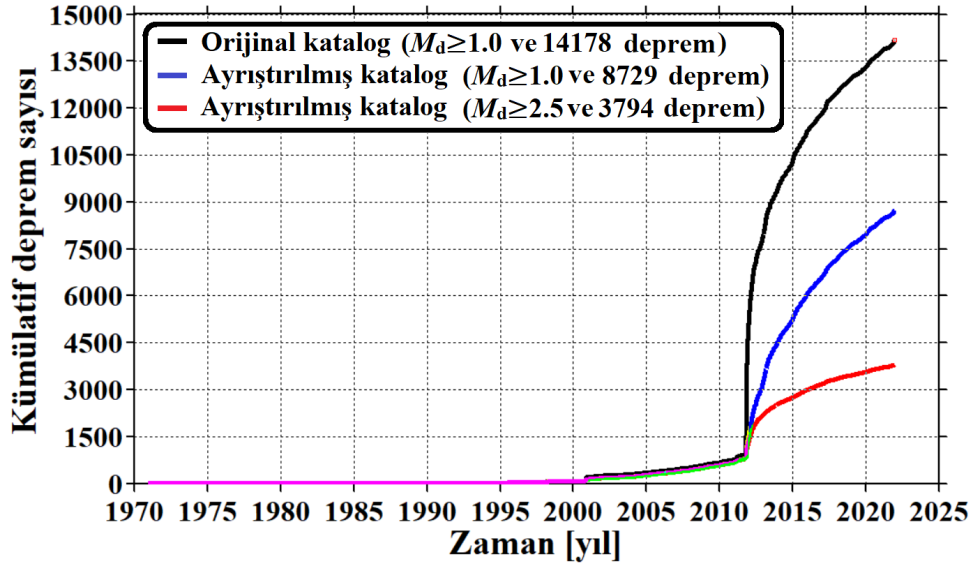
Daha önce ifade edildiği gibi, tamlik magnitüdü M_c -değerinin zamana bağlı değişim analizi istatistiksel çalışmaların ilk aşamasında dikkatli şekilde yapılmalıdır. Bununla birlikte, kaliteli sonuçlar için maksimum deprem sayısının kullanımı oldukça önemlidir. Depremin hemen sonrasında kayıt ağının kurulamayışi aktivitenin yüksek olduğu dönemde küçük depremlerin kayıt edilmesini zorlaştırabilmekte ve dolayısıyla kataloğun ilk dönemlerinde M_c -değeri yüksek olabilmektedir. M_c -değerinin tahmini, magnitüd-deprem sayısı dağılımına ve M_c -değerinin yaklaşık ilk dizisi olarak bu dağılımın ilk türevinin maksimum değer hesabına dayanır (Wiemer ve Wyss 2000). Her bir pencere başına belli sayıda deprem dikkate alınarak bu deprem dizisi için ortalama bir magnitüd değeri hesaplanır ve her bir pencere için hesaplanan bu değer o pencereyi kapsayan zaman aralığı için ortalama M_c -değeri olarak kabul edilir. Dolayısıyla, M_c -değerinin hesabı üst üste binen hareketli pencere tekniği kullanılarak maksimum olasılık yöntemiyle zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Bu çalışmada da hareketli zaman penceresi tekniği kullanılarak ve pencere başına 250 deprem alınarak M_c -değerinin zamanla değişimi analiz edilmiştir. Bu analiz için 14178 depremi içeren orijinal deprem kataloğu kullanılmıştır ve M_c -değerinin zamanla değişimi Şekil 3'te verilmiştir. M_c -değeri 2011 yılına kadar nispeten büyüktür ve 2.8-3.3 arasında iken, 2012'den sonra 2.0-2.5 arasında değişim gösterir. Genel olarak, M_c -değerindeki değişimler zaman içerisinde sabit değildir ve 1970-2022 arasında 1.8-3.3 arasında bir değişim söz konusudur. Sonuçta, bu çalışma b -değeri, Z -değeri RI ve PI istatistiklerini içerdiği için M_c -değeri analizi ilk adım olarak gerçekleştirilmiştir. $M_c=2.5$ değeri uygundur ve bu alanda yapılmış çalışmalarla da uyumludur.



Şekil 3: Çalışma alanı için M_c -değeri ve standart sapmasının (δM_c) zamanla değişimi
Figure 3: Temporal changes of M_c -value and its standard deviation (δM_c) for the study area

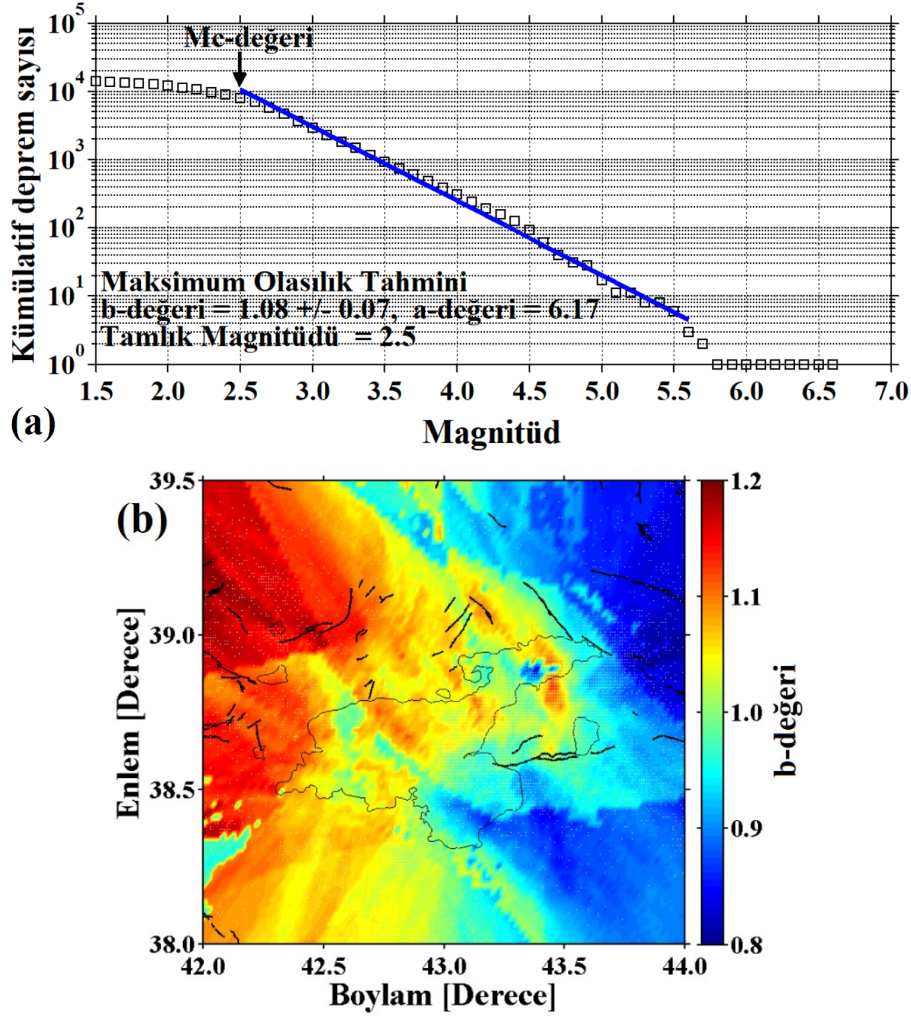
Deprem kataloglarından ikincil olayların (deprem yığılımları, öncü ve artçı şoklar gibi) ayrılması özellikle deprensellik oran değişimlerinin değerlendirilmesinde deprem istatistiğinin en önemli aşamalarından biridir (Mizrahi ve diğ. 2021). Bu işlem bir katalogdaki bağımlı ve bağımsız olayları ayırıştırır ve tüm ana olaylar her bir kümeden uzaklaştırılarak tüm birincil olaylar ayrı bir deprem olarak kayıt edilir (Arabasz ve Hill 1996). Bu çalışmada, deprem kataloğunu ayırştırmak için ZMAP programı içerisinde mevcut olan Reasenber (1985) algoritması kullanılmıştır. Ayırıştırma işleminden sonra depremlerin yaklaşık %38.43'ü (5449 deprem) katalogdan çıkarılmış ve geriye 8729 deprem kalmıştır. Deprem kataloğu için tamlik magnitüdü $M_c=2.5$ alınmıştır. $M_d<2.6$ olan 4934 deprem mevcuttur ve bu depremler katalogdan çıkarılmıştır. Son adımda, ayırıştırma işlemi ve $M_d<2.6$ olan depremlerin uzaklaştırılması birlikte orijinal katalogun yaklaşık %73.24'ü çıkarılmıştır. Sonuç olarak, sismik durgunluk analizi için 3794 depremi içeren bağımsız, homojen ve tekdüze bir katalog elde edilmiştir.

Zamanın bir fonksiyonu olarak kümülatif deprem sayıları, orijinal katalogdaki $M_d \geq 1.0$ olan 14178 deprem için, ayrıştırılmış katalogdaki $M_d \geq 1.0$ olan 8729 deprem için ve ayrıştırılmış katalogdaki $M_d \geq 2.5$ olan 3794 deprem için Şekil 4'te verilmiştir. 1970-2001 yılları arasında önemli bir aktivite gözlenmezken, 2001-2011 yılları arasında sadece birkaç deprem göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, 23 Ekim 2011 Van depreminden sonra deprem sayısında önemli bir artış gözlenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, $M_d \geq 2.5$ olan ayrıştırılmış deprem katalogu orijinal kataloga göre daha düz bir eğime sahiptir. Sonuç olarak, ayrıştırma işleminden ve $M_d < 2.6$ olan depremlerin katalogdan çıkarılmasından sonra istatistiksel bölge-zaman analizleri için çalışmanın amacına daha uygun tekdüze ve bağımsız bir katalog elde edilmiştir.



Şekil 4: Orijinal ve ayrıştırılmış kataloglar için kümülatif deprem sayılarının zamanla değişimleri
Figure 4: Temporal variations of cumulative earthquake numbers for original and declustered catalogs

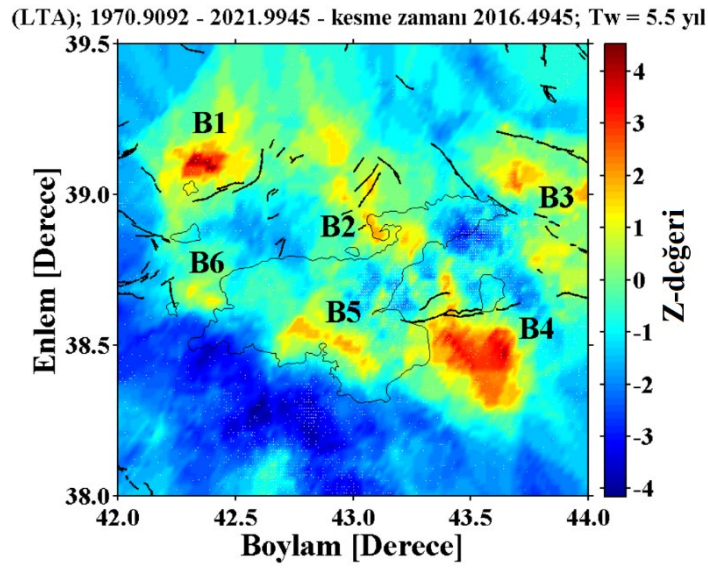
G-R ilişkisindeki b -değeri ve bölgesel değişimi Şekil 5'te verilmiştir. b -değeri maksimum olasılık yöntemi kullanılarak ve $M_c=2.5$ alınarak 1.08 ± 0.07 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5a). Daha önce ifade edildiği gibi, b -değeri çalışma bölgesine bağlı olarak küresel ölçekte 0.3-2.0 arasında değişim göstermektedir. Tektonik depremler için b -değerinin 0.5-1.5 arasında değiştiği ve ortalama b -değerinin 1.0 civarında olduğu ifade edilmiştir (Frohlich ve Davis 1993). Dolayısıyla, Van Gölü ve çevresi için hesaplanan b -değerinin G-R ilişkisi ile iyi uyumlu olduğu söylenebilir. 14178 depremi içeren orijinal katalog kullanılarak hesaplanan b -değerinin bölgesel değişimi Şekil 5b'de verilmiştir. ZMAP yazılımı kullanılarak hareketli pencere tekniği ile pencere başına 850 deprem dikkate alınmış, çalışma alanı enlem ve boylamda $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ lik grid aralıklarına bölünmüştür. b -değeri 0.8-1.2 arasında değişim göstermektedir. Ortalama $b=1.0$ değerinden daha büyük değişimler (>1.0) Van Gölü'nün Patnos, Malazgirt, Bulanık, Tatvan, Adilcevaz, Gevaş ve Erciş'i içine alan kuzey, kuzeybatı, güney ve güneybatı kısımlarında hesaplanmıştır ve bu kısımlar SF, MF, NGF ve NF'yi kapsamaktadır. Bununla birlikte, daha düşük b -değerleri (<1.0) genellikle TF, EF, YF, VFZ ve SFZ boyunca Çaldıran, Muradiye, Özalp, Erçek ve Van şehir merkezini içine alan Van Gölü'nün kuzey, kuzeydoğu, doğu ve güneydoğu kısımlarında gözlenmiştir (Şekil 5b). Büyük b -değerine sahip alanlar genel olarak küçük magnitudlü deprem oluşumlarına sahipken, küçük b -değerli alanlar genellikle büyük magnitudlü depremlerin (Şekil 2) meydana geldiği bölgelerdir. Sonuç olarak, G-R ilişkisindeki b -değeri sismotektonik yapıyla oldukça uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur.



Şekil 5: a) Çalışma alanı için magnitüd-deprem sayısı grafiği ve G-R ilişkisindeki b-değeri (*b*-değeri, standart sapması, *a*-değeri ve *Mc*-değeri şekil üzerinde verilmiştir.), b) Bölgesel *b*-değeri haritası
Figure 5: a) Magnitude-frequency graphic and *b*-value in G-R relation for the study area (*b*-value, its standard deviation, *a*-value and *Mc*-value are given in the figure.), b) Regional *b*-value map

Çalışma alanındaki depremsellik oranını ortaya koyan öncü sismik durgunluğu hesaplayabilmek için *b*-değeri hesabında olduğu gibi, çalışma alanı $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ lik grid aralıklarına bölünmüştür. Sonra, hareketli bir zaman penceresi T_w kullanılarak maksimum yarıçaplı bir bölge içerisinde tanımlanan örnekleme aralığı ile deprem aktivitesindeki oran değişimleri belirlenmiştir (Wiemer ve Wyss 1994). Zaman içerisinde sürekliliği ve daha yoğun bir aktiviteyi elde edebilmek için her bir grid aralığındaki deprem oluşumları genellikle bir aylık zaman dilimleri olarak gruplandırılır. T_w değeri genellikle durgunluk sinyalinin belirginleşirmeye bağlı olarak seçilir ve T_w 'nin seçimi sonuçları hiçbir şekilde etkilemez. Güvenilir sonuçlar için, sonuçların T_w değerinden bağımsız olması beklenir. Durgunluğun ne zaman sona ereceği bilinmediği için zaman penceresi 1.5-5.5 yıl arasında değiştirilir. Çünkü bu değer, dünyanın farklı bölgeleri için kabuksal ana şoklardan önce rapor edilen sismik durgunluk oranı ile uyumludur. Van Gölü ve civarı için Z-değeri haritası oluşturulurken, zaman penceresi 1.5-5.5 yıl seçilerek değerlendirmeler yapılmış ancak durgunluğun bölgesel olarak en iyi görüntüsünü veren zaman penceresi değeri kullanılarak durgunluk haritası oluşturulmuştur. Sonuçta, Z-değerinin hesabı için en iyi görüntüyü vermesi açısından zaman penceresinin uzunluğu $T_w=5.5$ yıl olarak alınmış ve $M_d \geq 2.5$ olan 3794 depremi içeren ayrıştırılmış katalog kullanılmıştır, çünkü sismik durgunluk bölgeleri bu zaman penceresi için daha net gözlenmiştir. 2022 başlangıcı için güncel Z-değeri haritası Şekil 6'da verilmiştir ve sismik durgunluk alanları (kırmızı bölgeler): (i) $39.10^\circ\text{K}-42.36^\circ\text{D}$ (bölge B1, Malazgirt Fayı'nı içeren Malazgirt-Bulanık

arası, (ii) 38.97°K-43.08°D (bölge B2, Süphan Fayı'nı içeren Patnos ve Erciş arası, (iii) 38.94°K-43.84°D (bölge B3, Çaldıran Fayı ve Saray Fay Zonu'nu içeren Muradiye, Çaldıran ve Özalp arası, (iv) 38.48°K-43.52°D (bölge B4, Yeniköşk Fayı ve Van Fay Zonu'nu içeren Van ve Erçek arası, (v) 38.54°K-42.91°D (bölge B5, Van Gölü'nün kuzey kısmında Gevaş'ın kuzeybatısı ve (vi) 38.68°K-42.36°D (bölge B6, Nemrut Fayı'nı içeren Tatvan'ın kuzeyi) merkezli olarak belirlenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi Z-değeri yaklaşık olarak -4 ile 4 arasında değişim göstermektedir ve bu değişim sismik durgunluğun büyüklüğü (kırmızı bölgeler) ve olağan (background) deprem aktivitesinin seviyesi (mavi bölgeler) ile orantılıdır. Sonuç olarak, bu durgunluk alanları önemli olabilir ve Z-değeri analizleri farklı istatistiksel parametrelerle birlikte yapılacak değerlendirmelerle deprem tahminindeki öncülerin güvenilirliğini artırabilir.

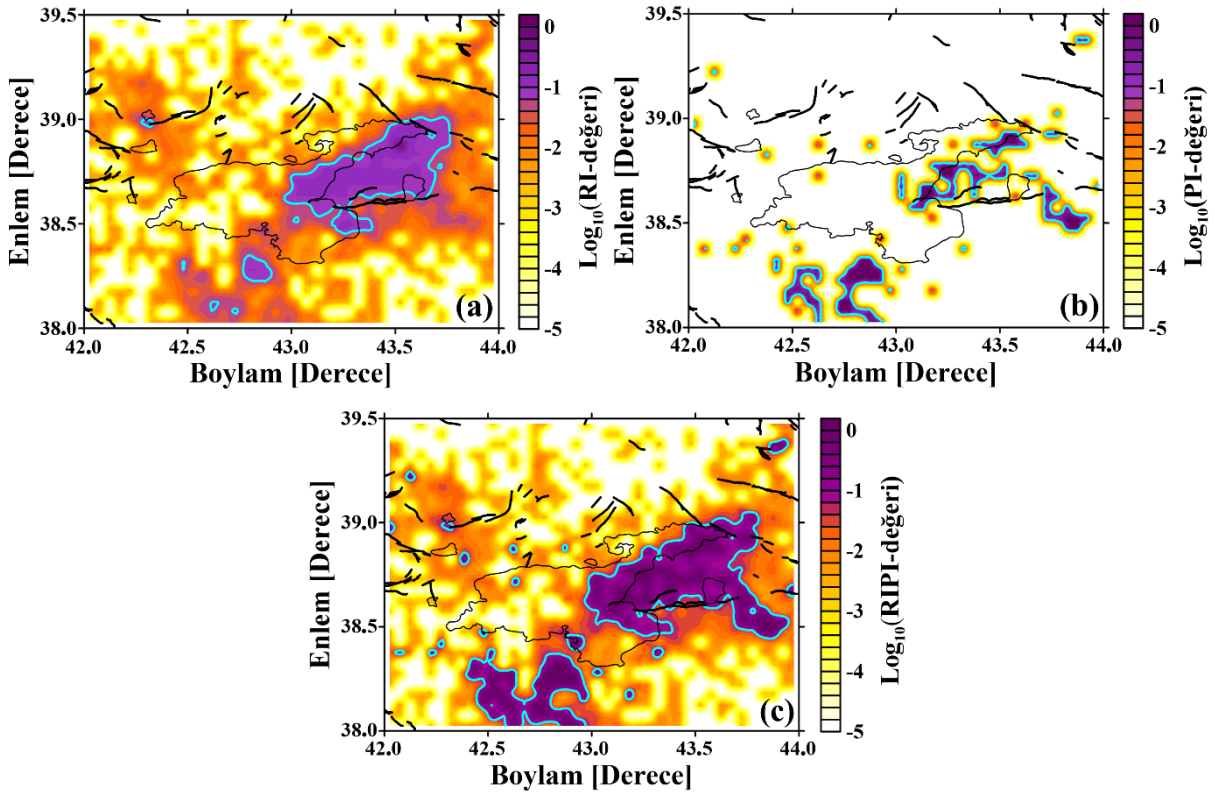


Şekil 6: 2022 başlangıcında Van Gölü ve civarı için güncel Z-değeri ve sismik durgunluk (Analiz için $M_d \geq 2.5$ olan ayrıştırılmış deprem kataloğu kullanılmıştır.)

Figure 6: Current Z-value and seismic quiescence for Lake Van and its adjacent area at the beginning of 2022 (Declassified earthquake catalog with $M_d \geq 2.5$ is used for the analysis.)

Van Gölü ve civarı için RI, PI ve birleştirilmiş tahmin haritaları Şekil 7'de verilmiştir. b -değeri ve Z-değerinde olduğu gibi çalışma alanı $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ lik grid aralıklarına ($\Delta x = 0.02^\circ$) bölünmüş ve M_c -değeri 2.5 olarak alınmıştır. Ardından, tahmin periyodu süresince bölgede oluşan büyük depremler $M_d \geq 5.0$ olan olayların sayısı ile gelecek 5 yıllık periyod için tanımlanmıştır. Son adımda, t_s , t_E , t_0 , t_1 , t_2 , t_3 zamanları ve zaman aralıkları tanımlanmıştır. Değişim aralığı 1 Ocak 2017 ile 1 Ocak 2022 arasında, tahmin aralığı ise 1 Ocak 2022 ile 1 Ocak 2027 arasında seçilmiştir. Dolayısıyla, $t_3 = 1$ Ocak 2027, $t_E = t_2 = 1$ Ocak 2022, $t_1 = 1$ Ocak 2017, ve $t_s = t_0 = 28$ Kasım 1970 (başlangıç zamanı $t_0 = 1970$, değişim periyodu aralığı 2017-2022 ve tahmin periyodu aralığı 2022-2027) olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalar değişim aralığı ile tahmin aralığının eşit olması gerektiğini ortaya koymaktadır (Tiampo ve diğ. 2002, Holliday ve diğ. 2006). Bu giriş parametreleri kullanılarak Van Gölü ve civarı için güçlü depremlerin bölgesel ve zamansal tahminleri orta vadede ($t_3 - t_2 = 5$ yıl, Ocak 2022 ile Ocak 2027 arası) gerçekleştirilmiştir. Birleştirilmiş tahmin haritası, RI (Şekil 7a) ve PI (Şekil 7b) haritalarının birleştirilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 7c). b -değeri hesabında olduğu gibi orijinal katalog kullanılmıştır (Nanjo 2006b). Şekil 7'den görüldüğü gibi, deprem tahmin bölgeleri PI ve RI haritalarının birleştirilmesi ile daha net olarak ortaya konulmuştur. Bu yöntemler çerçevesinde büyük depremler, daha yüksek deprem aktivitesi veya durgunluk olan bölgelerde beklenir. Gelecekte deprem olması beklenen bölgeler (sıcak noktalar) için 0-5 birim arasında değişen

değerler tanımlanmıştır. Negatif değerlerden pozitif değerlere çıktıkça deprem beklenen bölgeler bir olasılığına sahiptir ve negatif değerli bölgeler ise gelecekte deprem beklenmeyecek bölgeler olarak verilir. Gelecekteki depremlerin sıcak noktalarda olması beklendiği için bu depremler birim olasılık değeri içerisinde verilir. Şekil 2'deki episantr haritasından görüleceği üzere, yüksek aktiviteli bölgeler ile magnitüdü 5.0'dan daha büyük güçlü depremlerin olduğu bölgeler RI, PI ve birleştirilmiş tahmin haritası üzerinde gelecek 5 yıl içerisinde deprem beklenilecek bölgelerle uyumludur. Şekil 7c'de görüldüğü gibi, 2022-2027 yılları arasında $M_d \geq 5.0$ olan deprem oluşumları için bazı tahmini sıcak noktalar (sıfır değerli bölgeler) tespit edilmiştir. Bu alanlar, Gevaş ve civarını içeren Van Gölü'nün güneyi, Bulanık ve civarı, YF, VFZ ve SFZ civarında Muradiye-Çaldıran-Van-Erçek arasında EF'nin bazı kısımlarını içeren Van Gölü'nün doğusu olarak verilebilir. Sonuç olarak, bu alternatif yöntemler gelecekte olması muhtemel depremlerin yeri ve zamanını tahmin etmeyi amaçlar ve orta vadede deprem tahmini sunar.



Şekil 7: 2022-2027 yılları arasındaki gelecek 5 yıl için; a) Göreceli yoğunluk yöntemi ile tahmin haritası, b) Oluşum bilgisi yöntemi ile tahmin haritası, c) Birleştirilmiş yöntem ile tahmin haritası (PI-değeri, RI-değeri ve RIPI-değeri logaritmik ölçekte verilmiştir.)

Figure 7: For the future 5-years between 2022 and 2027; a) Forecast map with relative intensity method, b) Forecast map with pattern informatics method, c) Forecast map with the composite method (PI-score, RI-score and RIPI-score are given on a logarithmic scale.)

b -değeri ve Z -değeri ile birleştirilmiş RI ve PI haritalarından görüleceği üzere, düşük b -değeri, yüksek Z -değeri ve tahmin haritası üzerindeki bazı sıcak noktaların aynı bölgelerde tahmin edildiği görülebilir. Örneğin, düşük b -değeri ve yüksek Z -değeri ÇF ve SFZ'yi içeren Muradiye-Çaldıran-Özalp arasında (Z -değeri haritasında B3 bölgesi), Van ve Erçek arasında YF ve VFZ civarında (B4 bölgesi), Gevaş'ın güneybatısı ve Van Gölü'nün güney kısmında (B5 bölgesi) gözlenmiştir. Düşük b -değerleri ve tahmini sıcak noktalar EF, YF, VFZ ve SFZ'yi içeren Muradiye-Van-Erçek-Özalp-Çaldıran arasında tahmin edilmiştir. Ayrıca, yüksek Z -değerleri ile tahmini sıcak noktalar, MF'yi içeren Malazgirt ve Bulanık arasında (B1 bölgesi), SFZ ve ÇF'yi içeren Muradiye-Çaldıran ve Özalp arasında (B3 bölgesi), YF ve VFZ'yi içeren Van ve Erçek

arasında (B4 bölgesi) ve Gevaş'ın kuzeybatı kısmında Van Gölü'nün güneyinde (B5 bölgesi) hesaplanmıştır. Daha öncede ifade edildiği gibi, düşük b -değerli bölgelerin yüksek gerilme alanları ile ilişkili olduğu, ayrıca düşük b -değeri ile yüksek Z -değerine (depremlerin oluşumundan birkaç yıl öncesinde ana şok episantrı civarında deprem aktivitesinde azalmanın yüksek olduğu bölgeler) sahip alanların gelecekteki güçlü/büyük deprem oluşumları için en olası bölgeler olduğu düşünülebilir. Bununla birlikte, geçmişteki depremlerin bölge-zaman oluşumlarının analizi ile elde edilen tahmin haritası 2022-2027 yılları arasında olabilecek $M_d \geq 5.0$ olan depremlerin olası konumlarını işaret edebilir. Sonuç olarak, tüm bu parametrelerden elde edilen anomali bölgeleri genellikle aynı alanlarda gözlenmiştir ve dolayısıyla bu bölgeler deprem tehlikesi açısından dikkate alınmalıdır.

5. TARTIŞMA

Van Gölü ve civarındaki deprem oluşumları için farklı sismolojik ve jeofiziksel parametreleri kullanarak yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu amaçla, bazı araştırmacılar sismik, tektonik, yapısal veya gerilme parametreleri kullanarak detaylı değerlendirmeler yapmışlardır ve önemli sonuçlar ortaya koymuşlardır (Selcuk ve diğ. 2010, Irmak ve diğ. 2012, Ozturk 2018, Tokar ve diğ. 2021). Bu çalışmalar, Van Gölü ve civarının yakın gelecekte güçlü veya yıkıcı bir depremin oluşumu ile ilişkili olarak yüksek seviyede deprem tehlikesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nin bu kısmı için farklı içerikte birçok çalışma olmasına rağmen, deprem tahminlerini içeren bu tür istatistiksel depremsellik analizleri nispeten azdır. Dolayısıyla, çalışma kapsamında Van Gölü ve civarı için deprem potansiyelini araştırmak ve deprem tahmini yapabilmek için detaylı bir bölge-zaman analizi gerçekleştirilmiştir.

Secuk ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada, Van Gölü havzası için 1907-2010 yılları arasındaki bölgesel deprem verisi kullanılarak olasılıksal yaklaşım ile deprem tehlike değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada, $M_s \geq 4.0$ olan depremlerin geri dönüşüm periyotları Gutenberg-Richter parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, 100 ve 475 yıllık tekrarlama aralıkları için havzanın izo-korelasyon haritaları üretilmiştir. Elde edilen tehlike haritalarında tahmin edilen en büyük deprem tehlike seviyesi Van Gölü'nün kuzeydoğu, kuzeybatı ve güneybatı kısımlarında (0.25 g civarında PGA değeri) ve Göl ile kıyılarında (0.10-0.20 g arasında PGA değeri) gözlenmiştir. Buna bağlı olarak, Van Gölü havzasının birinci dereceden deprem bölgesi olması için öneride bulunulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında elde edilen sismotektonik deprem parametreleri arasındaki ilişkiler ve bulgular Selcuk ve diğ. (2010) tarafından elde edilen sonuçlarla oldukça uyumludur ve bu sonuçlar çalışma alanında orta/uzun vadede önemli bir deprem tehlikesinin varlığına işaret etmektedir.

Irmak ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, 23 Ekim 2011 Van depreminin ($M_w=7.1$) kırılma süreci ve artçı şokları tektonik açıdan analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, Van Gölü havzasının aktif tektonik yapısını ortaya koyabilmek için, fay düzlem çözümleri ile ilişkili sonuçlarını yüzey kırık geometrisi ile karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, Van depreminin DASZ'de Van ve Erçek arasında kuzeydoğu-güneybatı eğilimli ters bir ana fay düzlemi üzerinde meydana geldiğini göstermektedir. Toplam atım dağılımı üzerindeki analiz sonuçlarına göre, fay düzleminin hiposantır bölgesi üzerinde büyük bir atıma sahip geniş bir asperite bölgesinin varlığına işaret edilmiş ve özellikle güneybatı yönlü olmak üzere kuzeydoğu yönünde iki taraflı yayılan ve hiposantır civarında kademeli olarak genişleyen oldukça düz bir kırık ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile Irmak ve diğ. (2012) tarafından ortaya konulan sonuçlar birbirleri ile tutarlıdır ve bu çalışmaların birlikte değerlendirilmesi orta/uzun vadede deprem tehlike değerlendirmeleri için faydalı sonuçlar ortaya koyabilir.

Ozturk (2018), G-R ilişkisindeki b -değeri, fraktal boyut D_c -değeri, standart normal sapma Z -değeri ve bu parametreler arasındaki ilişkileri dikkate alarak, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi için deprem aktivitesinin bölge-zaman analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında, daha yüksek Z -değeri ve daha düşük b -değerine sahip alanların gelecek deprem oluşumları

için en olası bölgeler olabileceği ifade edilmiştir. Bu kapsamda Ozturk (2018), bu tür sismotektonik değişkenler arasındaki ilişkilerin deprem tehlike potansiyelinin ortaya konulmasında önemli ipuçları verebileceğini ve buna bağlı olarak deprem oluşumları için yapılacak bu tür tanımlamaların deprem tahminlerinde önemli bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Mevcut çalışmada, Tartışma kısmında ifade edildiği gibi aynı alanda gözlenen küçük *b*-değeri, büyük *Z*-değeri ve sıcak noktalar mevcuttur ve sonuçta EF, YF, VFZ ve SFZ'yi içeren Van, Muradiye, Çaldıran, Özalp ve Gevaş gibi anomali bölgelerine dikkat edilmelidir.

Toker ve diğ. (2021) telesismik dalga formlarını kullanarak 23 Ekim 2011 Van depreminin tetiklediği fay dışı doğrultu atımlı hareketler için birleştirilmiş bir yaklaşım sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada, kabuk ve kabuk altı yapılarda gerilme dağılımlarındaki yanal değişimlerinin yerel bir kaynağının bölgesel gerilme alanlarını belirgin olarak etkilediği ifade edilmiştir. Belirgin bir şekilde tetiklenen atım depremi olarak doğrultu atımlı hareketin çalışma alanı altındaki mantonun yokluğunda kabuk altındaki sünek süreçlerle oluşturulduğu veya aktivite edilmiş olabileceği hipotezi ortaya konulmuştur. Elde ettikleri bulgulara göre, fay dışı artçı şoklarla ilişkili analizler, 2011 Van depremi kabuk altı deformasyon üzerindeki gerilme alan sınırlamaları hakkında yeni detaylar ortaya koymuştur. Bu değerlendirmenin ayrıca, Van Gölü ve Erçek Gölü altında tüm kabuk nedeniyle uzanım gösteren ve fay alanı dışında yeni bir transfer fay ile gerilme etkileşiminin rolü hakkında önemli bilgiler sağladığı ifade edilmiştir. Sonuçta, gerilme alan sınırlamaları üzerine yapılan değerlendirilmelerin, yeni bir sismojenik fay aktivite mekanizmasını tanımlamada ve deprem tehlikesini tahmin edebilmede gerilme transferinin neden olduğu fay dışı bir deprenselliğin tespitine imkân sağlayabileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, bu tür çalışmalar mevcut çalışmada olduğu gibi farklı istatistiksel deprem parametreleri ile desteklenmeli ve çalışma alanı için orta/uzun vadede deprem tehlike potansiyeli için çok parametrelili birleşik bir değerlendirme dikkate alınmalıdır.

Mevcut literatür çalışmaları ve bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular dikkate alındığında, *G-R* ilişkisindeki *b*-değeri, standart normal sapma *Z*-değeri, *RI* ve *PI* yöntemlerinden elde edilen sıcak noktalar gibi sismotektonik parametrelerin birleştirilmiş bir değerlendirmesi Van Gölü ve civarındaki deprem tehlike değerlendirmesi ve tahmini için birincil ve daha güvenilir kanıtlar sağlamıştır. Van Gölü ve civarı geçmişte güçlü/yıkıcı depremlere maruz kalmıştır ve son yıllarda bu bölgede çok sayıda orta büyüklükte deprem meydana gelmiştir. Dolayısıyla, bu bölgede gelecek deprem oluşumları için yapılacak çalışmalar oldukça önemlidir ve bu tür değerlendirmeler farklı jeofiziksel parametrelerin izlenmesine veya analizine dayalı olarak yapılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan güncel veri ve parametreler dikkate alındığında, düşük *b*-değeri ve yüksek *Z*-değerli bölgeler ile birleşik tahmin haritasından elde edilen sıcak nokta bölgelerinin literatür çalışmalarında kullanılan diğer jeofiziksel parametrelerle desteklendiği görülmektedir. Sonuç olarak, anomali gözlenen bu bölgelere özel bir önemiyet verilmelidir çünkü farklı sismotektonik parametreler arasındaki bölge-zaman ilişkileri, Van Gölü ve civarındaki orta vadede güçlü/yıkıcı deprem tahminlerine ve deprem tehlikesi değerlendirmelerine derinlik katabilir.

6. SONUÇLAR

Van Gölü ve civarı (Türkiye) için güçlü/büyük depremlerin güvenilir tahmini ve güncel tehlike analizleri sismotektonik *b*-değeri, öncü sismik durgunluk *Z*-değeri, *RI*, *PI* ve birleştirilmiş *RIPI* yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 38.0°K-39.5°K enlemleri ile 42.0°D-44.0°D boylamları arasındaki 14178 sığ (derinlik < 70 km) depremi içeren ve 28 Kasım 1970 ile 31 Aralık 2021 yılları arasında magnitüdüleri $1.0 \leq M_d \leq 6.6$ arasında değişen deprem kataloğu kullanılmıştır. Bu çalışmanın en önemli noktası, başta *RI* ve *PI* yöntemleri olmak üzere diğer tekniklerin Türkiye'nin bu kısmında beklenen için güçlü/büyük depremlerin tahmini için ilk kez bir arada analiz edilmiş ve değerlendirilmiş olmasıdır.

Daha düşük *b*-değeri, daha yüksek *Z*-değeri ve birleştirilmiş tahmin haritasından elde edilen sıcak nokta bölgeleri, Çaldıran, Yeniköşk, Erciş ve Malazgirt fayları ile Saray ve Van Fay

Zonlarını içerisinde alan Muradiye, Çaldıran, Özalp, Erçek, Van şehir merkezi ve Gevaş'ı kapsamaktadır. Düşük b -değerinin gerilmedeki artışla olan ilişkisi ve yüksek Z -değerinin de depremlerin oluşumundan birkaç yıl önce ana şok episantırı civarında deprem aktivitesindeki azalışla olan ilişkileri dikkate alındığında, anomali veren bölgelerin gelecek deprem oluşumları için en olası alanlar olabileceği yorumu yapılabilir. Ayrıca, 2022-2027 yılları arasında 5 yıllık bir zaman dilimi içerisindeki $M_w \geq 5.0$ olan gelecek deprem oluşumları için yapılan tahminler diğer sismotektonik parametrelerden elde edilen sonuçlarla ve anomali bölgeleriyle oldukça uyumludur. Dolayısıyla, analiz edilen tüm parametrelere ait anomali bölgeleri genel olarak aynı alanlarda tahmin edilmiştir ve bu bölgelerdeki tehlike yüksektir. Bu değişkenler arasındaki ilişki Van Gölü ve civarındaki tektonik, sismik ve yapısal özelliklerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Literatür çalışmalarına ve elde edilen bulgulara bağlı olarak, gelecekte beklenebilecek depremlerin yerini ve zamanının tahmin edebilmek için çoklu parametre analizinin bir kombinasyonu daha umut verici bir strateji olacaktır. Sonuç olarak bu çalışma, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki orta-uzun vadede deprem tahmini ve tehlike analizleri için teşvik edici sonuçlar ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR

ZMAP yazılımını sağlayan Prof. Dr. Stefan Wiemer'e, RI ve PI modellemesinde katkıda bulunan Dr. Kazuyoshi Z. Nanjo'ya, yapıcı tavsiyelerde bulunan hakemlere ve Editöre teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Alkan H., Cinar H., Oreshin S., 2020. Lake Van (southeastern Turkey) experiment: Receiver function analyses of lithospheric structure from teleseismic observations, *Pure and Applied Geophysics* 177, 3891-3909.

Arabasz W.J., Hill S.J., 1996. Applying Reasenberg's cluster analysis algorithm to regional earthquake catalogs outside California (abstract), *Seismological Research Letters* 67(2), 30.

Bayrak E., Ozer C., Cakici H., Kocadagistan M.E., 2021. January 24, 2020 Sivrice (Turkey) earthquake (Mw6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Engineering Seismology Studies, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 3(2), 125-148, <https://doi.org/10.46464/tdad.1003057>

Bayrak Y., Ozturk S., Cinar H., Kalafat D., Tsapanos T.M., Koravos G.Ch., Leventakis G.A., 2009. Estimating earthquake hazard parameters from instrumental data for different regions in and around Turkey, *Engineering Geology* 10, 200-210.

Biro Y., Siyahi B., Akbas B., 2020. The Spectral Decay Parameter κ (kappa) for the Near Site Events in Van Region, *Turk Deprem Arastirma Dergisi* 2(1), 1-13, <https://doi.org/10.46464/tdad.727847>

Bozkurt E., 2001. Neotectonics of Turkey-a synthesis, *Geodinamica Acta* 14, 3-30.

Console R., Montuori C., Murru M., 2000. Statistical assessment of seismicity patterns in Italy: Are they precursors of subsequent events?, *Journal of Seismology* 4, 435-449.

Cukur D., Krastel S., Tomonaga Y., Schmincke H.U., Sumita M., Meydan A.F., Cagatay M.N., Toker M., Kim S.P., Kong G.S., Horozal S., 2017. Structural characteristics of the Lake Van Basin, eastern Turkey, from high-resolution seismic reflection profiles and multibeam echosounder data: geologic and tectonic implications, *International Journal of Earth Sciences* 106, 239-253.

Derode B., Madariaga R., Campos J., 2021. Seismic rate variations prior to the 2010 Maule, Chile Mw 8.8 giant megathrust earthquake, *Nature* 11, 2705.

Emre O., Duman T.Y., Ozalp S., Saroglu F., Olgun S., Elmaci H., Can T., 2018. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, 3229-3275.

Enescu B., Ito K., 2002. Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake, *Earth Planets and Space* 54, 847-859.

Frohlich C., Davis S., 1993. Teleseismic *b*-values: Or, much ado about 1.0, *Journal of Geophysical Research* 98(B1), 631-644.

Gutenberg R., Richter C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America* 34, 185-188.

Holliday J.R., Nanjo K.Z., Tiampo K.F., Rundle J.B., Turcotte D.L., 2005. Earthquake forecasting and its verification, *Nonlinear Process in Geophysics* 12, 965-977.

Holliday J.R., Rundle J.B., Tiampo K.F., Turcotte D.L., 2006. Using earthquake intensities to forecast earthquake occurrence time, *Nonlinear Process in Geophysics* 13, 585-593.

Holliday J.R., Chen C-C., Tiampo K.F., Rundle J.B., Turcotte D.L., Donnellan A., 2007. A RELM earthquake forecast based on Pattern Informatics, *Seismological Research Letters* 78(1), 87-93.

Irmak T.S., Dogan B., Karakas A., 2012. Source mechanism of the 23 October 2011, Van (Turkey) earthquake (Mw=7.1) and aftershocks with its tectonic implications, *Earth Planets Space* 64, 991-1003.

Keilis-Borok V.I., 1996. Intermediate term earthquake prediction, *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 93, 3748-3755.

Keskin M., 2003. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction–accretion complex: an alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey, *Geophysics Research Letters* 30(24), 8046.

KRDAE-BDTİM, 2022. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi Deprem Kataloğu, Erişim adresi: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb>

Mizrahi L., Nandan S., Wiemer S., 2021. The effect of declustering on the size distribution of mainshocks. *Seismological Research Letters* 92(4), 2333-2342.

Nanjo K.Z., Rundle J.B., Holliday J.R., Turcotte D.L., 2006a. Pattern Informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan, *Pure and Applied Geophysics* 163, 2417-2432.

Nanjo K.Z., Holliday J.R., Chen C.-C., Rundle J.B., Turcotte D.L., 2006b. Application of modified pattern informatics method to forecasting the locations of future large earthquakes in the central Japan, *Tectonophysics* 424, 351-366.

Ozturk S., 2011. Characteristics of seismic activity in the western, central and eastern parts of the North Anatolian Fault Zone, Turkey: temporal and spatial analysis, *Acta Geophysica* 59, 209-238.

Ozturk S., 2018. Earthquake hazard potential in the Eastern Anatolian region of Turkey: seismotectonic b and D_c -values and precursory quiescence Z -value. *Frontiers of Earth Sciences* 12(1), 215-236.

Ozturk S., 2020. A study on the variations of recent seismicity in and around the Central Anatolian region of Turkey, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 301 (106453), 1-11.

Ozer C., Ozturk S., Pamuk E., 2022. Tectonic and structural characteristics of Erzurum and its surroundings (Eastern Turkey): a detailed comparison between different geophysical parameters, *Turkish Journal of Earth Sciences* 31(1), 85-108.

Öztürk S., 2009. An application of the earthquake hazard and aftershock probability evaluation methods to Turkey earthquakes. PhD Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey (in Turkish with English abstract), pp 346.

Polat O., Gok E., Yılmaz D., 2008. Earthquake hazard of the Aegean extension region (West Turkey), *Turkish Journal of Earth Sciences* 17, 593-614.

Reasenberg P.A., 1985. Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982, *Journal of Geophysical Research* 90(B7), 5479-5495.

Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *Journal of Geophysical Research* 111, B05411.

Rundle J.B., Tiampo K.F., Klein W., Martins J.S.S., 2002. Self-organization in leaky threshold systems: The influence of near-mean field Dynamics and its implications for earthquakes, neurobiology and forecasting, *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (Supplement 1), 2514-2521.

Scholz C.H., 2015. On the stress dependence of the earthquake b value, *Geophysical Research Letters* 42, 1399-1402.

Selcuk L., Selcuk A.S., Beyaz T., 2010. Probabilistic seismic hazard assessment for Lake Van basin, Turkey, *Natural Hazards* 54, 949-965.

Tiampo K.F., Rundle J.B., McGinnis S.A., Klein W., 2002. Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions, *Pure and Applied Geophysics* 159, 2429-2467.

Toker M., Pinar A., Hoskan N., 2021. An integrated critical approach to off-fault strike-slip motion triggered by the 2011 Van mainshock (Mw 7.1), Eastern Anatolia (Turkey): New stress field constraints on subcrustal deformation, *Journal of Geodynamics* 147 (101861), 1-25.

Utkucu M., Durmus H., Yalcin H., Budakoglu E., Isik E., 2013. Coulomb static stress changes before and after the 23 October 2011 Van, Eastern Turkey, earthquake (Mw=7.1): implications for the earthquake hazard mitigation, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 1-14.

Utsu T., 1971. Aftershock and earthquake statistic (III): Analyses of the distribution of earthquakes in magnitude, time and space with special consideration to clustering characteristics of earthquake occurrence (1), *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University Series VII (Geophysics)* 3, 379-441.

Varotsos P., Alexopoulos K., 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. II. determination of epicenter and magnitude, *Tectonophysics* 110, 99-125.

Wiemer S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP, *Seismological Research Letters* 72(2), 373-382.

Wiemer S., Wyss M., 1994. Seismic quiescence before the Landers (M=7.5) and Big Bear (6.5) 1992 earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(3), 900-916.

Wiemer S., Wyss M., 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America* 90(3), 859-869.

Wyss M., Habermann R.E., 1988. Precursory seismic quiescence, *Pure and Applied Geophysics* 126(2-4), 319-332.

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Çalışma kapsamında kullanılan deprem kataloğunun 1970-2006 yılları arasındaki kısmı Öztürk (2009)'dan alınmış (detaylar için Bayrak ve diğ. 2009), 2006-2022 yılları arasındaki kısmı ise KRDAE-BDTİM (2022)'den derlenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında yer alan bilgiler; herhangi bir kişiye, kuruma, ekipmana çıkar sağlamayı veya kişisel/kurumsal menfaat kazandırmayı amaçlamamaktadır. Aynı şekilde çalışmada yer alan hususlar objektif değerlendirme sınırları dışına çıkarak herhangi bir şekilde kişi, kurum, kuruluş nezdinde zarara, kastı aşan kötü niyetli yoruma ya da itibar kaybına yol açmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): S.Ö., H.A.
- Literatür araştırması (*Literature research*): S.Ö., H.A.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): S.Ö., H.A.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): S.Ö., H.A.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): S.Ö., H.A.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): S.Ö., H.A.

Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): S.Ö., H.A.



A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation

Gizem Sahin ¹, Onur Toygar ² and Mehmet Rifat Kahyaoglu ²

¹ Mugla Sitki Kocman University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Mugla, Türkiye

² Mugla Sitki Kocman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Mugla, Türkiye

ORCID: 0000-0002-1199-8107, 0000-0003-2366-3993, 0000-0002-9288-5277

Keywords

Jet grout column, Liquefaction, Finite Element Method, UBCSAND Constitutive Model

Highlights

- * Parametric analyses by employing properties of a site with a liquefaction risk
- * Examining liquefaction behavior of the soil by using the UBCSAND constitutive model
- * Parametric study on the efficiency of jet grout columns on the mitigation of liquefaction

Aim

The study aims to reveal the efficiency of jet grout columns in the mitigation of liquefaction

Location

Kocaeli, Türkiye

Methods

A series of finite element analyses were performed in MIDAS GTS NX software by using jet grout columns having different area and strength ratios in time domain

Results

Shear stress in soil notably decreases as the area ratio increases. Increasing the rigidity of the columns lowers the shear stress till a level, then, more rigidity does not provide an appreciable contribution

Supporting Institutions

The authors declared that they used seismic data about the study area from AFAD. The local site properties were provided by civil engineer Turgay Erdoğan

Financial Disclosure

The author declares that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 02.09.2022

Revised: 17.10.2022

Accepted: 22.10.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1170304

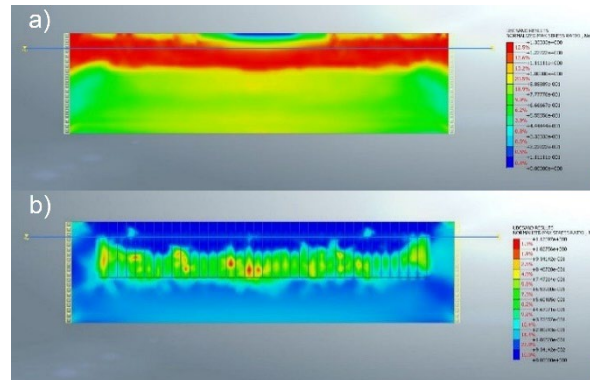


Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Mehmet Rifat Kahyaoglu

Email: rkahyaoglu@mu.edu.tr



Figure

UBCSAND stress ratio at the end of dynamic analysis; a) free field, b) with jet grout columns

How to cite:

Sahin G., Toygar O., Kahyaoglu T., 2022. A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation, Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 210-229, <https://doi.org/10.46464/tdad.1170304>



Sıvılaşma Riskinin Azaltılması için Kullanılan Jet Grout Kolonlarının Verimliliği Üzerine Bir Sayısal Çalışma

Gizem Şahin¹, Onur Toygar² ve Mehmet Rifat Kahyaoglu²

¹ Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mentese 48000 Muğla, Türkiye

² Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mentese 48000 Muğla, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1199-8107, 0000-0003-2366-3993, 0000-0002-9288-5277

ÖZET

Kocaeli İli'ndeki bir trafo montaj-demontaj binasının bulunduğu arazide kapsamlı bir zemin etüdü yapılmış ve bu alanda sıvılaşma riskinin olduğu görülmüştür. Sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak amacıyla jet grout kolonlar zemin iyileştirme yöntemi olarak seçilmiştir. Tasarımı yapılan jet grout kolonların imalatından sonra sıvılaşma riskinin ortadan kalkıp kalkmadığı, gerçekleştirilen analitik ve sayısal analizler ile incelenmiştir. Jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, efektif gerilme tabanlı sonlu elemanlar analizleri yapabilen MIDAS GTS NX programı ile UBCSAND bünye modeli kullanılarak, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca, jet grout kolonların sıvılaşabilir zemin tabakasındaki kayma gerilmeleri, kayma deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı dağılımları üzerindeki etkisi, jet grout kolonların farklı alan ve dayanım oranları için gerçekleştirilen parametrik analizlerle ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler

Jet Grout Kolon, Sıvılaşma, Sonlu Elemanlar Yöntemi, UBCSAND Bünye Modeli

Öne Çıkanlar

- * Sıvılaşma riski olan bir sahanın özellikleri kullanılarak parametrik analizler yapılması.
- * UBCSAND bünye modeli kullanarak zemin davranışının incelenmesi.
- * Jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliğinin parametrik olarak incelenmesi.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.09.2022
Düzeltilme: 17.10.2022
Kabul: 22.10.2022
Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1170304

Sorumlu yazar

Mehmet Rifat Kahyaoglu
Eposta:
rkahyaoglu@mu.edu.tr

A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation

Gizem Sahin¹, Onur Toygar² and Mehmet Rifat Kahyaoglu²

¹ Muğla Sıtkı Kocman University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Muğla, Türkiye

² Muğla Sıtkı Kocman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Muğla, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1199-8107, 0000-0003-2366-3993, 0000-0002-9288-5277

ABSTRACT

A comprehensive site investigation was carried out on the site in Kocaeli, where a transformer assembly-disassembly building was located, and it was observed that there was liquefaction risk in the area. Therefore, jet grout columns were selected as the soil improvement method. After the production of the designed jet grout columns, it was investigated whether the liquefaction risk was eliminated through analytical and numerical analyses. The effectiveness of jet grout columns in preventing liquefaction was evaluated in terms of the generation of excess pore water pressure by using UBCSAND constitutive model on MIDAS GTS NX software which can perform effective stress-based finite element analyses. In addition, the effect of jet grout columns on the variation of shear stresses, shear deformations and excessive pore water pressure ratios in liquefiable soils were examined through the parametric analyses performed for different area and strength ratios of jet grout columns.

Keywords

Jet Grout Column, Liquefaction, Finite Element Method, UBCSAND Constitutive Model

Highlights

- * Parametric analyses by employing properties of a site with a liquefaction risk.
- * Examining liquefaction behavior of the soil by using the UBCSAND constitutive model.
- * Parametric study on the efficiency of jet grout columns on the mitigation of liquefaction.

Manuscript

Research Article

Received: 02.09.2022
Revised: 17.10.2022
Accepted: 22.10.2022
Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1170304

Corresponding Author

Mehmet Rifat Kahyaoglu
Email:
rkahyaoglu@mu.edu.tr

1. GİRİŞ

Sıvılaşma terimi ilk olarak Mogami ve Kubo (1953) tarafından; suya doymuş, kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında deformasyonuna neden olan bir olay olarak tanımlanmıştır. Drenajsız durumda, hızlı yüklemeler nedeniyle aşırı boşluk suyu basıncı oluşmakta, bununla beraber zemindeki efektif gerilme azalmaktadır. Deprem gibi tekrarlı yüklemeler esnasında bu tip zeminlerde efektif gerilme 0'a kadar azalmakta ve zemin taşıma gücünü kaybedebilmektedir. Tarihte ilk olarak 1906 San Fransisco depremi sonucunda sıvılaşma ve buna bağlı yapısal hasarlar gözlenmiştir (Youd ve Hoose 1976). Ancak o dönemde sıvılaşma terimi bilinmediği için ilk olarak Alaska (1964) ve Nigata (1964) depremlerinden sonra konu ile ilgili çalışmalar başlamış ve günümüzde bile hala incelenmektedir. Bu iki büyük depremden sonra Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) ve Kocaeli (1999) depremlerinde sıvılaşma gözlenmiştir (Tonaroglu 2006). 1995 Kobe depreminde, o dönem dünyanın en büyük 6'ncı konteyner limanı olan Kobe limanı sıvılaşma nedeniyle ağır hasar görmüş ve iki yıl süreyle kapalı kalmıştır. Limanın uğradığı toplam zarar 10 milyar ABD doları iken depremin yarattığı zararın yaklaşık 100 milyar ABD doları olduğu ve 6000'den fazla insanın ölümüne yol açtığı rapor edilmiştir (Chang 2000). Ülkemizde ise 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşma olayı gözlenmiş, Gölçük sahil kesimindeki dolgu alanının denize doğru kayması nedeniyle çok sayıda can kaybı yaşanmıştır (Tonaroglu 2006). Sıvılaşma, önemli bir zemin problemi olup bu riskin belirlenmesine ve önlenmesine yönelik çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Kocaeli, dünyanın en aktif faylarından birisi olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın (Askan ve Karimzadeh 2019) yakınında yer alması nedeniyle bu gibi tehlikelere açık durumdadır.

Seed ve Idriss (1971), zeminlerin sıvılaşma direncini değerlendiren basitleştirilmiş bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, Youd ve Idriss (2001) tarafından geliştirilmiş, saha deneylerinin yanı sıra laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin kullanıldığı ampirik denklemler önerilmiştir. Vaka analizlerine dayanan bu yöntemde, depremin neden olduğu sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (GK) kabaca, çevrimsel direncin (CRR) çevrimsel kayma gerilmesine (CSR) oranı olarak tanımlanmış, güvenlik katsayısının 1'den küçük olması durumunda sıvılaşma riskinin varlığı kabul edilmiştir.

Sıvılaşma tehlikesinin olduğu durumlarda olası problemlerin önüne geçebilmek için bu riskin bertaraf edilmesi gerekir. Selçukhan ve Ekinci (2021) çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerini detaylıca incelemiş ve dinamik kompaksiyon, derin karıştırma, taş kolon ve jet grout kolon imalatı gibi yöntemlerin sıvılaşmayı önleme amacıyla kullanılabilceğini belirtmiştir. Bu yöntemler içerisinde yüksek modüllü kolonlar olarak da bilinen jet grout kolonlar; sıvılaşma riskini azaltmak, zeminin taşıma kapasitesi arttırmak ve oturma miktarını azaltmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Moseley ve Kirsh (2004), jet grout enjeksiyonunu, zeminin çimento ile hem karıştırılmasını hem de kısmi yer değiştirmesini içeren çok amaçlı bir zemin ıslah yöntemi olarak tanımlamıştır. Sıvılaşmayı önleme açısından jet enjeksiyonunun etkinliği, vaka analizlerine dayalı çok sayıdaki araştırma ile incelenmiştir (Hausler ve Sitar 2001, Martin ve diğ. 2004, Mısır 2020). Ayrıca Adalier ve diğ. (2003) gerçekleştirdikleri santrifüj deneyleri ile taş kolonların plastik olmayan siltli kumlarda sıvılaşmayı önlediğini belirlemiştir. Bu çalışmalara ek olarak, jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki katkısı bazı sayısal analizlerle de doğrulanmıştır. Yapılan sayısal analizlerde toplam gerilme yaklaşımının (Olgun ve Martin 2008, Unutmaz 2012) yanı sıra boşluk suyu basıncını hesaba katan çalışmalar (Beaty ve Byrne 1998, Almani ve diğ. 2013, Galavi ve diğ. 2013) da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, jet grout kolonların sıvılaşmayı önleme konusundaki etkinliğinin jet grout ile zemin kayma dayanımı farkına bağlı olarak artacağı belirlenmiştir.

Zeminde meydana gelebilecek rijitlik ve mukavemet kaybı ile olası oturmaları belirlemek için boşluk suyu basıncı değişiminin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca kumlu zeminlerde meydana gelen büyük yer değiştirmelerin hesaplanmasında mekanik temelli bir yaklaşıma ek olarak sorunun fiziksel yönü de dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, zeminde gerilme deformasyon analizi için kullanılan tüm yöntemlerde, malzeme davranışını modelleyebilmek için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerine ya da diğer bir deyişle bünye modellerine ihtiyaç vardır. Bir geoteknik uygulama için gerçekçi bir modelin seçimi; zeminin mekanik özelliklerine, zeminin geçmişine ve gelecekte meydana gelecek gerilme değişikliklerine bağlıdır (Wood 1990). Sıvılaşma, dinamik yükler altında oluşan bir zemin problemidir. Dinamik yükleri histeretik bir biçimde sönmüleyen zemin davranışını en uygun şekilde modelleyebilmek için visko-elastik teorilere dayanan bünye modelleri kullanmak gereklidir (Özener 2007).

Sıvılaşmayı sayısal olarak modellemek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Beaty ve Byrne (2000), sıvılaşmanın tetiklenme durumunu ve sonrasında oluşan deformasyonları tahmin etmek için toplam gerilme yaklaşımına dayalı bir model olan UBCTOT bünye modelini geliştirmişlerdir. Ayrıca, TARA-3FL yazılımı (Finn ve diğ. 1986) ve Roth bünye modeli (Dawson ve diğ. 2001) kısmi birleşik efektif gerilme temelli modellerdendir. Bu modeller, doğrudan boşluk suyu basıncının değişimine bağlı olarak hacimsel şekil değiştirmeyi hesaplayamayan daha basit bünye modelleridir. Her bir yük artış basamağında, zeminin davranışına göre boşluk suyu basıncının artışını ve hacimsel değişimi hesaba katan modellere tamamen birleşik efektif gerilme temelli modeller denilebilir (Oral 2014). Bu kompleks bünye modellerine Wang modeli (Wang 1990), NTUA-SAND modeli (Papadimitriou ve diğ. 2001) ve UBCSAND modeli (Puebla ve diğ. 1997, Byrne ve diğ. 2004, Beaty ve Byrne 2011) örnek olarak gösterilebilir. Zemin ve yükleme koşullarına göre en uygun bünye modelinin seçilmesi, güvenilir sonuçlar elde etmek için çok önemlidir.

UBCSAND, kum ve sıvılaşma riski taşıyan benzer zeminlerin, tekrarlı yükler altındaki davranışını doğrusal olmayan yöntem kullanarak inceleyen bir modeldir. Efektif gerilmeye dayalı bu yöntem, birim şekil değiştirmeleri, herhangi bir yükleme anında hesaplayabilen elasto-plastik bir yaklaşımdır. Elastik sınırlar içerisindeki deformasyonlar, kayma ve hacim modülü kullanılarak, akma durumundan sonraki deformasyonlar ise efektif gerilme değişim oranına bağlı olan bir akma kuralına göre hesaplanmaktadır. Kum ve benzeri sıvılaşabilir zeminlerde geçerli olması, tekrarlı yüklemelerde herhangi bir adımdaki deformasyonu hesaplayabilmesi ve efektif gerilme temelli bir model olması nedeniyle UBCSAND, sıvılaşma problemlerinin sayısallaştırılmasında kullanılabilecek bünye modellerinden biridir.

Bu çalışmada jet grout kolonlarının sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği bir dizi sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Jet grout kolon imalatı, her ne kadar sıvılaşmanın ıslahında sıklıkla kullanılsa da sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği yeterince detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Saha çalışmalarının zorluğu, pahalı olması, çok sayıda parametrik analizleri içeren deneylerin yapılamaması ve vaka analizlerinin sınırlı sayıda olması nedeniyle çoğunlukla sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Bu nedenle, Kocaeli İlinde, sıvılaşma riskinin olduğu bilinen siltli kumlu bir zemin, MIDAS GTS NX yazılımındaki UBCSAND bünye modeli kullanılarak modellenmiştir. Mevcut sahanın sıvılaşma riski, analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analizleri ile ortaya konmuş, jet grout kolonlarının imalatından sonra problemin ortadan kalkıp kalmadığı yine bu yöntemlerle belirlenmiştir. Ayrıca bu sonlu elemanlar modeli kullanılarak; farklı kolon dayanım oranları ve alan oranları dikkate alınarak, deprem sırasında sıvılaşan zeminde oluşan kayma gerilmeleri, kayma deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı oranları değişimleri incelenmiş, sonuçlar değerlendirilerek yorumlanmıştır.

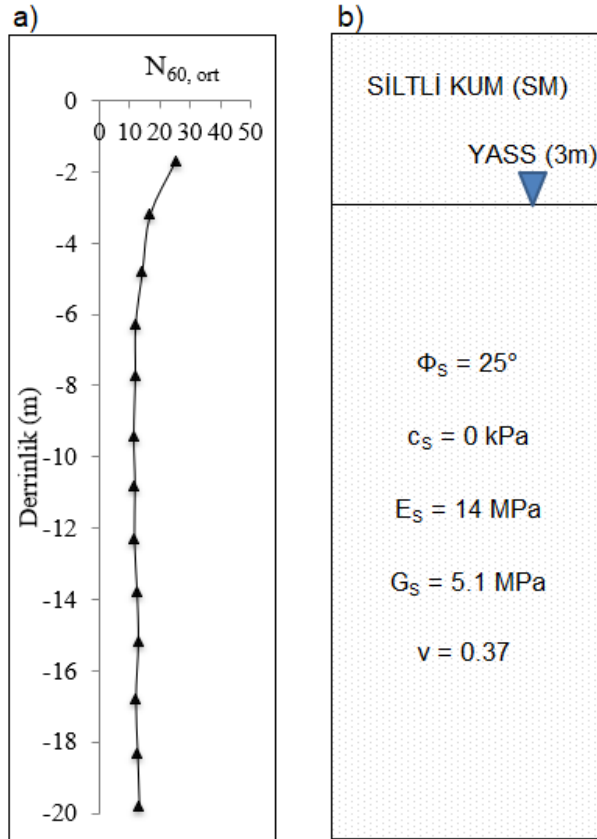
2. GEOTEKNİK DEĞERLENDİRME

2.1) Test Sahası ve Zemin Özellikleri

Çalışma alanı, Kocaeli İli'nde, üzerine bir trafo montaj-demontaj binasının yapılması planlanan 1119.73 m² alana sahip olan arazidir. İnşa edilecek olan üst yapının zemine 150 kPa gerilme aktaracağı hesaplanmıştır.

Arazide 4 adet sondaj kuyusu açılmış, derinlik boyunca her 1.5 m'de bir Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılmıştır. Alüvyon formasyonunun hâkim olduğu bu arazide yer yer kil bantları görülmüş, ancak zeminin genellikle değişiklik göstermeyen derin siltli kum olduğu belirlenmiştir. Her birinin derinliği 20 m olan 4 adet sondaj kuyusu boyunca SPT N₆₀ değerleri elde edilmiş, ortalama N_{60,ort} değerlerinin (N_{60,ort}) derinlikle değişimi Şekil 1a'da sunulmuştur.

Çeşitli derinliklerde örselenmiş numuneler alınarak, zemin sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Elek analizi sonucunda zeminin dane boyu dağılımının %10 çakıl, %58 kum ve %32 silt ve kilden oluştuğu, USCS'e (Unified Soil Classification System) göre plastik olmayan siltli kum olduğu (SM) tespit edilmiştir. Yeraltı su seviyesi (YASS) 3 m derinlikte gözlenmiştir.



Şekil 1: Zemin özellikleri; a) SPT N_{60,ort} değerlerinin derinlikle değişimi, b) İdealize zemin profili
Figure 1: Properties of the soil; a) Variation of SPT N_{60,ort} with the depth, b) Idealized soil profile

Şekil 1a'da gösterilen N_{60,ort} değerlerinin derinlik boyunca çok değişmediği görülerek zemin tek tabakalı olarak modellenmiş, 20 m'lik zemin profili için ortalama SPT N₆₀ değeri 13 olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak olan zeminin elastisite modülü (E_s), içsel sürtünme açısı (Φ_s) gibi parametreler, SPT sonuçlarına bağlı olarak önerilen aşağıdaki korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır (Bowles 1997):

$$\Phi_s = 0.45 * (N_{70}) + 20^\circ \quad (1)$$

$$E_s = 500 * (N_{60} + 15) \quad (2)$$

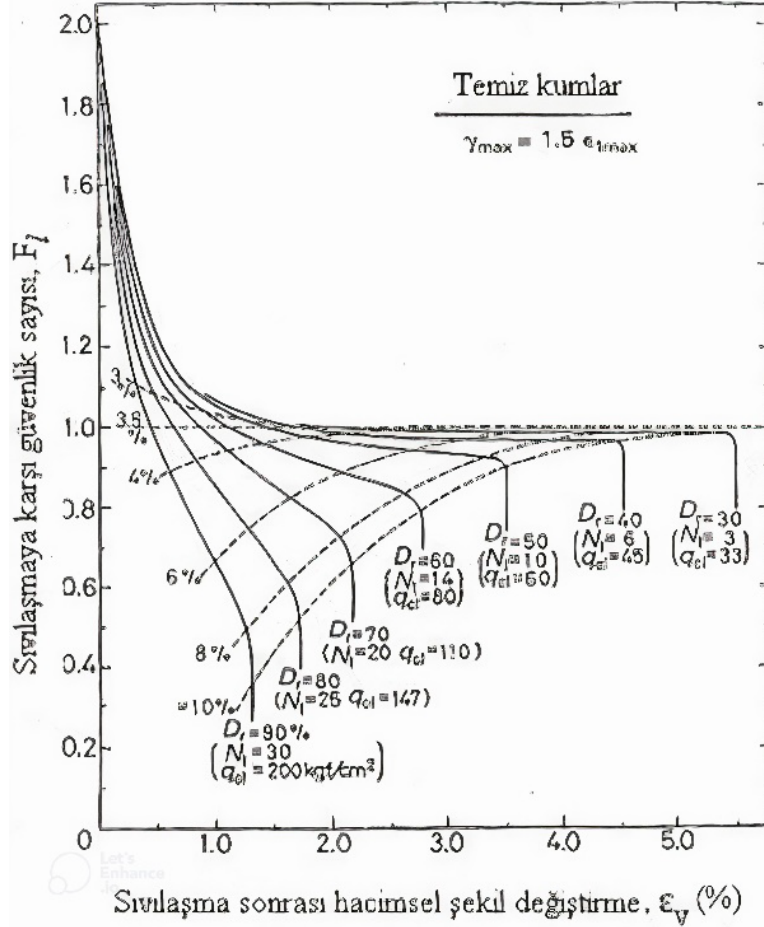
Denklem (1) ve (2)'de belirtilen korelatif ilişkiler, normal konsolide kumlar için önerilen genel yaklaşımlardır. %60 enerji düzeyine göre hesaplanan N_{60} değeri, N_{70} değerine çevrilmiş ve içsel sürtünme açısı 25° olarak elde edilmiştir. Zeminin elastisite modülü de 14 MPa olarak hesaplanmıştır. Suyu doymuş bu kum zemin için Poisson oranı (ν) 0.37 olarak kabul edilmiştir (Bowles 1997). Elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılarak bu zemin için kayma modülü (G_s) 5100 kPa olarak hesaplanmış, idealize zemin profili ve özellikleri Şekil 1b'de gösterilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY 2018) göre bu zemin, $N_{60}=13$ (<15) olduğu için ZE yerel zemin grubunda olduğu halde sıvılaşma riski bulundurduğu için ZF olarak sınıflandırılmıştır.

2.2) Sıvılaşma Analizi

Bölgede meydana gelmiş depremler incelendiğinde; aletsel dönem öncesinde 16 yıkıcı depremin yaşandığı (Scawthorn ve Johnson 2000), 1900'den günümüze ise büyüklüğü 4'ten fazla olan 110 depremin (AFAD 2021) meydana geldiği görülmüştür. Özellikle 17 Ağustos 1999'de Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda meydana gelen ve moment büyüklüğü (M_w) 7.4 olan deprem, bölgede büyük yapısal hasara ve can kaybına yol açmıştır. Şehir merkezini çevreleyen alandaki yapısal hasarların, zemindeki sıvılaşma nedeniyle olduğu rapor edilmiştir (Yoshida ve diğ. 2001). Bu alandaki sismisitenin yüksek olması, yeraltı suyunun yüzeye yakın olması, zeminin siltli kum olması gibi etmenler göz önünde bulundurulduğunda sahanın sıvılaşma riski yönünden detaylı bir şekilde değerlendirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Sıvılaşma riski, TBDY (2018) Bölüm 16B.3'e göre değerlendirilmiştir. Bu yönetmelikte deprem tehlikesi, inceleme alanının coğrafi koordinatlarına göre spektral ivmeler cinsinden tanımlanmıştır (Sucuoglu 2019). Spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 (475 yıllık tekrarlanma periyodu) olduğu deprem yer hareketi düzeyine (DD-2, standart tasarım yer hareketi) göre en büyük yer ivmesi (PGA) 0.546 g olarak tespit edilmiştir (AFAD 2018). Buna göre zemin profili boyunca sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (GK) belirlenmiştir. Sonuç olarak, yeraltı su tablasının altında kalan bölgede (3-11 m) sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı 1.1'den küçük olduğu belirlenmiş, bu bölgede ortalama güvenlik katsayısı 0.745 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle zeminin ilk 11 m'lik tabakasında sıvılaşmaya karşı bir önlem alınması gerekmektedir.

Ishihara ve Yoshimine (1992), sıvılaşma nedeniyle oluşan oturmaları hesaplamak için suya doymuş kum zemin kullanarak çok sayıda basit kesme kutusu deneyi yapmıştır. Her bir deneyde, sıvılaşma riski, zeminin yoğunluğu ve hacimsel şekil değiştirme gibi parametrelerin arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Sonuç olarak Şekil 2'de sunulan çizelgenin, sıvılaşma kaynaklı oturmaları makul bir doğrulukla tahmin edebildiğini ve bunun mühendislik uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu çizelgede belirtilen SPT N darbe sayısı, %90 enerji düzeyindeki N_{90} değerini ifade etmektedir. Mevcut çalışmada, sıvılaşan bölgedeki güvenlik katsayısının ortalama 0.745 ve $N_{90}=8$ olduğu ve buna göre zeminde yaklaşık 60 cm sıvılaşma kaynaklı oturma meydana gelebileceği hesaplanmıştır. Zemin özellikleri ve olası sıvılaşma kaynaklı oturma miktarı dikkate alındığında, bu tehlikeleri önlemek için jet grout kolonlar kullanılarak zemin iyileştirilme projesi yapılmıştır.



Şekil 2: Sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme oranı (Ishihara ve Yoshimine 1992)
 Figure 2: Post-liquefaction volumetric strain (Ishihara and Yoshimine 1992)

2.3) Jet Grout Kolonlar ile Zemin İyileştirme Projesi

Jet grout kolonlu zemin iyileştirme yönteminde, zemine yüksek basınçla su-çimento karışımı enjekte edilir ve enjeksiyon sıvısının zeminle karışarak yaklaşık dairesel kesitli iyileştirilmiş kısımların oluşturulması amaçlanır. Enjeksiyon, yüksek basınçlı pompalar ve özel tijler kullanılarak yapılmaktadır. Enjeksiyon tijleri önce jet grout kolon alt kotuna hidrolik basınç uygulanarak indirilmektedir. Daha sonra yüksek basınç altında enjeksiyona başlanmakta, tijler bir yandan belirli bir hızda döndürülmekte diğer yandan öngörülen bir hızda zemin yüzeyine doğru çekilerek jet grout kolonlar oluşturulmaktadır.

Tasarımı yapılan jet grout kolonların projesine göre hedeflenen serbest basınç dayanımı (q_c) 1500 kPa'dır. Bruce ve Bruce (2003), jet grout kolonların çekme dayanımlarının (q_t), basınç dayanımının yaklaşık %8-14'ü arasında değiştiğini rapor etmiştir. Mevcut çalışmada bu oran %14 olarak kabul edilmiş ve jet grout kolonların çekme dayanımları 210 kPa olarak hesaplanmıştır.

Jet grout kolonların imalatından sonra elde edilen jet grout kolon-zemin ikilisi, iyileştirilmiş zemin olarak ifade edilmiştir. İyileştirilmiş zeminin kayma mukavemeti parametreleri (c_{ort} ve ϕ_{ort}) ile elastisite modülü (E_{ort}), jet grout kolon ve doğal zeminin planda kapladığı alana göre ilgili parametrelerin ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanabilmektedir. Bu nedenle öncelikle jet grout kolonların mukavemet parametreleri aşağıdaki ilişkiler kullanılarak belirlenmiştir (Nishimatsu 1972):

$$c_{jg} = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_t}{2[\sigma_t(\sigma_c - 3\sigma_t)]^{0.5}} \quad (3)$$

$$\tan\Phi_{jg} = \frac{\sigma_c^2 - 4c^2}{4\sigma_c \cdot c} \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4) kullanılarak jet groutların kohezyonu (c_{jg}) ve içsel sürtünme açısı (Φ_{jg}) sırasıyla 368 kPa ve 37.7° olarak hesaplanmıştır. Xanthakos ve diğ. (1994), jet grout kolonların elastisite modülünün (E_{jg}), basınç dayanımlarının 362 ile 913 katı arasında değiştiğini belirtmiştir. Mevcut çalışmada bu oran alt sınır olarak kabul edilmiş ve 540 MPa olarak hesaplanmıştır. Poisson oranı da yaklaşık 0.5 olarak kabul edilmiş (Özsoy ve Durgunoğlu 2003), buna bağlı olarak jet grout kolonların kayma modülü (G_{jg}) 197 MPa olarak hesaplanmıştır.

Jet grout uygulaması yapıldıktan sonra beklenen iyileştirilmiş zemin parametreleri, belirtilmiş olduğu üzere ilgili parametrenin jet grout kolon ve doğal zemindeki değerlerinin ağırlık ortalaması olacak şekilde hesaplanmıştır. Buna göre; iyileştirilmiş zeminin kohezyonu (c_{ort}) 32.2 kPa, içsel sürtünme açısı (Φ_{ort}) 26.1°, elastisite modülü (E_{ort}) 59.9 MPa ve kayma modülü de (G_{ort}) 21.9 MPa olarak elde edilmiştir. Jet grout kolonların, doğal zeminin ve iyileştirilmiş zeminin özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Jet grout kolonların, zeminin ve iyileştirilmiş zeminin özellikleri
Table 1: Characteristics of jet grout columns, soil and improved soil

Özellik	Parametre	Değer
Jet Grout	Serbest basınç (q_c)	1500 kPa
	Çekme dayanımı (σ_t)	210 kPa
	Kohezyon (c_{jg})	368 kPa
	İçsel sürtünme açısı (Φ_{jg})	37.7°
	Elastisite modülü (E_{jg})	540 MPa
	Kayma modülü (G_{jg})	197 MPa
	Çap (B)	60 cm
	Aralık (S=3B)	180 cm
Zemin	Uzunluk	11 m
	Kohezyon (c_s)	0
	İçsel sürtünme açısı (Φ_s)	25°
İyileştirilmiş Zemin	Elastisite modülü (E_s)	14 MPa
	c_{ort}	32.2 kPa
	Φ_{ort}	26.1°
	E_{ort}	59.9 MPa
	G_{ort}	21.9 MPa

Tasarımı yapılan jet grout kolonların çapı (B) 60 cm, kolonlar arası aksenal mesafe (S) ortalama 180 cm (3B) olarak seçilmiştir. Kolon pozisyonu hazırlanırken konstruktif esaslara da dikkat edilmiştir. Planda yatay kolon sayısı 14, düşey kolon sayısı 37 adet olmak üzere toplam 518 adet jet grout kolonu tasarlanmıştır. S=3B durumunda, jet grout kolonların planda kapladığı alanın (A_{jg}) temelin alanına (A) oranı 0.087 olup bu oran, alan oranı (A_r) olarak Denklem (5)'teki gibi tanımlanmıştır:

$$A_r = A_{jg} / A \quad (5)$$

Jet grout kolonların arasında kalan zemine etkiyen dinamik kayma gerilmeleri, kolon çapı ve arada kalan zeminin alanın bir fonksiyonu olarak değişmektedir (Özsoy ve Durgunoğlu 2003). Buna göre; belirli bir alandaki kolonun ve zeminin şekil değiştirmelerinin uyumlu olacağı kabulüyle, çevrimsel kayma gerilmesi (CSR) kayma gerilmesi azaltma faktörü (Baez 1995), SR, kullanılarak azaltılır (Denklem 6):

$$CSR_{tasarım} = CSR \times SR \quad (6)$$

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{G_r} \cdot \frac{1}{[A_r + \frac{1}{G_r}(1-A_r)]} \quad (7)$$

Denklem (7)'deki τ zemindeki kayma gerilmesini, τ_s azaltılmış kayma gerilmesini, G_r ise kayma modülü oranını temsil eder:

$$G_r = G_{jg} / G_s \quad (8)$$

Bu durumda; Denklem (8) kullanılarak alan oranı 0.087, kayma modülü oranı 38.6 ve $S_R=0.234$ olarak hesaplanır. Böylelikle jet grout kolon imalatı sonrası sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü 1.32 (>1.1) olarak elde edilir ve sıvılaşma riski kabul edilebilir mertebelere (TBDY 2018) indirilmiş olur.

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

3.1) Bünye Modeli

Sonlu elemanlar modellerinde, analize konu olan yükleme koşulları ve zeminin bu durumdaki davranışını gerçekçi şekilde modellemek için doğru bir zemin bünye modeli seçmek esastır. Sıvılaşma, kısa süre içerisinde tekrarlı yüklemelerin söz konusu olduğu ve oluşan şekil değiştirmelerin boşluk suyu basıncına göre değiştiği dinamik bir problemdir. Bu nedenle, sıvılaşma problemlerinin modellenmesinde; toplam gerilme temelli ya da kısmi birleşik efektif gerilme temelli modeller yerine boşluk suyu basıncı ve buna bağlı olarak şekil değiştirme hesaplayabilen tamamen birleşik efektif gerilme tabanlı zemin bünye modelleri tercih edilmelidir (Bölüm 1). Mevcut çalışmada; boşluk suyu basıncının ve efektif gerilmelerin her yükleme adımında hesaplanabildiği, doğrusal olmayan elasto-plastik bir gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi sunan UBCSAND bünye modeli (Beaty ve Byrne 2011) tercih edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizleri UBCSAND zemin bünye modelini içeren MIDAS GTS NX programı kullanılarak yapılmıştır. Bu modeldeki; elastik kayma modülü sayısı (K_G^e), bulk (hacim) modülü sayısı (K_B^e), plastik kayma modülü sayısı (K_G^p) ve hata oranı (R_f) gibi parametreler, SPT N_{60} değerine bağlı ilişkiler (Denklem 9, 10, 11, 12) kullanılarak belirlenebilir (Beaty ve Byrne 2011):

$$K_G^e = 21.7 * 20 * (N_{60})^{0.334} \quad (9)$$

$$K_B^e = 0.7 * K_G^e \quad (10)$$

$$K_G^p = K_G^e * (N_{60})^2 * 0.003 + 100 \quad (11)$$

$$R_f = 1.1 * (N_{60}) - 0.15 \quad (12)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak, ilgili zemin parametreleri çalışma sahası için hesaplanmıştır. Diğer UBCSAND zemin modeli parametreleri de bünye modelinin geliştiricilerinin (Puebla ve diğ. 1997, Beaty ve Byrne 1998; 2011) önerdiği aralıklarda seçilerek tüm model parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir:

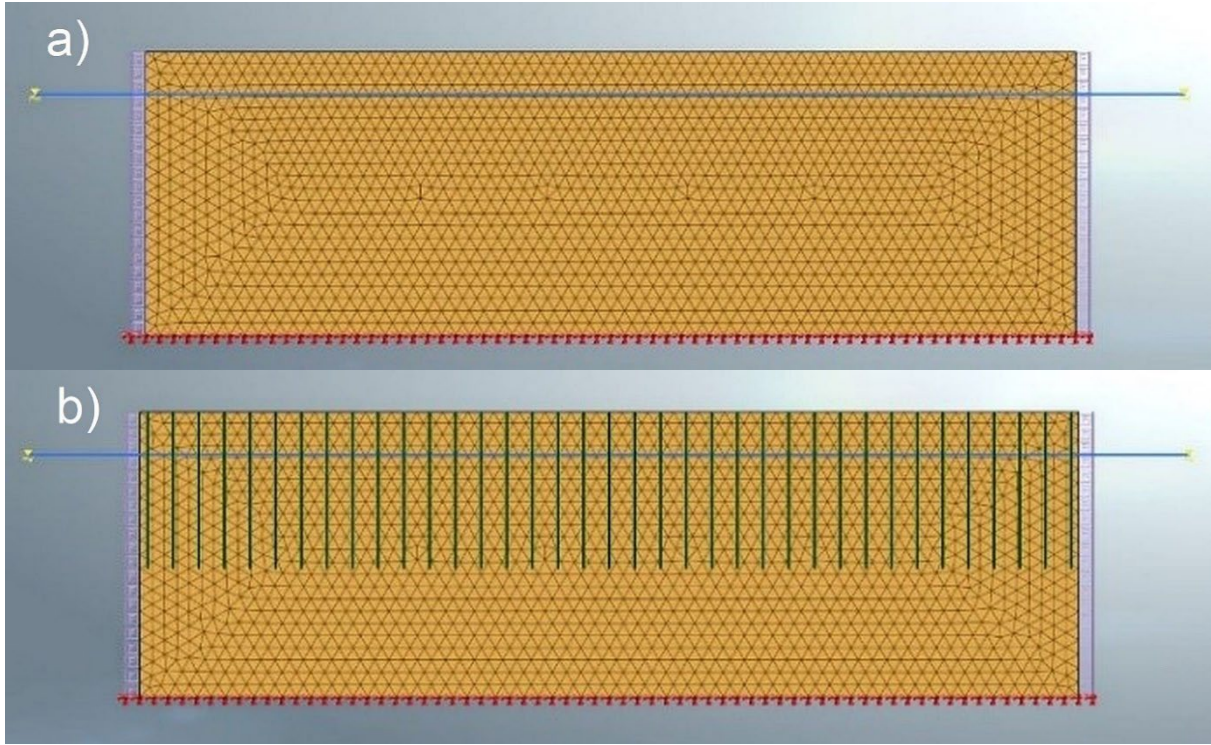
Tablo 2: UBCSAND bünye modeli parametreleri
Table 2: UBCSAND constitutive model parameters

Parametre	Tanım	Değer
N_{60}	Düzeltilmiş SPT değeri	13
K_G^e	Elastik kayma modülü sayısı	766
K_B^e	Bulk modülü sayısı	535.7
K_G^p	Plastik kayma modülü sayısı	488
m_e	Elastik bulk modülü indeksi	0.5
n_e	Elastik kayma modülü indeksi	0.5
n_p	Plastik kayma modülü indeksi	0.4
Φ_{cv}	Sabit hacim sürtünme açısı	33
Φ_p	Tepe sürtünme açısı	34.3
R_f	Hata oranı	0.75
$f_{ac, hard}$	Yoğunlaştırma faktörü	1
$f_{ac, post}$	Sivilaşma sonrası kalibrasyon değeri	0.2

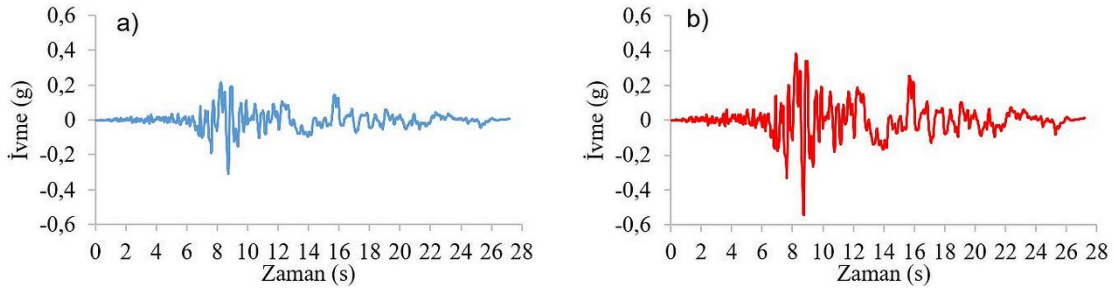
3.2) Sonlu Elemanlar Modeli

MIDAS GTS NX programı kullanılarak 65 m uzunluğunda ve 20 m derinliğinde, düzlem gerinim koşullarında bir model oluşturulmuştur. Zemin özellikleri, UBCSAND bünye modeli kullanılarak Tablo 2'deki gibi tanımlanmıştır. Dinamik yüklemeler söz konusu olduğunda, zemin modelinin boyutları ve sınır koşulları büyük önem taşır. Her bir dinamik yükleme adımı sırasında oluşan dalgaların yayılımı sonucunda, modelin sınırlarında yansıyan veya kırılan dalgalar, yeni oluşan dalgalarla birleşerek farklı sonuçlar elde edilmesine neden olabilir. Bu yansıma ve kırılmalar, model boyutunun küçük olması ya da sınır koşullarının doğru tanımlanmaması durumunda yanlış sonuçlara neden olur. Bu nedenle, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin sınırları; serbest alan (free-field) olarak tanımlanıp, buralarda sönümleyici sınır koşulları (absorbent boundary) tanımlanmıştır. Bu koşullarda; modelin sınırları daha geniş bir alan gibi tanımlanmakta ve doğal olarak olduğundan daha büyük bir model elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca kullanılan sönümleyici sınır koşulları da yükleme sırasında oluşan deprem dalgalarının sınırlardan yansımadan yayılmasına olanak sağlamaktadır. Boyutu 1 m'den küçük üçgen ağ elemanları kullanarak; herhangi bir jet grout kolonu olmadan serbest saha modeli (Şekil 3a) ve ardından jet grout kolonlu (Şekil 3b) sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Yapılan dinamik analizlerde, inceleme alanının yakınlarında daha önce meydana gelen 1999 Kocaeli depreminin kayıtları kullanılmıştır. 0.02 s zaman aralığı ile kaydedilmiş olan bu yer hareketi kaydına göre en büyük ivme 0.312 g'dir (Şekil 4a). Çalışma alanında; 475 yıllık tekrarlanma periyoduna sahip olan standart tasarım yer hareketinin oluşturabileceği en büyük yer ivmesi 0.546 g olarak tespit edilmiştir (AFAD 2018). Bu nedenle özgün deprem kaydı, PGA=0.546 g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir (Şekil 4b). Tüm sonlu elemanlar analizlerinde ölçeklendirilmiş olan ivme-zaman kaydı kullanılmıştır.



Şekil 3: Sonlu elemanlar modeli; a) serbest saha, b) S=3B jet grout kolonlu durum
Figure 3: Finite element model; a) free field, b) S=3B jet grout column case

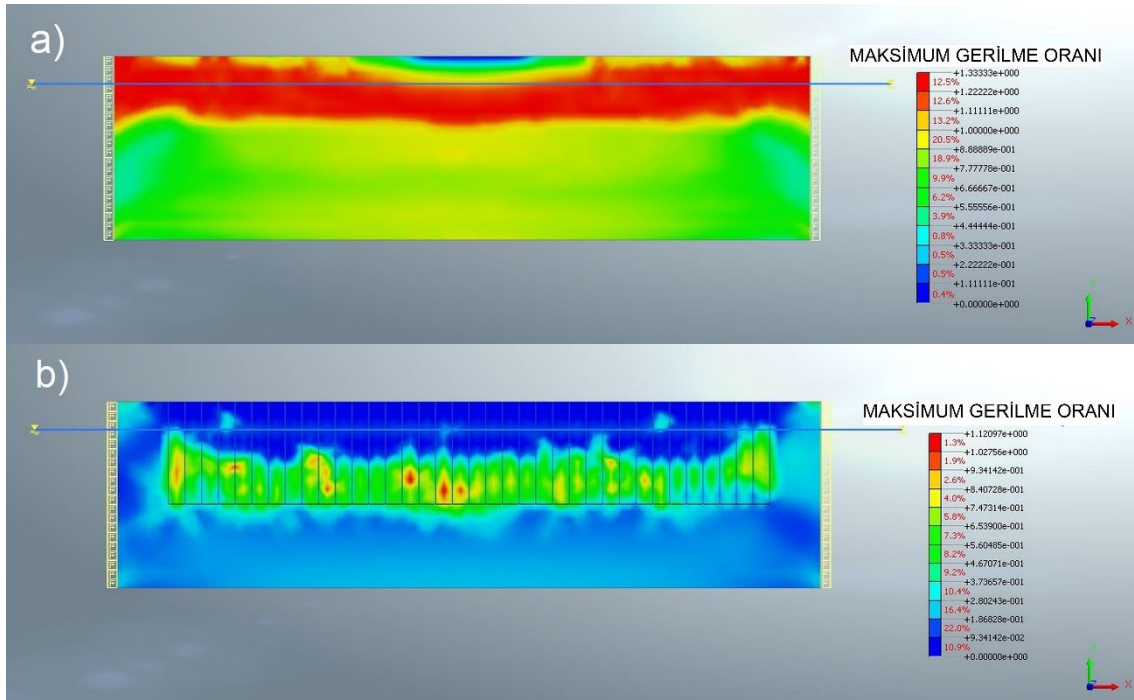


Şekil 4: İvme-zaman kaydı; a) özgün kayıt, b) ölçeklendirilmiş kayıt
Figure 4: Acceleration-time history; a) original record, b) scaled records

Oluşturulan 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinde, Şekil 4b'de sunulan ivme-zaman kaydı kullanılarak serbest saha modeli için dinamik analiz yapılmıştır. Bu ve sonraki analizlerde sıvılaşma; kayma gerilmeleri, kayma deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı oranı (r_u) üzerinden değerlendirilmiştir.

3.3) Parametrik Analizler

TBDY (2018)'e göre yapılan geoteknik değerlendirme sonucunda, mevcut sahada sıvılaşma riski olduğu görülmüş, özellikleri Tablo 1'de belirtilen jet grout kolonların imalatı sonrasında sıvılaşma tehlikesinin ortadan kalktığı belirlenmişti (Bölüm 2). Yapılan sonlu elemanlar analizleri, herhangi bir jet grout kolonun bulunmadığı durumda zeminin sıvılaştığını doğrulamaktadır (Şekil 5a). S=3B aralıklarla yerleştirilen, kayma modülü oranı 38.6 olan jet grout kolonlu durumda ise bu tehlike ortadan kaldırılmıştır (Şekil 5b).



Şekil 5: Dinamik analizi sonucu UBCSAND gerilme oranı; a) serbest saha, b) jet grout kolonlu zemin
Figure 5: UBCSAND stress ratio at the end of dynamic analysis; a) free field, b) with jet grout columns

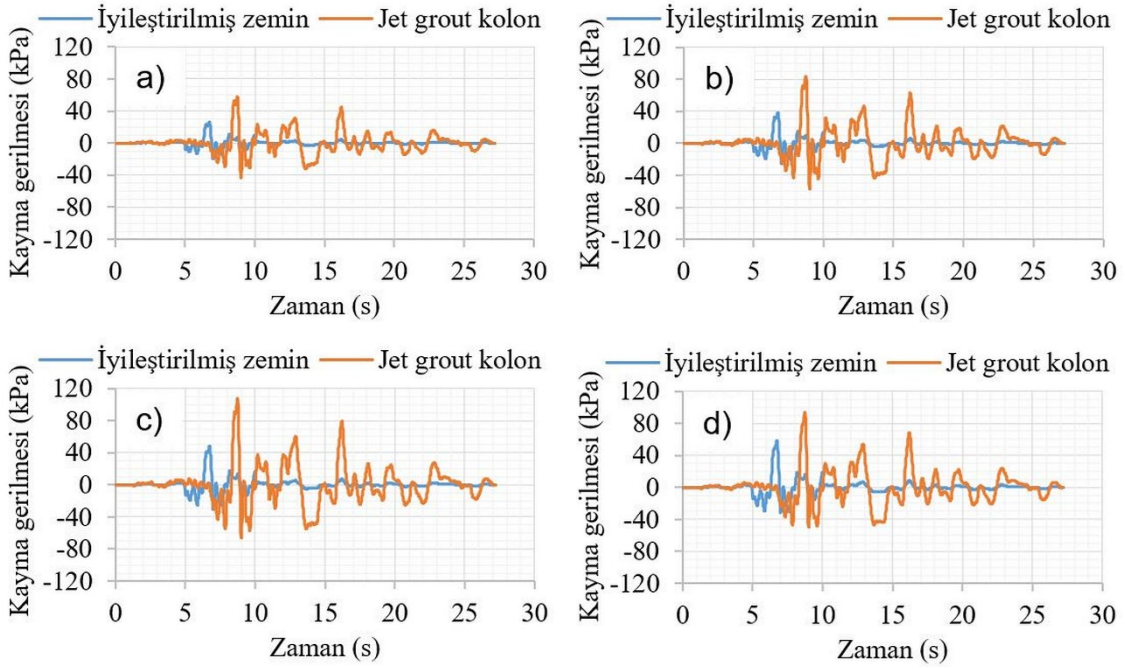
Bu çalışma kapsamında; zeminin özellikleri sabit tutulmuş, jet grout kolonların dayanımları, kolonlar arasındaki mesafe gibi parametreler değiştirilerek çok sayıda parametrik analizler yapılmıştır. Jet grout kolonların kayma modülleri (G_{jg}), zeminin kayma modülüne (G_s) oranlanarak kayma modülü oranı (G_r) cinsinden ifade edilmiştir (Denklem 8). Kayma modülü oranı; 20, 38.6, 60, 80 ve 100 olan, farklı dayanıma sahip jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği incelenmiştir. Ayrıca jet grout kolonların arasındaki mesafenin (S) sıvılaşmayı önlemeye etkisi $S=2B$, $3B$, $4B$, $5B$ ve $6B$ durumları için incelenmiştir. Bu durumda alan oranı (A_r); sırasıyla 0.196, 0.087, 0.049, 0.031 ve 0.022 olarak hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Serbest saha koşullarında; analitik yöntemler ve sayısal analizler kullanılarak yapılan incelemelerde, yeraltı su seviyesinin altında sıvılaşma riski olduğu görülmüş, bu nedenle 11 m uzunluğunda jet grout kolonların yapılması önerilmiştir. Jet grout kolonların kayma dayanımları ($G_r=20, 38.6, 60, 80$ ve 100) ve aralarındaki mesafe değiştirilerek ($A_r=0.196, 0.087, 0.049, 0.031$ ve 0.022) çok sayıda sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, kayma gerilmesi/gerinimi ve aşırı boşluk suyu basıncı oranı değişimi üzerinden değerlendirilmiştir.

4.1) Kayma Gerilmesi ve Kayma Geriniminin Değişimi

Jet grout kolonların imalatından sonra elde edilen zemin, iyileştirilmiş zemin olarak tanımlanmıştır. Şekil 4b'de gösterilen ivme-zaman kaydı kullanılarak, zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde; hem jet grout kolonlarda hem de iyileştirilmiş zeminde kayma gerilmelerinin ve kayma gerinimlerinin zamana göre değişimi elde edilmiştir.

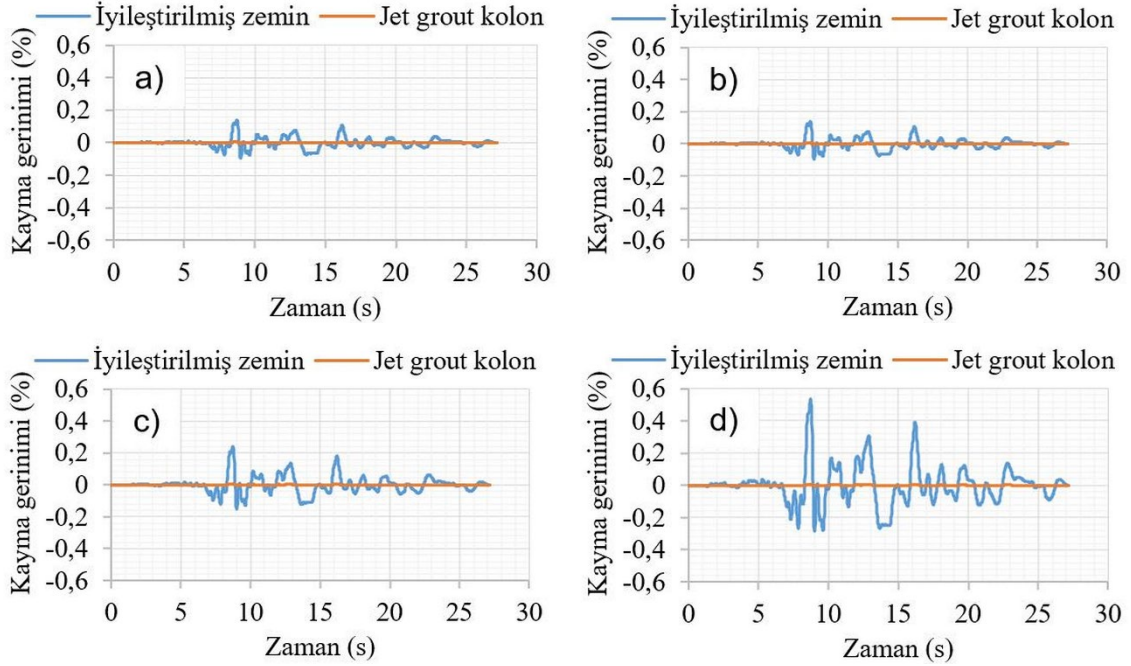


Şekil 6: Farklı derinliklerdeki kayma gerilmelerinin zamana göre değişimi; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m
 Figure 6: Variation shear stress with time at different depths; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m

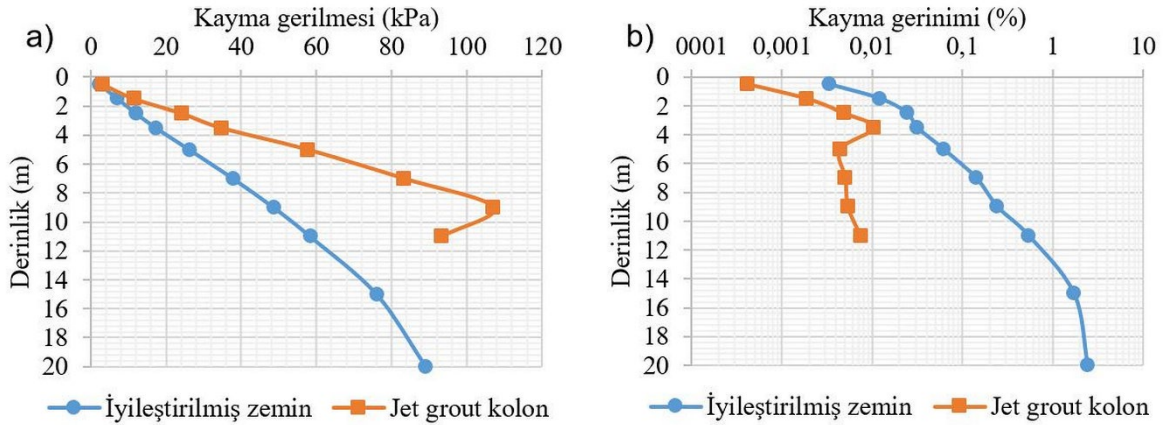
Örnek olarak, $G_r=20$ ve $A_r=0.196$ durumunda (mevcut projede uygulanan) kayma gerilmelerinin ve kayma gerinimlerinin zamana göre değişimi sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. Yeraltı su seviyesinin 3 m'de gözlenmesi ve sıvılaşmanın bu derinliğin altında oluşması nedeniyle 5 m, 7 m, 9 m ve 11 m derinlikte elde edilen kayma gerilmeleri/gerinimleri gösterilmiştir.

Jet grout kolonlar, zeminden daha rijit oldukları için onları çevreleyen zemine kıyasla oluşan kayma gerilmelerinin büyük bir kısmını taşımaktadır. Ancak yüksek rijitlikleri nedeniyle zemine göre daha düşük kayma gerinimleri göstermişlerdir. Zeminde ve jet grout kolonlarda oluşan kayma gerilmelerinin/gerinimlerinin değişimini daha iyi inceleyebilmek için belirli derinliklerde maksimum kayma gerilmeleri/gerinimleri hesaplanmıştır. Buna göre $G_r=20$ ve $A_r=0.196$ durumunda (mevcut projede uygulanan) maksimum kayma gerilmeleri ve kayma gerinimlerinin derinlikle değişimi Şekil 8'de sunulmuştur. Daha rijit oldukları için jet grout kolonlar her derinlikte zeminden daha çok kayma gerilmesini üzerine çekmiş ancak yine aynı nedenden dolayı daha düşük kayma gerinimi göstermiştir.

Jet grout kolonların kayma modüllerinin ve aralıklarının sıvılaşmayı önlemedeki etkinliğini daha iyi inceleyebilmek için her farklı özelliklere sahip jet grout kolonlu durumda, Denklem (7)'de belirtilen kayma gerilmesi azaltma faktörü (S_R) hesaplanmıştır. Sıvılaşma; yeraltı su seviyesinin altında (3 m) beklendiği ve jet grout kolonların boyu 11 m olduğu için, bu azaltma faktörü, 5 m, 7m, 9 m ve 11 m derinlikte hesaplanmıştır. Kayma gerilmesi azaltma faktörünün düşük olması, zeminin daha az kayma gerilmesine maruz kaldığı anlamına gelmektedir.

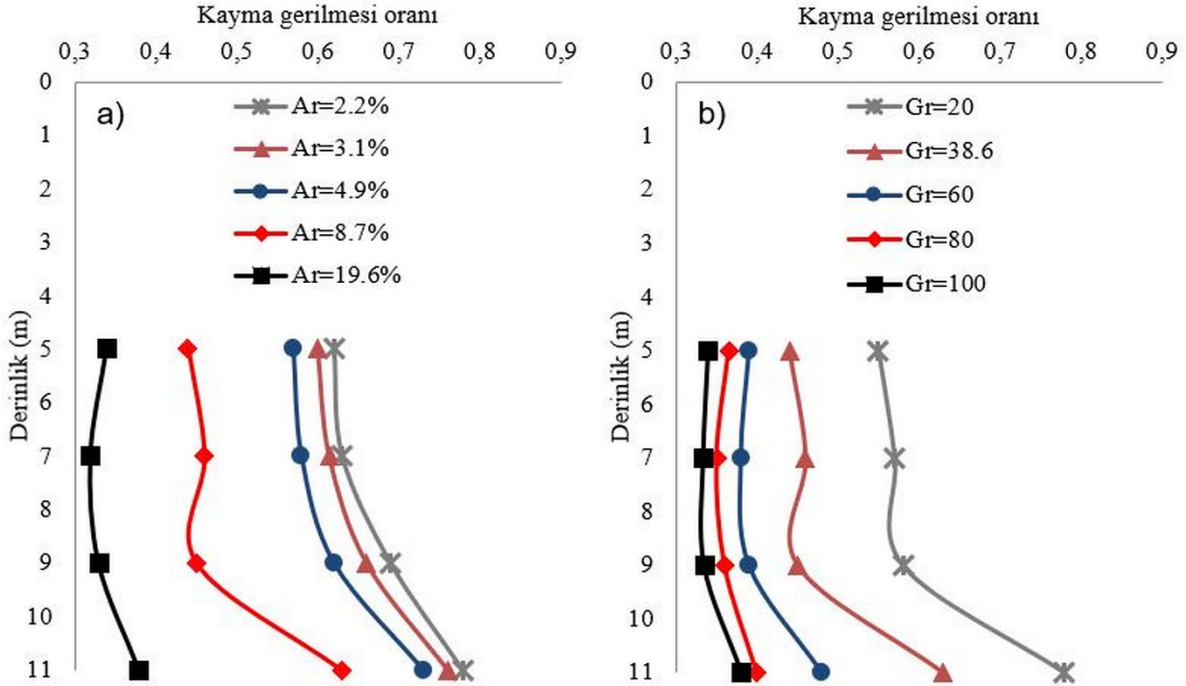


Şekil 7: Farklı derinliklerdeki kayma gerinimlerinin zamana göre değişimi; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m
Figure 7: Variation shear strain with time at different depths; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m



Şekil 8: Kayma parametrelerinin derinlikle değişimi; a) kayma gerilmesi, b) kayma gerinimi
Figure 8: Variation of shearing with the depth, a) shear stress, b) shear strain

Örneğin; kayma modül oranının sabit olduğu ($G_R=38.6$) jet grout kolonlu bir durumda farklı alan oranları için S_R değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 9a'da gösterilmiştir. Buna göre, alan oranı arttıkça S_R azalmaktadır. Alan oranındaki değişimin az olduğu ($A_R = \%2.2 - 4.9$) bu etki çok belirgin olmasa da alan oranı $\%19.6$ iken bu faktör 0.3-0.4 mertebelerine kadar düşmektedir. Sonuç olarak, alan oranı arttıkça zeminde oluşan kayma gerilmelerinin azaldığı gözlenmiştir.



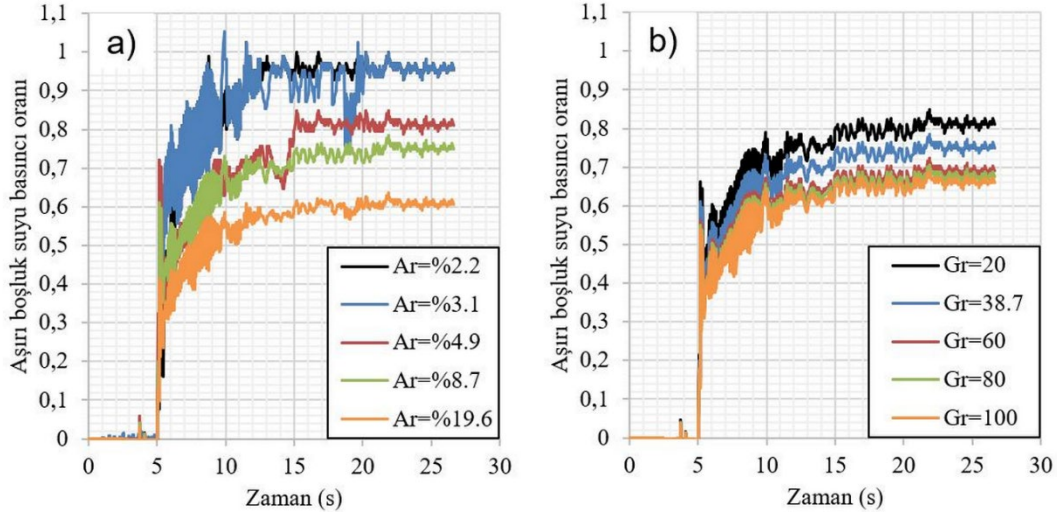
Şekil 9: Kayma gerilmesi azaltma faktörünün derinlikle değişimi; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$
 Figure 9: Variation of shear reduction factor with the depth; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$

Jet grout kolonların $S=3B$ aralıklarla yerleştirildiği, alan oranının 0.087 olduğu durumda ise kayma modül oranlarının değişiminin S_R üzerindeki etkisi Şekil 9b'de gösterilmiştir. Beklenildiği üzere jet grout kolonların rijitliği arttıkça zeminin maruz kaldığı kayma gerilmeleri azalmaktadır. G_R değeri belirli bir eşik değere ulaşına kadar zemindeki kayma gerilmeleri belirgin bir şekilde azalmaktadır. $G_R=60, 80$ ve 100 durumlarında ise kayma gerilmesi azaltma faktörü çok değişmemektedir. Sonuç olarak, belirli bir eşik değer üzerinde rijitlikteki jet grout kolonların daha sık yerleştirilmesi durumunda sıvılaşmayı önlemede daha etkili olacağı görülmektedir.

4.2) Boşluk Suyu Basıncının Değişimi

Bölüm 4.1'de jet grout kolonların rijitliği ve aralarındaki mesafeye göre sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, zemindeki kayma gerilmelerini azaltması üzerinden değerlendirilmiştir. Ancak zemindeki kayma gerilmeleri azalsa dahi sıvılaşmanın oluşup oluşmadığını belirlemek için aşırı boşluk suyu basıncı oranının (r_u) belirlenmesi oldukça önemlidir.

MIDAS GTS NX programı kullanılarak, zaman tanım alanında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, verilen dinamik yük süresince aşırı boşluk suyu basınçları kaydedilmiştir. Örnek olarak $G_r=38.6$ durumunda farklı alan oranları için, $A_r=0.087$ durumda farklı kayma modülü oranları için aşırı boşluk suyu basıncı oranının (r_u) zamana göre değişimi Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 10a'da görüldüğü üzere, alan oranı arttıkça r_u azalmaktadır. Alan oranı %2.2-3.1 mertebelerindeyken jet grout olmasına karşın r_u değeri hareketin 15'inci saniyesinden itibaren 1'e yaklaşmakta ve teorik olarak sıvılaşma meydana gelmektedir. Alan oranı %19.7 iken r_u , en fazla 0.6 mertebelerinde değişmektedir. Şekil 10b'de görüldüğü üzere kayma modül oranı değişse dahi r_u değerleri nispeten küçük bir aralıkta değişmektedir. Her ne kadar rijitlik arttıkça r_u azalsa da jet grout kolonlarının rijitliğinin değişimi aşırı boşluk suyu basıncı oranını çok etkilememektedir. Jet grout kolonlar, sıvılaşma durumunda kayma gerilmelerini azaltsa da sıvılaşma yine de meydana gelmektedir. Benzer bir sonuç Özener ve diğ. (2015) tarafından da rapor edilmiştir.



Şekil 10: Aşırı boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$
 Figure 10: Variation of excess porewater pressure ratio with time; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, sıvılaşma potansiyeli olan bir arazinin sıvılaşma riski analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analizleri ile ortaya konmuştur. MIDAS GTS NX programı kullanılarak yapılan dinamik analizlerde, UBCSAND bünye modeli kullanılarak zemin modellenmiş, sıvılaşma tehlikesini bertaraf etmek için jet grout kolon imalatı önerilmiştir. Yüksek rijitlikteki bu kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, rijitlikleri ve aralarındaki mesafe değiştirilerek incelenmiştir. Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sıvılaşma gibi dinamik yüklemeler esnasında ve sonucunda zeminin lineer olmayan davranışını ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu incelemek için UBCSAND zemin bünye modeli kullanılabilir.
- Yüksek rijitlikteki jet grout kolonlar, deprem yer hareketi sırasında zemine göre daha çok kayma gerilmelerine maruz kalsa da yüksek rijitlikleri nedeniyle zemine göre daha az kayma gerinimi göstermiştir.
- Jet grout kolonların arasındaki mesafe azaldıkça (alan oranı arttıkça) zeminin maruz kaldığı kayma gerilmesi de azalmaktadır. Böylelikle sıvılaşmanın neden olabileceği deformasyonlar da azalmaktadır.
- Jet grout kolonların rijitliği arttıkça zemindeki kayma gerilmeleri azalmaktadır. Ancak belirli bir eşik değerden sonra ($G_R=60$) rijitlik artışı kayma gerilmelerinin değişimini çok etkilememektedir.
- Jet grout kolonların rijitliği artırılıp ve aralarındaki mesafe azaltılsa dahi aşırı boşluk suyu basıncı oranı çok etkilenmemekte ve sıvılaşma meydana gelmektedir. Bu bakımdan, jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemekten ziyade neden olduğu kayma gerilmelerini azalttığından bahsedilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından 18/001 numaralı "Jet-Grout Kolonların Zemin İyileştirme Verimliliğinin Belirlenmesi Adına Bir Vaka Analizi" başlıklı proje ile desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne desteğinden dolayı teşekkür ederiz. Ayrıca araştırmaya konu olan inceleme alanının verilerini bizlerle paylaşan İnş. Müh. Turgay Erdoğan'a da teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Adalier K., Elgamal A., Meneses J., Baez J.I., 2003. Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23, 571-584

AFAD, 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. Erişim adresi: <http://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>

AFAD, 2021. 1900-20xx Deprem Kataloğu (M >= 4.0). Erişim adresi: <http://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>

Almani Z.A., Memon A.A., Habib A.F., Lal K., Shah S.F., 2013. 3D numerical modelling of liquefaction-induced settlements and its mitigation, *Sindh University Research Journal (Science Series)* 45(2), 301-304

Askan A., Karimzadeh S., 2019. Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde olası deprem senaryoları için benzeştirilmiş bir kuvvetli yer hareketi veri tabanı, *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 1(1), 76-97

Baez J.I., 1995. A design model for the reduction of soil liquefaction by using vibro-stone columns, PhD Thesis, University of Southern California, Los Angeles, 207 p.

Beaty M.H., Byrne P.M., 1998. An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE* 75(1), 766-777

Beaty M.H., Byrne P.M., 2000. A synthesized approach for predicting liquefaction and resulting displacements, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 30 January-4 February 2000, Auckland-New Zealand, Erişim adresi: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1589.pdf>

Beaty M.H., Byrne P.M., 2011. UBCSAND constitutive model version 904aR, Itasca UDM, Erişim adresi: <https://docplayer.net/84675337-Ubcsand-constitutive-model-version-904ar.html>

Bowles J.E., 1997. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill, Singapore, 1168 p.

Bruce D.A., Bruce, M.E.C., 2003. The practitioner's guide to deep mixing, Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, 10-12 February 2003, New Orleans-USA, Erişim adresi: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40663%282003%2922>

Byrne P.M., Park S.S., Beaty M., Sharp M.K., Gonzalez L., Abdoun T., 2004. Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests, *Canadian Geotechnical Journal* 41(2), 193-211

Chang S.E., 2000. Disasters and transport systems: loss, recovery and competition at the Port of Kobe after the 1995 earthquake, *Journal of Transport Geography* 8, 53-65

Dawson E.M., Roth W.H., Nesarajah S., Bureau G., Davis C.A., 2001. A practice-oriented pore pressure generation model, 2nd International FLAC Symposium, 29-31 May 2001, Lyon-France, Erişim adresi: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003077527-9/practice-oriented-pore-pressure-generation-model-dawson-roth-nesarajah-bureau-davis>

Finn W.D.L., Yogendrakumar M., Yoshida N., Yoshida H., 1986. TARA-3: A program to compute the response of 2D embankments and soil-structure interaction systems to seismic loadings, University of British Columbia, Vancouver-USA

Galavi V., Petalas A., Brinkgreve R.B.J., 2013. Finite element modelling of seismic liquefaction in soils, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA* 43(3), 55-64

Hausler E.A., Sitar N., 2001. Performance of soil improvement techniques in earthquakes, 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 28 March 2001, California-USA,

Erişim adresi: <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1807&context=icrageesd>

Ishihara K., Yoshimine M., 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundation* 32 (1), 173-188

Martin J.R., Olgun C.G., Mitchell J.K., Durgunoglu H.T., 2004. High-modulus columns for liquefaction mitigation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 30(6), 561-571

Mısır G., 2020. Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme ve deplasman tahmini: Vaka analizi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 18, 290-299

Mogami T., Kubo K., 1953. The behaviour of soil during vibration, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 16-17 August 1953, Switzerland,

Erişim adresi: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/42/1953_01_0034.pdf

Moseley M.P., Kirsch K., 2004. Ground Improvement, Spon Press-Taylor & Francis, Oxford, U.K., 431 p.

Nishimatsu Y., 1972. The mechanics of rock cutting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 9(2), 261-270

Olgun C.G., Martin J.R., 2008. Numerical modeling of the seismic response of columnar reinforced ground, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress IV, 18-22 May 2008, California-USA,

Erişim adresi: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40975%28318%29112>

Oral S.Ü., 2014. Effective stress based constitutive modelling and assessment of seismic pile-soil interaction in liquefiable soils, PhD Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Ankara, 284 p.

Özener P., 2007. Depremde tabakalı kum zeminde oluşan sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası davranışın model deneylerle araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 444 s.

Özener P., Dulger M., Berilgen M., 2015. Numerical study of effectiveness of jet-grout columns in liquefaction mitigation, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, New Zealand,

Erişim adresi: https://secure.tcc.co.nz/ei/images/ICEGE15%20Papers/Ozener_584.00.pdf

Özsoy B., Durgunoğlu T., 2003. Sıvılaşma etkilerinin yüksek kayma modüllü zemin-çimento karışımı kolonlarla azaltılması, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul, Erişim adresi: <https://www.zeminas.com.tr/docs/paperno42.pdf>

Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D., Dafalias Y.F., 2001. Plasticity model for sand under small and large cyclic strains, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 127(11), 973-983

Puebla H., Byrne P.M., Phillips R., 1997. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: Prototype and centrifuge models, *Canadian Geotechnical Journal* 34(5), 641-657

Scawthorn C., Johnson G.S., 2000. Preliminary report Kocaeli (Izmit) earthquake of 17 August 1999, *Engineering Structures* 22, 727-745

Seed H.B., Idriss I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 97(9) 1249-1273

Selçukhan O., Ekinci A., 2020. Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 23, 481-496

Sucuoglu H., 2019. 2019 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde Başlıca Yenilikler, *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 1(1), 63-75

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Ankara, Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>

Tonaroğlu M., 2006. Sıvılaşmanın nümerik yöntemlerle modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 134 s.

Unutmaz B., 2012. Numerical assessment of high-modulus columns on liquefaction triggering potential, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 32, 1312-1325

Wang Z.L., 1990. Bounding surface hypoplasticity model for granular soils and its applications, PhD Thesis, University of California, Davis, California, USA

Wood D.M., 1990. Soil Behaviour and critical state soil mechanics, Cambridge University Press, USA, 462 p.

Xanthakos P.P., Abrahamson L.W., Bruce D.A., 1994. Ground Control and Improvement, Wiley, New York, USA, 936 p.

Yoshida N., Tokimatsu K., Yasuda S., Kokusho T., Okimura T., 2001. Geotechnical aspects of damage in Adapazarı City during 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, *Soils and Foundation* 41(4), 25-45

Youd T.L., Hoose S., 1976. Liquefaction during 1906 San Francisco Earthquake, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE* 102(5), 425-439

Youd T.L., Idriss I.M., 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 127(10), 297-313.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Araştırmaya konu olan inceleme alanının verileri, İnş. Müh. Turgay Erdoğan'dan alınmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

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



Analysis of Traffic-Induced Ground Vibration in Highway Viaducts

Nida Erdem¹ and Emre Timur²

¹ Dokuz Eylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysical Engineering Buca 35160 Izmir, Türkiye

² Dokuz Eylul University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, Buca 35160 Izmir, Türkiye

ORCID: 0000-0002-6578-3347, 0000-0003-2084-7164

Keywords

Bornova, Microtremor, Traffic-induced vibration, Viaduct

Highlights

* Traffic-induced vibration analysis on the highway viaduct
* Day and night microtremor measurement on viaduct feet
* Night and day measurement frequencies are close to each other

Aim

Determination of traffic-induced ground vibration in highway viaducts using microtremor measurements

Location

This study has implemented in a field area of Bornova district of Izmir metropolitan city

Methods

Microtremor method, Nakamura technique, horizontal/vertical spectral ratio method

Results

Day-time dominant frequencies are lower than the frequencies obtained from night-time measurements due to the heavy traffic and the active metro line in the region

Supporting Institutions

The author(s) declared that this study has used no support data from other institutions

Financial Disclosure

The author(s) declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 30.07.2022

Revised: 20.10.2022

Accepted: 25.10.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1151176



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

Corresponding Author

Emre Timur

Email: emre.timur@deu.edu.tr

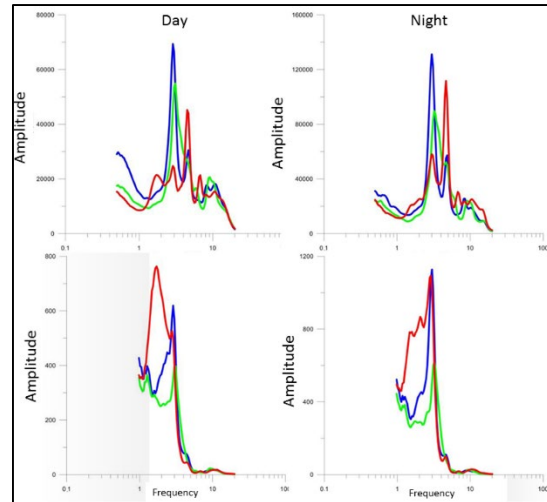


Figure
Spectrum of the component of data measured at 9th point during day and night times

How to cite:

Erdem N., Timur E., 2022. Analysis of Traffic-Induced Ground Vibration in Highway Viaducts, Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 230-245, <https://doi.org/10.46464/tdad.1151176>



Karayolu Viyadüklerindeki Trafik Kaynaklı Titreşimlerin Analizi

Nida Erdem¹ ve Emre Timur²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Programı, Buca 35160 İzmir, Türkiye

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Buca 35160 İzmir, Türkiye
ORCID: 0000-0002-6578-3347, 0000-0003-2084-7164

ÖZET

Bu çalışmada, deprem nedeniyle hasar oluşma tehlikesi bulunan yapılar üzerinde oluşabilecek titreşim kaynaklı zararların belirlenebilmesi amacıyla mikrotremor ölçümleri alınarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, hem karayolu hem de hafif raylı sistem trafiğinin yoğun olduğu İzmir İli, Bornova İlçesinde bulunan Bornova viyadüğü boyunca viyadük ayaklarında 13 farklı noktada ölçümler alınmıştır. Veriler, trafiğin yoğun olduğu gündüz saatlerinde ve sakin olduğu gece saatlerinde iki kez kaydedilmiştir. Alınan ölçümler değerlendirilerek, trafik kaynaklı titreşimlerin hem frekans spektrumu hem de H/V yöntemi ile gündüz ve gece ölçümleri arasındaki farklar incelenmiştir. Viyadükle aynı zemin özelliklerine sahip olan Ege Üniversitesi Merkez Yerleşkesi içinde çeşitli noktalarda alınan mikrotremor ölçümleri kullanılarak, zemin etkisi giderilmiş ve sadece yapının etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca belirlenen baskın frekansların çevre binalar üzerindeki olası etkisi de belirlenmiştir. Trafiğin yoğun olması ve bölgede bulunan metro hattının aktif olması nedeniyle gündüz ölçümlerinden elde edilen frekansların, gece ölçümlerinden elde edilen frekanslara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Bornova, Mikrotremor, Trafik kaynaklı titreşim, Viyadük

Öne Çıkanlar

- * Karayolu viyadüğünde trafik kaynaklı titreşim analizi.
- * Viyadük ayaklarında gece ve gündüz mikrotremor ölçümü yapılması.
- * Gece ve gündüz ölçüm frekanslarının birbirine yakın olması.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.07.2022
Düzeltilme: 20.10.2022
Kabul: 25.10.2022
Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1151176

Sorumlu yazar

Emre Timur
Eposta:
emre.timur@deu.edu.tr

Analysis of Traffic-Induced Ground Vibration in Highway Viaducts

Nida Erdem¹ and Emre Timur²

¹ Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geophysical Engineering Buca 35160 İzmir, Türkiye

² Dokuz Eylül University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, Buca 35160 İzmir, Türkiye
ORCID: 0000-0002-6578-3347, 0000-0003-2084-7164

ABSTRACT

In this study, microtremor measurements were performed and analysed in order to determine the vibration-induced damages that may occur on structures by carrying risk of damage due to earthquakes. In this context, 13 measurements were taken at different points of the viaduct feet along the Bornova viaduct located in Bornova district of İzmir province, where both dense highway and light rail system traffic is observable. Data were recorded twice during the daytime hours when the traffic was heavy and at night when it was calm. By evaluating the measurements taken, the differences between the frequency spectrum of traffic-induced vibrations and the H/V method between day and night measurements were examined. By using microtremor measurements taken at various points in the Central Campus of Ege University, which has the same ground characteristics as the viaduct, the ground effect was eliminated and only the effect of the structure was revealed. In addition, the possible effects of the dominant frequencies based on the surrounding buildings were also determined. It has been determined that the frequencies obtained from daytime measurements are lower than the frequencies obtained from nighttime measurements due to the heavy traffic and the active metro line in the region.

Keywords

Bornova, Microtremor, Traffic-induced vibration, Viaduct

Highlights

- * Traffic-induced vibration analysis on the highway viaduct.
- * Day and night microtremor measurement on viaduct feet.
- * Night and day measurement frequencies are close to each other.

Manuscript

Research Article

Received: 30.07.2022
Revised: 20.10.2022
Accepted: 25.10.2022
Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1151176

Corresponding Author

Emre Timur
Email:
emre.timur@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Birinci derece deprem bölgesi içinde yer alan İzmir ili, sismik risk araştırmaları açısından büyük önem taşımaktadır. İzmir Körfez'inin doğusunda olan, Bornova Ovası olarak adlandırılan bölgeyi oluşturan jeolojik birimler sağlam kayalardan oluşmamaktadır (Kıncal 2005). Dolayısıyla, olası bir depremde bölgedeki yapıların daha fazla zarar görmesi beklenebilir. Sadece doğal kaynaklı titreşimler (depremler) değil, yapay kaynaklı titreşimler de (trafik vb.) zaman içerisinde yapılara zarar verebilir. Bu gibi zararları araştırmak için çeşitli jeofizik yöntemler kullanılabilir.

Mikrotremor yöntemi; yapıların ve zeminin hâkim titreşim periyodunu elde etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemden elde edilen sonuçlarla; olası bir depremde oluşan titreşimler veya sürekli olan yapay kaynaklı gürültülerin oluşturduğu titreşimlerde, yapı ve zeminin rezonansa girmemesi için önlemler alınabilmektedir. Mikrotremorların genlikleri 0.1-1 mikron arasında, periyotları ise 0.05-2 sn arasında değişir. Mikrotremorların kaynağı da çeşitlilik gösterir. Araştırmacılara göre mikrotremorlar doğal kaynaklı çevresel titreşimler veya insan aktivitesi sonucu oluşurlar. 0.1-1 sn arası periyotlardaki mikrotremorların, rzėar, trafik, tren ve diğer endüstriyel aktivitelerle oluştuğu, orta periyotlu (0.3-0.5 Hz ve 1 Hz arasında) mikrotremorların deniz dalgalarının kıyıdaaki yayılımından kaynaklandığı, daha uzun periyotlu hareketlerin ise atmosferdeki alçak basınç-okyanus etkileşmesi ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Bütün bu etkenler yeryüzünde titreşim olarak algılanabilir. Mikrotremorların en önemli özelliği, bu tür titreşimlerin noktadan noktaya belirgin değişimler göstermesidir. Bu değişimler ölçülen yerin jeolojik özellikleri ile ilişkilidir. Mikrotremorlar ile zemin hâkim titreşim periyodu doğrudan elde edilebildiğinden önemi artan bir yöntemdir (Ates 2020, Bayrak ve diğ. 2021).

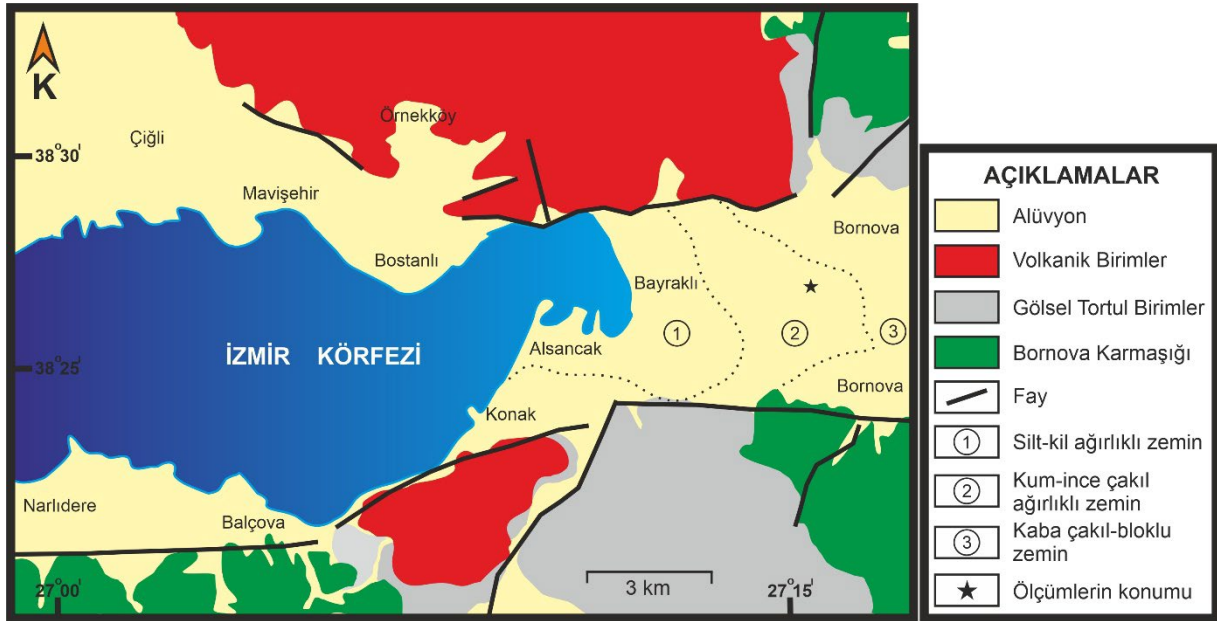
Bu alışma kapsamında, İzmir Körfezi'nin doğusunda kalan Bornova İlçesindeki, Bornova viyadüğünün zeminle birleşen ayaklarında mikrotremor ölçümleri alınmıştır. Viyadüğün bulunduğu bölgede şehir içi metro hattı da bulunmaktadır. Metronun aktif olduğu saatlerde oluşturduğu titreşim ve viyadükten geçen araçların oluşturduğu titreşimler oldukça etkilidir. Bu titreşimler yakınında bulunan yapılara zaman içerisinde zarar verebilmektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler GEOPSY programı ile değerlendirilerek H/V spektrumları ve K-G, D-B ve düşey bileşen spektrumları elde edilmiştir. Trafik'in yoğun olduğu saatlerde alınan ölçümlerin sonuçları ile durağan saatlerde alınan ölçümlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda ise çalışma alanında oluşan yapay kaynaklı titreşimler hakkında fikir elde edilmiştir. Elde edilen frekans spektrumlarının tüm bileşenleri, viyadük ile benzer zemin özelliklerine sahip olan Ege Üniversitesi Merkez Kampüs alanı içinde alınan mikrotremor ölçümleri kullanılarak elde edilen ortalama spektruma oranlanmış ve zemin etkisinin giderilmesi amaçlanmıştır.

1.1) Genel Jeoloji

Çalışma alanı, Bornova (İzmir) Grabeni zerindeki yamaç molozu ve ağırlıklı olarak gözlenen alüvyonlar üzerinde yer almaktadır. Yamaç molozları, temel kayalardan türeme blok ve çakılların silt ve kil içerikli kum matriks içinde bulunduğu bir malzeme özelliği sunmaktadır. Bu zeminin özelliği, üzerinde bulunduğu ana kayanın özelliklerine göre de değişmektedir. Marnlar üzerinde yer alan yamaç molozlarının matriksi silt-kil ierikliyken, çakıl-taşlarının üzerinde yer alanların matriksi ince-orta kum boyutuna sahip malzemelerden oluşmaktadır. Yamaç molozları arazi genelinde, eğimin nispeten düşük olduğu alanlarda ve derelerle sınırlı alanlarda gözlenmiştir (regel 2019). Araştırmanın yapıldığı Bornova Grabeni, batıda denize açılan basit bir dağ arası havza tabanı özelliği taşımaktadır. Ancak alüvyal morfoloji dikkatli incelendiğinde, bu taban üzerinde zemin özellikleri farklı bölümlerin bulunduğu dikkati çekmektedir (Kayan 2000). Bunlar, Bornova'ya inen derelerin hidro-jeomorfolojik özellikleri ile ilgilidir. Dağ yamaçlarından inen kk dereler dışında, Bornova'ya gelen üç büyük dağ deresi bulunmaktadır. Bu üç büyük akarsu, ovada  büyük birikinti konisini oluşturur. Bunlar,

kuzeyden ve güneyden ova ortasına uzanarak tabanı daraltır ve çok silik bir morfoloji ile ova tabanını doğu ve batı olarak ikiye ayırmaktadır. Bornova birikinti konisi batısına ulaşan alüvyonlar az ve ince olduğundan denize doğru fazla ilerleyememiştir (Şekil 1) (Kıncal 2005).



Şekil 1: Bornova ovası ve çevresinin alüvyal jeomorfoloji haritası (Kıncal, 2005'ten geliştirilmiştir)
Figure 1: Alluvial geomorphology map of Bornova plain and its surroundings (modified from Kıncal, 2005)

1.2) Depremsellik

Mevcut deprem kataloglarındaki bilgiler ve bilimsel çalışmalar, Ege Bölgesi depremselliğinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Bayrak ve Bayrak 2012). Deprem odak dağılımları, daha önceki büyük depremlerin mekanizmaları ile sürmekte olan deniz jeolojisi ve deniz jeofiziği araştırmaları, bölgenin normal/doğrultu atımlı bileşene sahip faylardan oluşan bir tektonik sistem denetiminde aktif hale gelebileceğini göstermektedir.

Deprem, İzmir ili tarihinde önemli bir yer tutar ve geçmişteki büyük depremlerin izlerini bugün hem jeolojik ortamda hem de tarihsel kent dokusu içinde izlemek olanaklıdır. İzmir ve civarında tarihsel ve aletsel dönemde yoğun deprem aktivitesi görülmektedir. İzmir şehri ve Bornova ilçesi, tarihten günümüze yakın çevresinde meydana gelen birçok büyük depremden etkilenmiştir. 20.03.1389 Sakız Adası depremi, 10.07.1688 İzmir Körfezi depremi, 4 ay aryla meydana gelen 12.05.1852 ve 08.09.1852 İzmir depremleri, bu kapsamda hasar yaratan önemli depremlerdir (Altınok ve Ersoy 2000). Özellikle 03.04.1881 Sakız Adası depremi ($M_w=6.5$) Çeşme kıyılarında etkili olmuş, ilçenin bazı yerleşim alanlarında $I_0=9$ şiddetinde hissedilmiştir (Altınok ve diğ. 2005). Yakın tarihte ise, Orta ve Güney Ege'de meydana gelen 12.06.2017 ($M_w=6.2$) Karaburun-Midilli (DEÜ 2017) ve 21.07.2017 ($M_w=6.5$) Bodrum-Kos (Dogan ve diğ. 2019) depremlerinde yerel ölçekte tsunamiler oluşmuş, can kaybına yol açmamakla birlikte maddi hasarlar meydana gelmiştir. Ancak 30 Ekim 2020 $M_w=6.9$ Sisam Adası-İzmir Depremi, Bornova'da alüvyal birimler üzerindeki birçok binanın yıkılmasına neden olmuş, biri tsunamiden olmak üzere toplam 117 kişi yaşamını yitirmiş, 1000'den fazla yaralanma oluşmuştur. Bu depremde İzmir kıyılarında 3.8 m tırmanma yüksekliğine ulaşan tsunami de yaşanmıştır (Dogan ve diğ. 2021).

2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında toplanan mikrotremor verileri, yatay/düşey spektral oran yöntemi olan Nakamura Yöntemi (Nakamura 1989) ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda GEOPSY yazılımı 3.3.2 sürümü (GEOPSY 2005, Wathelet ve diğ. 2020) kullanılmıştır. Nakamura yönteminde mikrotremorların sınırlı ortam üzerinde yer alan tek bir tabakada yayılan Rayleigh dalgaları olduğu varsayımı yapılır. Nakamura yöntemine göre yapılan analizlerde baskın periyotlar büyük bir yaklaşıklıkla belirlenebilir. Yöntem kullanılırken yapılacak bazı veri işlem aşamaları vardır. Bu veri işlem aşamaları, zeminin jeolojisi ve çevredeki yapıların etkisi düşünülerek en doğru yorumlama yapılması için daha önce örnek veri kullanılarak uygulanmıştır. İncelemeden elde edilen yaklaşımlarla, çalışmada alınan ölçümler daha sağlıklı değerlendirilmiştir.

Yatay/Düşey spektral oran yöntemi Japonya'da çeşitli yerlerde alınan kuvvetli yer hareketi kayıtları kullanılarak bulunmuştur. Yöntemin temeline bakıldığında, Nakamura'ya göre mikrotremorları oluşturan Rayleigh türü dalgalardır ve bunlar yüzey kaynakları tarafından yaratılır. Bu dalga türü tabakalı bir ortamda hem yatay hem de düşey hareketlerden eşit şekilde etkilenmektedir. Nakamura (1989) mikrotremorların derinden değil, yüzeyden ve yüzeye yakın yersel, sismometreye yakın noktalardan gelen titreşimlerden (trafik, şehir gürültüleri vb.) oluştuğunu varsaymakta ve derinden kaynaklanan katkıları ihmal etmektedir. Yönteme göre gürültü titreşimlerinin düşey bileşenleri zemin tabakalarından etkilenmez. Buna karşılık yatay bileşenler, zemin tabakalarının sahip olduğu düşük hız ve yoğunluğa bağlı önemli büyütmeleme uğrar. Böylece yatay bileşen kayıtların spektrumlarının düşey bileşen kayıtların spektrumlarına oranlanması zemin transfer fonksiyonunun elde edilmesini sağlar. Yöntem, mikrotremorları yarı sonsuz ortam üzerine uzanan tek tabakalı bir ortamda yayılan Rayleigh dalgaları yaklaşımı ile açıklamaya çalışır. Fourier frekans bölgesinde dört adet genlik spektrumu tanımlanmaktadır. Bunlar yüzeydeki hareketin yatay ve düşey doğrultudaki bileşenlerine (HS, VS) ait genlik spektrumları ve üstteki yüzey tabakasının tabanındaki hareketin yatay ve düşey doğrultudaki bileşenlerine (HB, VB) ait genlik spektrumlarıdır.

Bu çalışma kapsamında, İzmir Körfezi'nin doğusunda kalan Bornova ilçesindeki, Bornova viyadüğünün zeminle birleşen ayaklarında gündüz ve gece mikrotremor ölçümleri alınmıştır. Viyadüğün bulunduğu bölgede şehir içi metro hattı da bulunmaktadır. Metronun aktif olduğu saatlerde oluşturduğu titreşim ve viyadükten geçen araçların oluşturduğu titreşimler oldukça etkilidir. Bu titreşimler yakınında bulunan yapılara zaman içerisinde zarar verebilmektedir. Trafiğin yoğun ve metronun aktif olduğu saatlerde (gündüz) alınan mikrotremor ölçümleri ile trafiğin durağan ve metronun çalışmadığı saatlerde (gece) alınan mikrotremor ölçümleri değerlendirilerek, titreşimlerin oluşturduğu hâkim periyotlar elde edilmiştir. Ayrıca gece ölçümlerinden elde edilen titreşim kayıtlarından en durağan olan veri kaydı değerlendirilerek zeminin hakim titreşim periyodu elde edilmiştir. Elde edilen periyotlar kıyaslanarak metro ve viyadükten geçen araçların oluşturduğu trafik kaynaklı titreşimlerin etkileri gözlenmiştir.

3. VERİ

Araştırma kapsamında kullanılan veriler, İzmir ili, Bornova ilçesi şehir içi metro hattının da bulunduğu karayolu viyadüğünde alınmıştır. Gündüz, trafiğin yoğun ve metro hattının aktif olduğu saatlerde oluşan titreşimin büyüklüğü ile gece, trafiğin durgun ve metro hattının pasif olduğu saatlerdeki titreşimin büyüklüğü mikrotremor yöntemi ile ölçülerek çevrede bulunan yapılara etkisi incelenmiştir (Şekil 2).

(a)



(b)



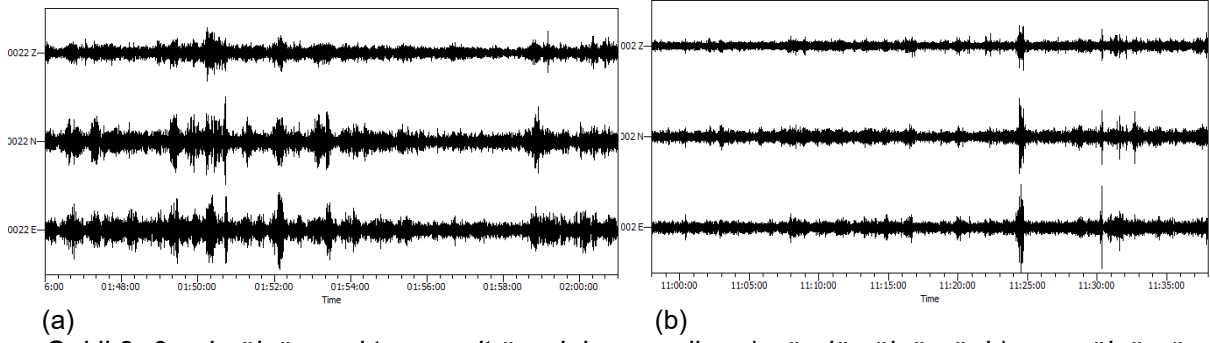
(c)



Şekil 2: a) İzmir ili, Bornova ilçesinde bulunan karayolu viyadüğünün konumu ve çalışma alanının uydu görüntüsü, b) Gece, c) Gündüz mikrotremor ölçümleri

Figure 2: Satellite view of the study area and the location of the highway viaduct in Bornova district of Izmir city, Microtremor measurements during b) Night, c) Day times

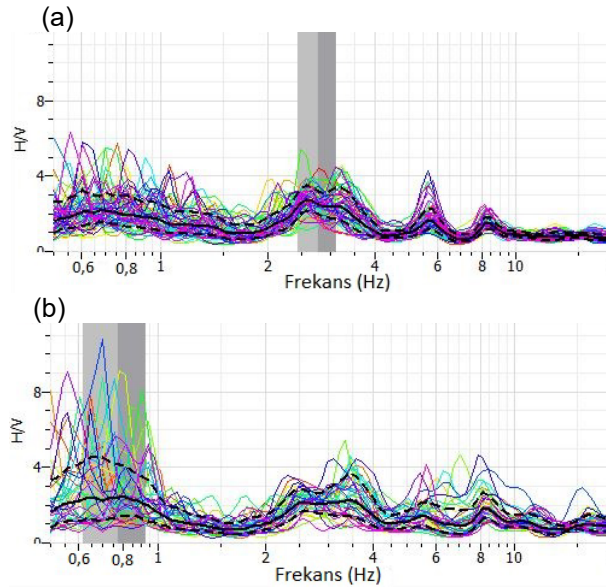
Arazi ölçümlerinden elde edilen mikrotremor verileri, öncelikle bilgisayara okutulmuş ve ardından tüm bileşenler sıfır ortalamaya indirgenmiştir. Spektrum ortamındaki verilere Band pass filtresi uygulanıp 0.50-10 Hz arasındaki sinyaller değerlendirilmeye alınmıştır. Konno ve Ohmachi yuvarlatma tekniği uygulanmış ve yuvarlatma bant girişi 40 olarak alınmıştır. Verilere Kosinus penceresi uygulanarak verilerin köşeleri yüzde 10 oranında yuvarlatılmıştır. Pencere boyu 20 sn seçilmiştir. Bu işlemler sonucunda uygulanan Hızlı Fourier dönüşümü ile veriler frekans ortamına geçirilerek, yatay/düşey (H/V) bileşen oranları GEOPSY programı ile hesaplanmış ve çizdirilmiştir (Erdem 2016). Viyadüğün ortasındaki 6 nolu ölçü noktasına ait gündüz ve gece saatlerinde alınan örnek ham veriler Şekil 3'te sunulmuştur.



(a) (b)
Şekil 3: 6 nolu ölçüm noktasına ait örnek ham veriler a) gündüz ölçümü, b) gece ölçümü
Figure 3: Raw data of 6th measurement station a) day time, b) night measurement

4. BULGULAR

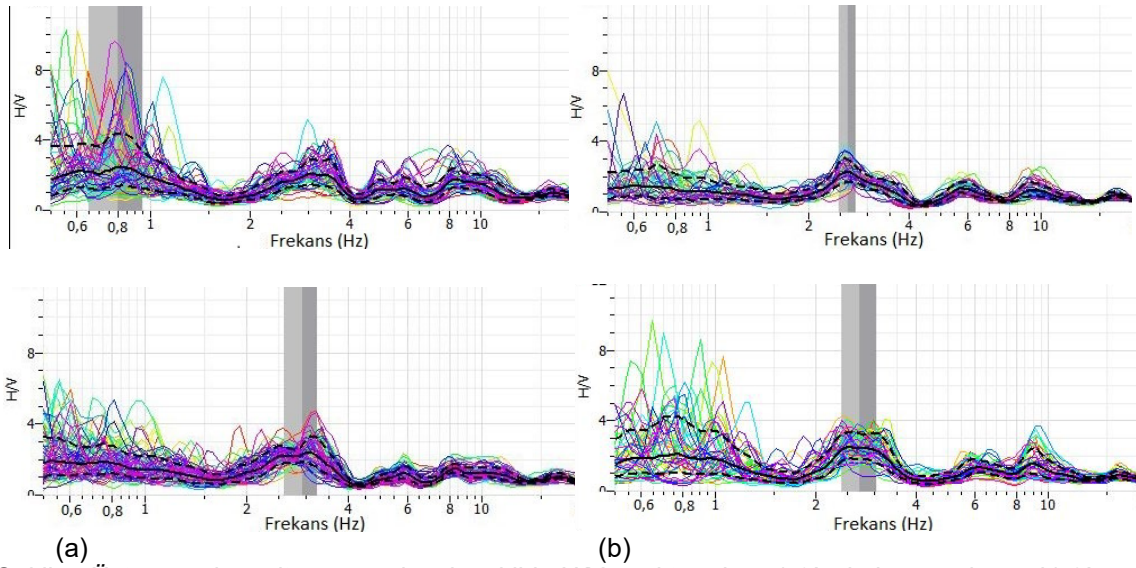
Gece ve gündüz alınan mikrotremor ölçümüne ait örnek ayrıntılı görsel Şekil 4'te verilmiştir. 1'inci ölçüm noktasında gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 2-4 Hz, 6 Hz, 8 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekansları 0.6-0.9 Hz, 2-4 Hz ve 8 Hz olan genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin Kuzey-Güney (K-G), Doğu-Batı (D-B) ve Düşey (Z) bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 1.5-3.5 Hz, 5 Hz, 7 Hz; K-G bileşeninde 2-4 Hz, 4-8 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 5 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise, düşey bileşende 2-4 Hz, 5 Hz, 7 Hz; K-G bileşeninde 2-6 Hz; D-B bileşeninde ise 2.7 Hz, 4.3 Hz, 6-10 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür.



Şekil 4: 1.ölçüm noktasına ait H/V spektrumları a) gündüz, b) gece
Figure 4: H/V spectrums for the 1st measurement point a) daytime, b) night

Diğer ölçüm alınan noktaların veri değerlendirmeleri incelendiğinde, noktalara ait baskın frekanslar gözlenmiştir. 2'nci ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde; 2-4 Hz, 6 Hz, 8 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise 0.5 -1.5 Hz, 1.5-4 Hz, 4-7 Hz, 7-13 Hz frekanslarda genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde; düşey bileşende 2-3.5 Hz, 4.2 Hz, 6-8 Hz; K-G bileşeninde 2-4 Hz, 4-5 Hz, 5-7 Hz; D-B bileşende ise 3 Hz, 4.5 Hz, 6-9 Hz frekanslarında yüksek genlikler gözlenmiştir. Gece alınan

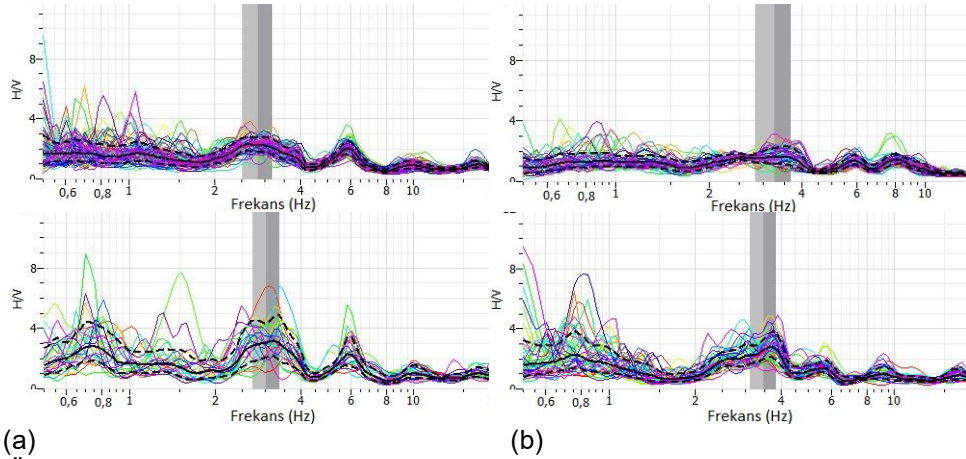
verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2-4 Hz, 4.3 Hz, 6-10 Hz; K-G bileşende 2-4 Hz, 4-6 Hz, 8-10 Hz; D-B bileşeninde ise 2.8 Hz, 4- 6 Hz, 6-10 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 5a). 3'üncü ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 2.6 Hz, 6 Hz, 10 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekanslar 2.7 Hz, 4-8 Hz, 9 Hz olarak gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 2- 4 Hz, 4.3 Hz, 6-9 Hz; K-G bileşeninde 3.2 Hz, 4-8 Hz, 8-15 Hz; D-B bileşeninde ise 2.7 Hz, 4.5 Hz, 6-12 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2-3.5 Hz, 4.5 Hz, 6-10 Hz; K-G bileşeninde 3 Hz, 3.5-5 Hz, 5-8 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4-6 Hz, 6-12 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 5b).



Şekil 5: Üstte gündüz, altta gece olacak şekilde H/V spektrumları a) 2'nci ölçüm noktası, b) 3'üncü ölçüm noktası

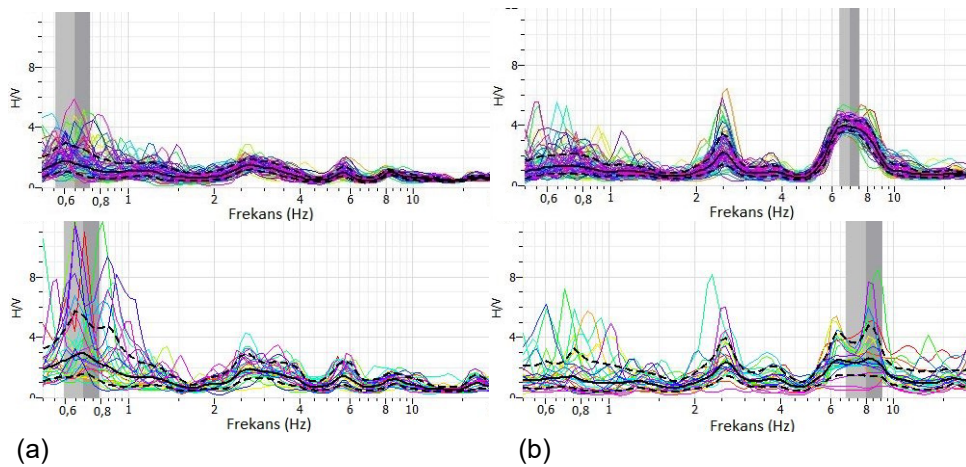
Figure 5: H/V spectrums for the day on the top, and night at the bottom a) 2nd measurement point, b) 3rd measurement point

4'üncü ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 3 Hz, 6 Hz, frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise 0.5-0.9 Hz, 3 Hz, 6 Hz frekanslı genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 2- 4 Hz, 4.7 Hz; K-G bileşeninde 2-8 Hz, 8-15 Hz; D-B bileşeninde ise 2-7 Hz, 5 Hz aralığında frekanslar görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2-4 Hz, 5 Hz, 6-10 Hz; K-G bileşeninde 2-4 Hz, 4-8 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 5 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 6a). 5'inci ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 1.5-4.5 Hz, 6 Hz, 8 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise 1.5-4.5 Hz, 4.5-7 Hz, 7-13 Hz frekanslarında genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 2.7 Hz, 4.6 Hz; K-G bileşeninde 2-5 Hz, 5-8 Hz 8-15 Hz; D-B bileşeninde ise 2.8 Hz, 4.7 Hz, 6-10 Hz frekanslarında genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2-4 Hz, 4.6 Hz, 6-8 Hz; K-G bileşeninde 2-6 Hz, 6-8 Hz, 8-15 Hz; D-B bileşeninde ise 2.8 Hz, 4-6 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 6b).



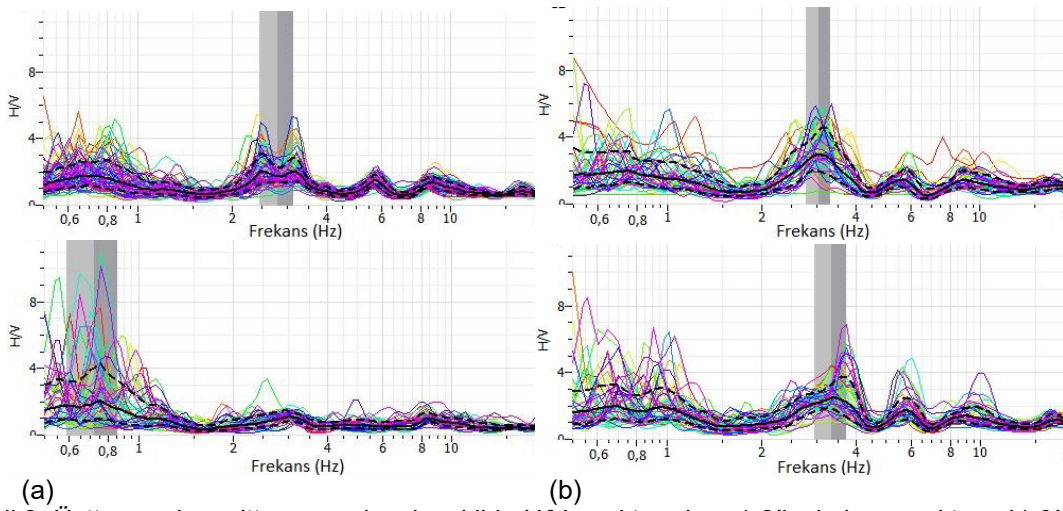
(a) (b)
Şekil 6: Üstte gündüz, altta gece olacak şekilde H/V spektrumları a) 4'üncü ölçüm noktası, b) 5'inci ölçüm noktası
Figure 6: H/V spectrums for the day on the top, and night at the bottom a) 4th measurement point, b) 5th measurement point

6'ncı ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 0.5-0.8 Hz, 2-4 Hz, 5.8 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise, frekansları 0.5-1.5 Hz, 3 Hz, 6 Hz olan genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 2.7 Hz, 4.6 Hz, 7 Hz; K-G bileşeninde 2-4 Hz, 6 Hz 8-15 Hz; D-B bileşeninde ise frekansları 2.7 Hz, 4.6 Hz, 6-15 Hz olan genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2-4 Hz, 4-6 Hz, 7 Hz; K-G bileşeninde 2-4 Hz, 4-8 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 5 Hz, 6-10 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 7a). 7'nci ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 2.6 Hz, 7 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise, frekansları 2.7 Hz, 5-12 Hz, olan genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 4-6 Hz, 7 Hz, 10 Hz; K-G bileşeninde 2.6 Hz, 7 Hz 10 Hz; D-B bileşeninde ise 7 Hz frekanslı genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 4.7 Hz, 7 Hz, 8-15 Hz; K-G bileşeninde 2.8 Hz, 4-6 Hz, 8-12 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 7 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 7b).



(a) (b)
Şekil 7: Üstte gündüz, altta gece olacak şekilde H/V spektrumları a) 6'ncı ölçüm noktası, b) 7'nci ölçüm noktası
Figure 7: H/V spectrums for the day on the top, and night at the bottom a) 6th measurement point, b) 7th measurement point

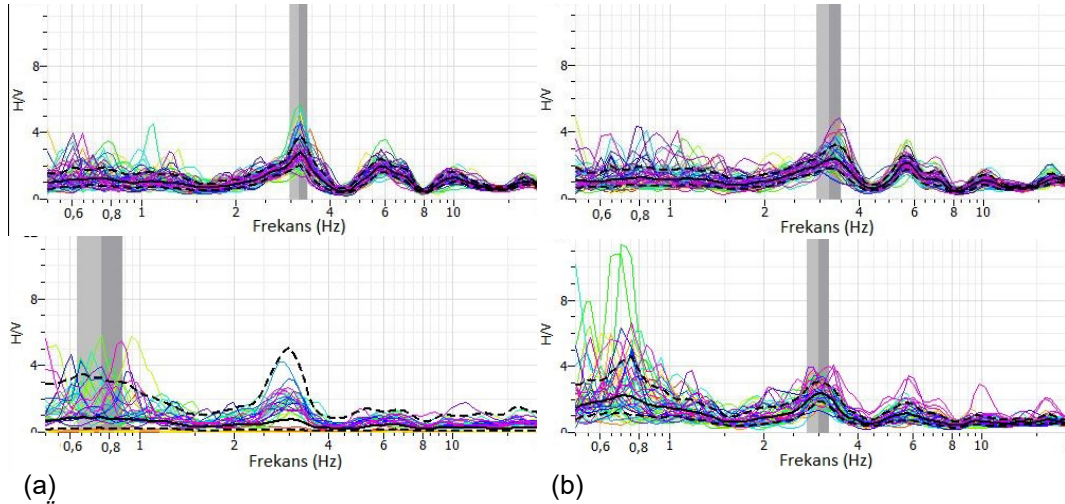
8'inci ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 0.5-1.5 Hz, 2-4 Hz, 5.8 Hz, 9 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekansları 0.5-1.5 Hz, 1.5-4 Hz, olan genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 2-4 Hz, 4.7 Hz, 7 Hz; K-G bileşeninde 2-4 Hz, 4-8 Hz 8-12 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4.8 Hz, 6-15 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 3 Hz, 4.8 Hz, 7 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 5 Hz, 6-10 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 8a). 9'uncu ölçüm noktasında gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 3 Hz, 5.5 Hz, frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekanslar 1.5-4.5 Hz, 6 Hz, 7-15 Hz olarak gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 4.5 Hz, 7 Hz; K-G bileşeninde 3 Hz, 8-15 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4-6 Hz, frekanslı genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2.5-4 Hz, 4.7 Hz; Kuzey- Güney bileşeninde 2-8 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4.7 Hz, frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 8b).



Şekil 8: Üstte gündüz, altta gece olacak şekilde H/V spektrumları a) 8'inci ölçüm noktası, b) 9'uncu ölçüm noktası

Figure 8: H/V spectrums for the day on the top, and night at the bottom a) 8th measurement point, b) 9th measurement point

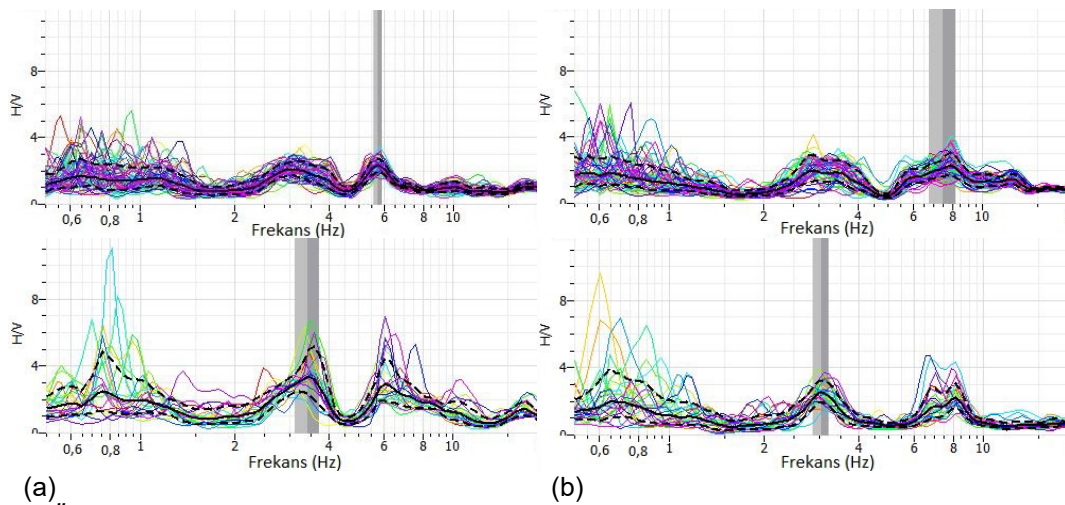
10'uncu ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 3.2 Hz, 6 Hz, 8-15 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekansları 1.5-4 Hz, 4-8 Hz, olan genlikler gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 4.5 Hz; K-G bileşeninde 3.2 Hz, 4-8 Hz; D-B bileşeninde ise 2-4 Hz, 4.5 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 4.7 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4.7 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 9a). 11'inci ölçüm noktasında, gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 3.3 Hz, 4-8 Hz, 8-15 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekansları 3 Hz, 4-8 Hz, olan genlik değerleri gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 4.5 Hz; K-G bileşeninde 2.5-5 Hz; D-B bileşeninde ise 2.8 Hz, 4.5 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise, düşey bileşende 2-4 Hz, 4.6 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4-6 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 9b).



Şekil 9: Üstte gündüz, altta gece olacak şekilde H/V spektrumları a) 10'uncu ölçüm noktası, b) 11'inci ölçüm noktası

Figure 9: H/V spectrums for the day on the top, and night at the bottom a) 10th measurement point, b) 11th measurement point

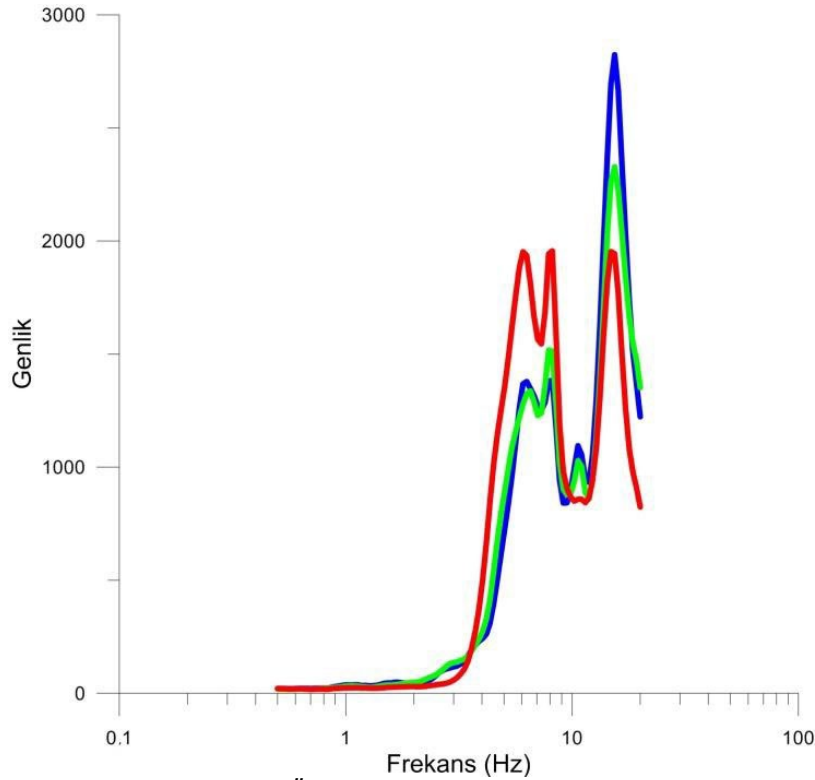
12'nci ölçüm noktasında gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 0.5-1.5 Hz, 3 Hz, 5.6 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekansları 0.5-1.5 Hz, 3.5 Hz, 5-13 Hz olan genlik değerleri gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 4.5 Hz; K-G bileşeninde 3-7 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4.5 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 4.5 Hz; K-G bileşeninde 3-5 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4-6 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 10a). 13'üncü ölçüm noktasında gündüz alınan verinin H/V spektrumu incelendiğinde 0.5-1.5 Hz, 1.5- 5 Hz, 5-15 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin H/V spektrumunda ise frekansları 0.5-1.5 Hz, 3 Hz, 5-12 Hz olan genlik değerleri gözlenmiştir. Gündüz alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde düşey bileşende 4.7 Hz; K-G bileşeninde 2.5-7 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4.5 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür. Gece alınan verinin K-G, D-B ve Düşey bileşen spektrumları incelendiğinde ise düşey bileşende 2-4 Hz, 5 Hz; D-B bileşeninde ise 3 Hz, 4-6 Hz, 6-10 Hz frekanslarında yüksek genlikler görülmüştür (Şekil 10b).



Şekil 10: Üstte gündüz, altta gece olacak şekilde H/V spektrumları a) 12'nci ölçüm noktası, b) 13'üncü ölçüm noktası

Figure 10: H/V spectrums for the day on the top, and night at the bottom a) 12th measurement point, b) 13th measurement point

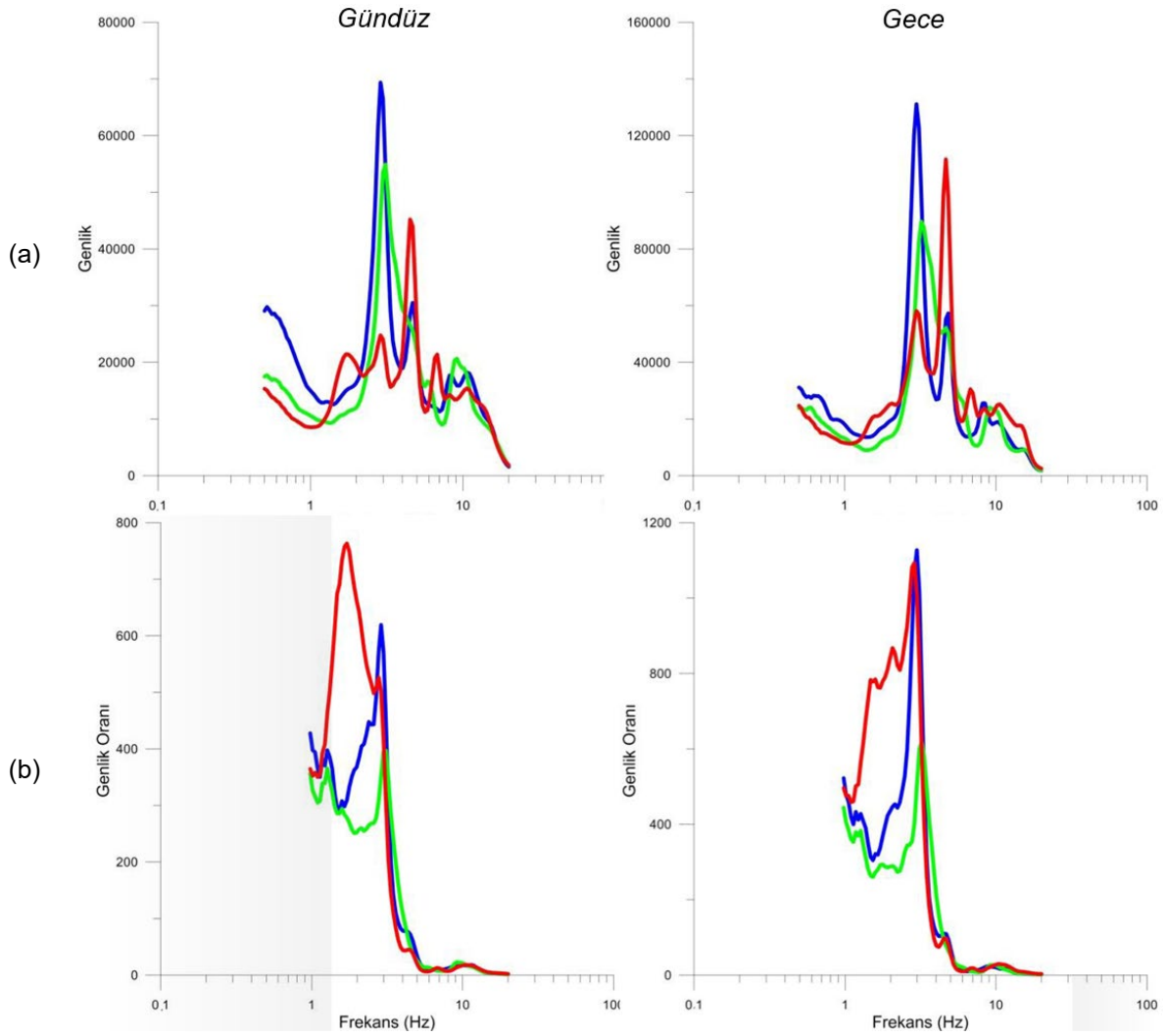
Elde edilen bulgularla civarda alınan ölçümlerin doğal frekansı karşılaştırılmıştır. Ege Üniversitesi Merkez Yerleşkesinde yapılan çalışmada zeminin frekansı 0.86 Hz ile 1.1 Hz arasında değişim göstermektedir. Yapı dayanımı ve periyodu araştırmalarında sıklıkla kullanılan mikrotremor yöntemine ait verilerden, zemin etkisinin giderilmesiyle elde edilen bulguların yorumlanması son yıllarda geniş uygulama alanı bulan bir yöntemdir (Warnana ve Utama 2011). Bu amaçla seçilen bir viyadük ayağına ait veriler bu yöntemle değerlendirilmiştir. Civarda alınan bu ölçümlerin çalışma alanına yakın olan ve zemin etkisinin en iyi gözlemlendiği trafik gürültüsüz ölçümden (Şekil 11) faydalanılarak, viyadük ayaklarında alınan ölçümlerdeki zemin etkisi elimine edilmiş ve trafiğin neden olduğu yapay titreşimler değerlendirilmiştir.



Şekil 11: Çalışma alanı yakınında, Ege Üniversitesi Rektörlüğü bahçesinde alınan verinin spektrumu (sırasıyla mavi: D-B, yeşil: K-G, kırmızı: Düşey bileşendir)

Figure 11: Spectrum of the data measured in the garden of Ege University Rectorate where is near the study area (blue, green and red colors are E-W, N-S, and Vertical components, respectively)

Bu işlem için viyadüğün 9 numaralı ayağında alınan ölçüm (Şekil 12a) seçilmiştir. Gece ve gündüz alınan ölçümlerde zeminin titreşim etkisi giderilerek sadece trafiğin neden olduğu titreşimlerin frekansları gözlenmiştir (Şekil 12b). Zemin etkisi giderilmiş veri incelendiğinde, her üç bileşenin aynı frekansta yüksek genlik verdiği gözlenmiştir.



Şekil 12: a) 9'uncu noktada gündüz ve gece alınan verilerin bileşen spektrumları, b) Veri üzerindeki zemin etkisinin elimine edilmiş bileşen spektrumları (sırasıyla mavi: D-B, yeşil: K-G, kırmızı: Düşey bileşendir)

Figure 12: a) Spectrum of the component of data measured at 9th point during day and night times, b) Spectra of the components of the eliminated background effect on the data (blue, green and red colors are E-W, N-S, and Vertical components, respectively)

Ayrıca çalışma alanı yakınlarındaki binaların hakim frekans değerleri literatürdeki temel kaynak çalışmalardan derlenen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan bağıntılar; (1), (2) ve (3) no'lu eşitliklerde verilmiştir:

- Gallipoli ve diğ. (2010) $T=0.016 \times H$ (1)

- Navarro ve diğ. (2002) $T=0.049 \times N$ (2)

- Eurocode 8 $T=0.075 \times H^{0.75}$ (3)

Bu bağıntılardaki T, yapının periyodunu; H, yapının yüksekliğini ve N ise yapıdaki kat sayısını ifade etmektedir. Yakın alandaki binaların ortalama 7 katlı olduğu ve kat yüksekliğinin yaklaşık 3 m olduğu kabul edilerek; (4), (5) ve (6) no'lu eşitliklere göre hesaplanmıştır. Hesaplamalardan elde edilen frekans değerlerine göre, 7 katlı bir binanın hâkim frekansının ~3.0 Hz olduğu görülmektedir:

- Gallipoli ve diğ. (2010) $T=0.016 \times 21=0.336$ sn $F=2.98$ Hz (4)
- Navarro ve diğ. (2002) $T=0.049 \times 7=0.343$ sn $F=2.92$ Hz (5)
- Eurocode 8 $T=0.075 \times 7^{0.75}=0.323$ sn $F=3.1$ Hz (6)

Şekil 11’de verilen, zemin etkisinin giderilmiş olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, çalışma alanındaki trafik kaynaklı titreşimlerin frekans değerleri ile binanın hâkim frekansının yaklaşık değerinin birbirine yakın olduğu saptanmıştır. Bu durumda, binanın frekansı ile trafik kaynaklı titreşimin frekansının rezonansa girmesi ve ciddi zararlar oluşturması olasıdır. Bu nedenle bu tür yapılar için önlemler alınmalı ve yeni yapılacak binalar için bu etkenler göz önünde bulundurularak gerekli çalışmalar ve hesaplamalar ile güvenlik sınırlarına dikkat edilmelidir. Ayrıca rezonans riskinin önlenmesi için son yıllarda hasarsız yapı incelemelerinde sıklıkla kullanılan mikrotremor yönteminin binaların katlarında da uygulanması tercih edilmelidir: Bulguların, bu tür ölçümlerden elde edilecek sonuçlarla ve trafiğin neden olduğu titreşim etkileriyle karşılaştırılarak yapı zararlarının önlenmesi için gerekli tedbirler alınmalıdır.

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında toplanan veriler incelendiğinde, viyadüğün karayoluyla bağlantısına yakın ayaklarda, uzaktaki ayaklara göre daha düşük frekanslar gözlenmiştir. Bunun nedeni viyadüğün bitimindeki rampadan çıkan araçların eğimden dolayı daha fazla hız yapma gereksinimi duymaları ve viyadüğün bitimindeki ayakların boylarının diğerlerine göre daha kısa olmasından dolayı, kaynak-alıcı ilişkisine göre titreşimin daha kısa sürede, sönümlenmeden iletilmesine bağlanabilir. Gündüz, trafiğin yoğun olması ve bölgede bulunan metro hattının aktif olması nedeniyle gündüz ölçümlerinden elde edilen frekanslar gece ölçümlerinden elde edilen frekanslara göre daha düşüktür. Gece ölçümleri alınırken metro hattının aktif olmadığı saatler seçildiği için, bu ölçümlerde viyadüğün etkisi daha net gözlenmiştir. Nokta bazında bakıldığında genel olarak gece ölçümlerinden elde edilen frekanslar daha yüksek değere sahiptir fakat bazı noktalarda gece ve gündüz ölçüm frekansları birbirine çok yakın değerlerde de görülmüştür. Bu durum, viyadükten geçen araçların trafiğin yoğun olmamasından dolayı daha hızlı bir şekilde yol alması ve ağır vasıtaların gece saatlerinde, gündüz saatlerine göre daha fazla ve sık geçmesidir.

Çalışma alanının yakınlarındaki binaların da bu titreşimlerden etkilenmesi olasıdır. Binaların baskın frekansları ile trafik ve metronun oluşturduğu titreşimlerin frekansının değerleri birbirine yakın değerler olması durumunda yapılarda hasara neden olabilir. Böyle bölgelerdeki eski yapılar daha kısa bir zaman içerisinde etkilenebilir. Bina yapımında; geleneksel spektrum ve H/V yöntemlerinin yanı sıra, zemin etkisi giderilmiş sadece yapay kaynaklı titreşimlerin oluşturduğu verilerin de kullanılması yararlı olacaktır. Dolayısıyla, bütün olası riskler göz önünde bulundurularak önlem alınması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Nida ERDEM’in Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir. Tez süresince yapılan çalışmalara destek olan Sayın Zülfikar ERHAN’a, cihaz konusunda destek olan Dokuz Eylül Üniversitesi (DEÜ) Jeofizik Mühendisliği Bölümü’ne ve katkılarından dolayı hakemlere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Altinok Y., Ersoy S., 2000. Tsunamis Observed on and Near the Turkish Coast, *Natural Hazards* 21, 185-205.

Altinok Y., Alpar B., Ozer N., Gazioglu C., 2005. 1881 and 1949 earthquakes at the Chios-Cesme Strait (Aegean Sea) and their relation to tsunamis, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 717-725.

Ates E., 2020. Comparison of Horizontal / Vertical Spectral Ratios Obtained Using Earthquake and Microtremor Records: The Example of Amasya, *Turk. J. Earthq. Res.* 2(2), 160-175, Erişim adresi: <https://doi.org/10.46464/tdad.746926>

Bayrak Y., Bayrak E., 2012. An evaluation of earthquake hazard potential for different regions in Western Anatolia using the historical and instrumental earthquake data. *Pure and Applied Geophysics* 169(10), 1859-1873.

Bayrak E., Ozer C., Cakici H., Kocadagistan M.E., 2021. January 24, 2020 Sivrice (Turkey) earthquake (Mw6.8): Evaluation of Ground-Motion Prediction Equations and Engineering Seismology Studies, *Turk. J. Earthq. Res.* 3(2), 125-148, Erişim adresi: <https://doi.org/10.46464/tdad.1003057>

DEÜ, 2017. 12 Haziran 2017, 15:28 TSİ) Mw=6.2 İzmir Karaburun, Ege Denizi) Depremi Değerlendirme Raporu, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Erişim adresi: [DEÜ Jeofizik](#)

Dogan G.G., Annunziato A., Papadopoulos G.A., Guler H., Yalciner A.C., Cakir T., Sozdinler C., Ulutas E., Arikawa T., Suzen M.L., Guler I., Probst P., Kanoglu U., Synolakis C., 2019. The 20th July 2017, Mw = 6.6) Bodrum-Kos Tsunami Field Survey, *Pure and Applied Geophysics* 1-25.

Dogan G.G., Yalciner A.C., Yuksel Y., Ulutas E., Polat O., Guler I., Sahin C., Tarih A., Kanoglu U., 2021. The 30 October 2020 Aegean Sea Tsunami: Post-Event Field Survey Along Turkish Coast, *Pure and Applied Geophysics* 178, 785-812.

Erdem N., 2016. Karayolu Viyadüklerindeki Trafik Kaynaklı Titreşimlerin Analizi, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 88 s.

Eurocode 8, 2004. European Committee for Standardization, Design of structures for earthquake resistance, Part 1. General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, Erişim adresi: [Eurocode-8](#)

Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Sket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T., 2010. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering* 8(3), 593-607.

GEOPSY 2005. Geophysical signal database for noise array processing. Erişim adresi: www.geopsy.org

Kayan İ., 2000. İzmir Çevresinin Morfotektonik Birimleri ve Alüvyal Jeomorfolojisi. Batı-Anadolu'nun Depremelliği Sempozyumu (BADSEM) 2000 Bildiriler Kitabı, 103-111, İzmir.

Kıncal C., 2005. İzmir iç körfezi çevresinde yer alan birimlerin coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak mühendislik jeoloji açısından değerlendirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Doktora Tezi, İzmir, 372 s.

Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report of Railway Technology Research Institute* 30, 25-33.

Navarro M., Sanchez F.J., Fetiche M., Vidal F., Enomoto T., Iwatate T., Matsuda I., Maeda T., 2002. Statistical estimation for dynamic characteristics of existing buildings in Granada, Spain using microtremors. (In: Structural Dynamics, Eurodyn 2022, vol.1, Editors: Grundmann H., Schueller G.I, Balkema Publishers, Rotterdam-Holland, 853 p.), 807-812.

Üregel R.P., 2019. Structural and textural features of the Kavacık granite in Bornova Melange. MSc Thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 73 p.

Warnana S.D.D., Utama T.W., 2011. Evaluation of buildings strength from microtremor analyses, *International Journal of Civil and Environmental Engineering* 11(05), 93-99.

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, doi: 10.1785/0220190360.

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Araştırma kapsamında kullanılan veri, lisansüstü tez çalışması kapsamında elde edilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında yer alan bulguların ve bilgilerin; herhangi bir kişi ve kurumla çıkar çatışması ya da ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

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



Precursors of the Elazig-Sivrice Earthquake (January 24th, 2020)

Seval Gurbuz¹ and Yusuf Arif Kutlu²

¹ Canakkale Onsekiz Mart University, School of Graduate Studies, Risk Management of Natural Disasters, 17020 Canakkale, Türkiye

² Canakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, 17020 Canakkale, Türkiye

ORCID: 0000-0001-8032-7895, 0000-0002-9393-7710

Keywords

Face-to-face questionnaire, Disaster victims, Earthquake precursors

Highlights

- * Earthquake prediction
- * Unusual behaviors of nature before large earthquakes
- * Relationship between observational anomalies and large earthquakes

Aim

To contribute to the databases related to long-term earthquake prediction studies carried out all over the world from past to present

Location

Elazig-Türkiye

Methods

Face-to-face survey

Results

The effects of physical changes around the earthquake focus on nature and living things can be observed by humans.

Supporting Institutions

Turkish State Meteorological Service

Financial Disclosure

The authors declared that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 27.09.2022

Revised: 11.11.2022

Accepted: 22.11.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1180719



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

Corresponding Author

Seval Gurbuz

Email: svlgrbz93@gmail.com

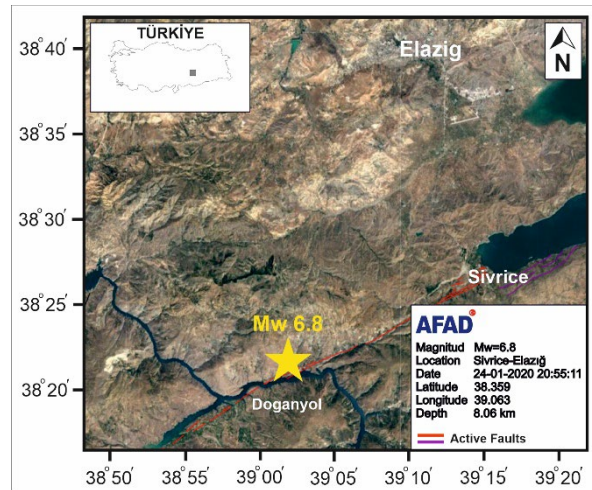


Figure
January 24, 2020 Elazig-Sivrice Earthquake location map
(adapted from AFAD 2020)

How to cite:

Gurbuz S., Kutlu Y.A., 2022. Precursors of the Elazig-Sivrice Earthquake (January 24th, 2020), Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 246-260, <https://doi.org/10.46464/tdad.1180719>



Elazığ-Sivrice Depremi'nin (24 Ocak 2020) Öncül Belirtileri

Seval Gürbüz¹ ve Yusuf Arif Kutlu²

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doğal Afetlerin Risk Yönetimi Ana Bilim Dalı, 17020 Çanakkale, Türkiye

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 17020 Çanakkale, Türkiye
ORCID: 0000-0001-8032-7895, 0000-0002-9393-7710

ÖZET

Bu çalışma kapsamında; büyük ölçekli depremler meydana gelmeden önce doğa, canlılar ve elektronik cihazlar üzerinde gözlemlenebilen anormal değişimlerin 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi ($M_w=6.8$) ile ilişkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu anormal değişimler; deprem sonrasında Elazığ ilinin merkezinde konuşlandırılan barınma alanlarındaki 127 gönüllü afetzede katılımcı üzerinde yüz yüze anket tekniği kullanılarak derlenmiştir. Katılımcılar tarafından insanlarda 117, hayvanlarda 214, gökyüzünde 147, hava durumunda 165, kaynak ve çeşme sularında 59, göl ve barajlarda 31 ve elektrik-elektronik cihazlarda toplam 73 sıra dışı gözlem yapılmıştır. Sonuç olarak, Elazığ Depremi meydana gelmeden önceki bir aylık zaman diliminde; doğanın, canlıların ve elektronik cihazların gözlemlenebilecek düzeyde sıra dışı değişimler sergilediği söylenebilir. Küresel ölçekte büyük depremler öncesinde de gözlemlenen bu anormal değişimlerin; depremlerin olası öncül belirtileri olarak kayda geçirilmesi yerel ölçekte deprem tahmin çalışmalarının ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler

Yüz yüze anket, Afetzede, Depremlerin öncülleri

Öne Çıkanlar

- * Deprem tahmini
- * Büyük depremlerden önce doğanın olağandışı davranışları
- * Gözlemsel anomaliler ve büyük depremler arasındaki ilişki

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.09.2022

Düzeltilme: 11.11.2022

Kabul: 22.11.2022

Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1180719

Sorumlu yazar

Seval Gürbüz

Eposta:

svlgrbz93@gmail.com

Precursors of The Elazığ-Sivrice Earthquake (January 24th, 2020)

Seval Gurbuz¹ and Yusuf Arif Kutlu²

¹ Canakkale Onsekiz Mart University, School of Graduate Studies, Risk Management of Natural Disasters, 17020 Canakkale, Türkiye

² Canakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, 17020 Canakkale, Türkiye

ORCID: 0000-0001-8032-7895, 0000-0002-9393-7710

ABSTRACT

The scope of this study is to investigate the relationship between the observable abnormal changes in the nature, animals, electronic devices and the large-scale earthquakes for the 24 January 2020 $M_w=6.8$ Elazığ-Sivrice Earthquake. These abnormal changes were collected by using face-to-face survey technique on 127 volunteer disaster victims in the shelters located in the center of Elazığ province after the earthquake. The questionnaire is applied to 127 disaster victims in different disaster relief shelter areas located in Elazığ after the earthquake. According to the survey findings, a total of 117 unusual observations about humans, a total of 214 unusual observations about animals, a total of 147 unusual observations of the sky, a total of 165 unusual observations of the weather, a total of 59 unusual observations on spring waters and fountain, a total of 31 unusual observations on lakes and dams and a total of 73 extraordinary observations in electrical-electronic devices are observed. As a result, it can be said that the abnormalities in the nature, animals and electronic devices warm to us within the month before the Earthquakes. To record the abnormal changes, which are also observed before many major earthquakes on a global scale, as earthquake precursors are going to contribute to the development of earthquake prediction studies and early warning systems at local scale.

Keywords

Face-to-face questionnaire, Disaster victims, Earthquake precursors

Highlights

- * Earthquake prediction
- * Unusual behaviors of nature before large earthquakes
- * Relationship between observational anomalies and large earthquakes

Manuscript

Research Article

Received: 27.09.2022

Revised: 11.11.2022

Accepted: 22.11.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1180719

Corresponding Author

Seval Gurbuz

Email:

svlgrbz93@gmail.com

1. GİRİŞ

Geçmişten bugüne birçok büyük depremden önce olağan dışı doğa ve canlı davranışlarının gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu anomaliler en eski ve en tutarlı deprem tahminleri olarak bilinmektedir (Turcotte 1991). İlk olarak Çinli bilim insanları deprem tahmini çalışmalarında olağan dışı doğa ve canlı davranışlarını gözlemlemişlerdir. Ağustos 1971'de Çin Devlet Sismoloji Bürosu deprem tahmini amacıyla olağan dışı hayvan davranışlarını derlemeye başlamıştır. Dört yıl sonra olağan dışı hayvan davranışları ve jeofizik ölçümlerine dayanarak 7.3 magnitudlü 4 Şubat 1975 Haicheng Depremi'nden birkaç saat önce şehir başarıyla tahliye edilmiştir (Bhargava ve diğ. 2009). Bazı sismologlar kabul edilebilir istatistiksel sınırlar dışında depremlerin tahmin edilemeyeceğini savunmaktadır (Geller 1997). Ancak, son birkaç on yılda dünyadaki tektonik olarak aktif tüm bölgelerde büyük depremlerden önce gerçekleşen ve deprem kaynaklı olduğu ileri sürülen sıra dışı doğa ve canlı davranışları rapor edilmeye devam etmektedir (Freund ve diğ. 2009). Deprem dışmerkezi civarında meydana gelen elektrik ve elektromanyetik alan değişikliklerinin bazı canlıları etkilediği ve beyindeki nörotransmitter yapıları bozduğu ileri sürülmektedir (Ikeya ve diğ. 2000). Ayrıca, deformasyon bölgesinde yeryüzüne sızan ve iyonize olan radon gazı molekülleri bazı canlılar tarafından algılanarak anormal tepkilerin ortaya çıkmasına yol açtığı ifade edilmektedir (Nishimura ve diğ. 2010, Yao ve diğ. 2012). Depreme bağlı olarak sakin hayvanlarda huzursuzluk, atılğan hayvanlarda ise tam tersi bir korku belirtisi gözlemlenebilir (Yamauchi ve diğ. 2014). İnsanlar ise depremden önce normale göre daha farklı duygu durumu içinde olabilirler (Whitehead ve Ulusoy 2013).

Deprem tahmini çalışmaları zaman, konum ve büyüklük ile ilişkilidir. Birkaç saatlik zaman dilimi can ve mal kayıplarının en aza indirgenmesi için yeterli olabilir. Ancak yıkıcı depremler öncesinde insanlar tarafından gözlemlenebilen etkilerin canlılar, doğa ve insan yapımı cihazlar üzerindeki belirtilerinin incelenmesi uzun soluklu ve çok yönlü çalışmalar gerektirir. Bu amaca yönelik olarak, geçmişten beri var olan geleneksel deprem öncülleri tüm büyük depremlerin sonrasında tutarlı bir şekilde arşivlenmeye devam etmektedir. Bu çalışmanın amacı; olan bir depremi zaman, konum ve büyüklük parametrelerine bağlı olarak kestirmek değil, uluslararası düzeyde yürüyen uzun soluklu deprem tahmin çalışmalarıyla ilgili veri tabanlarına katkı sunmaktır. Bu amaçla, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi öncesinde doğa ve canlılar üzerinde gelişen anormal değişimler; sahada yüz yüze anket tekniği ile derlenerek bu deprem ile bağlantısı araştırılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen bulgular önceki çalışmaların sonuçları ve yerel meteorolojik veriler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. TEORİK ALT YAPI

Termal konveksiyon akımlarıyla hareket eden plakalar üzerinde biriken deformasyon enerjisi kayaçların kırılmasına ve depremlerin oluşmasına neden olur (Davies ve Richards 1992).

Deprem odağı civarında meydana gelen dinamik süreçler ile atmosfer tabakalarında oluşabilecek anormal değişimler arasındaki ilişki LAIC (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Concept, Litosfer-Atmosfer-İyonosfer Modeli) modeli ile açıklanabilir (Pulinets ve Ouzounov 2011, Ulukavak ve Yalçinkaya 2017). Deprem meydana gelmeden günler önce yer yüzeyine sızan radon gazı yerel bir sera etkisi ile dünya yüzeyinde termal bir anomaliye neden olur (Ulomov ve Mavashev 1971). Farklı kuvvetler altında sürekli deforme olan kayaçlardan sızan gazlar yer yüzeyine ulaşır atmosfere salınır (Toutain ve Baubron 1999). Depremden birkaç gün önce genel radon salınımındaki artış tespit edilebilir (Omori ve diğ. 2007). Deprem öncesi atmosferdeki radon gazı seviyesi hava sıcaklığı ve bağıl neme benzer şekilde değişim gösterir (Ouzounov ve diğ. 2006).

Deprem anında yer yüzeyine yakın atmosferik elektrik alanı değişimleri de radon gazı iyonizasyonu ile ilgilidir (Kondo 1966). Deprem olaylarından birkaç gün önce dışmerkez civarında iyonosfer içindeki anormal değişimlerin varlığı açıkça gösterilmiştir (Pulinets ve diğ. 2004, Kamogawa 2006). Deniz seviyesinden 90-140 km yükseklikte yer alan sporadik E

tabakası yoğunluğu büyük depremlerden ($M > 6.5$) önce gelişen pre-sismik olaylardan etkilenir (Ondoh 2003). Büyük depremler öncesinde gözlemlenebilen herhangi bir öncül işareti tetikleyebileceği öngörüsü ile bu katmandaki TEC (Total Electron Content, Toplam Elektron İçeriği) araştırılmıştır. Büyük magnitudlü depremler üzerinde yürütülen araştırmalara göre TEC ölçümleri üzerinde depremlerden 1-5 gün önce ani değişimler gözlemlenmiştir (Liu ve diğ. 2006).

Fay yüzeyi ile civarı arasındaki sıcaklık farkı yatay hava hareketlerine ve hava sıcaklığı artışına yol açar. Bu duruma genellikle bağıl nem düşüşü eşlik eder. Bu anomaliler deprem öncesi birkaç haftalık süreçte sıra dışı değişimler olarak kaydedilebilir (Zhang ve diğ. 2010).

Depremlerden önce sis, pus ve bulut oluşumları radon gazı emisyonuna bağlı radon iyonizasyonu ile ilişkilendirilir. Deprem öncesi oluşan doğrusal bulutlar aktif tektonik fay üzerinde dışmerkez civarında meydana gelir (Morozova 2005, Pulinets ve Dunajacka 2006). Söz konusu değişimler atmosferdeki kozmik ışınların etkisinin bir sonucu olarak troposferde gözlenir (Yu ve Turco 2001). Yer yüzeyi ve havadaki güçlü elektrik alanları arasındaki elektrik deşarjları deprem ışığı olarak adlandırılan fenomenleri oluşturur. Bu ışınlar depremlerden önce gözlemlenebilir (St-Laurent 2000).

Deprem olmadan önce odak civarında gelişen anormal dinamik süreçler nedeniyle yakınlarda bulunan kuyularındaki su seviyeleri, suların kimyasal ve fiziksel özellikleri de anormal farklılıklar gösterebilir (Qidong ve diğ. 1981, Grant ve diğ. 2011).

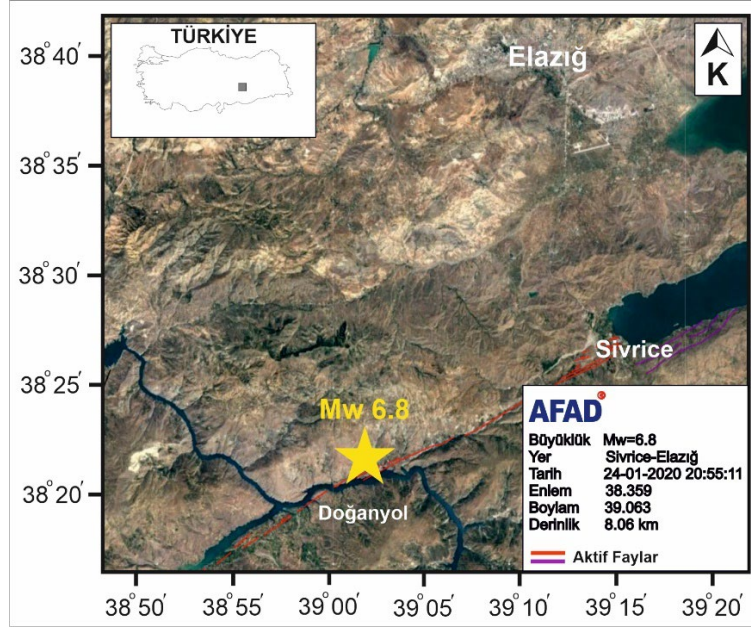
3. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında; yüz yüze anket tekniği ve soruların analizinde ise frekans-yüzde tercih edilmiştir. Anket yöntemi; nitel bilimsel araştırmalarda temel bilgi toplama araçlarından biridir. Anketler çok farklı türde bilginin toplanması amacıyla kullanılabilir (Fowler 1995). Uygulama şekli itibarıyla farklı anket türlerinden de söz edilebilir. Bunlar yüz yüze görüşme türü anket, gözlem altında anket, posta yoluyla anket, telefonla anket ve internet aracılığıyla anket vs. olarak sıralanabilir (Alreck ve Settle 1995, Neuman 2006). Anket çalışması başlamadan önce uygulanacak anketin türü, soru çeşitleri, örneklem büyüklüğü ve güvenilirlik sınırları belirlenmelidir (Barnett 2002). Anketi yürüten görüşmeciler ve denekler arasında sorun yaratan unsurların olup olmadığının değerlendirilmesi için önceden yeteri sayıda deneme anketi yapılmalıdır (Fink 2017). Veri toplama yönteminin amaca uygun seçilmesi, sistematik olma ve uygun şekilde sınıflandırma bulguları sağlıklı analiz etmemizi sağlar (Presser ve diğ. 2004).

Bu çalışmada yüz yüze anket tekniği tercih edilmiştir. Anket çalışmasında kullanılan ölçek, konu ile ilgili benzer bilimsel çalışmalardan yararlanılarak hazırlanmıştır (Rikitake ve diğ. 1993, Ulusoy ve Ikeya 2001, Bhargava ve diğ. 2009, Whitehead ve Ulusoy 2013, Yamauchi ve diğ. 2014). Oluşturulan ölçeğin test edilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla toplumun farklı kesimlerinde yaşayan ve depreme maruz kalmış olan bireylere yönelik ön deneme anket çalışmaları yapılmıştır. Her bir ön deneme anketinden sonra sorular yeniden düzenlenerek ölçeğe son hali verilmiştir. Ölçek; demografik sorular, insanlar ile ilgili anormal davranışlara yönelik sorular, hayvanlar ile ilgili anormal davranışlara yönelik sorular, bitkiler ile ilgili anormal davranışlara yönelik sorular, gökyüzü ile ilgili anormal durumlara yönelik sorular, hava durumu ile ilgili anormal durumlara yönelik sorular, deniz-göl-gölet ile ilgili anormal durumlara yönelik sorular, içilebilir yer altı su kaynakları ile ilgili anormal durumlara yönelik sorular, elektronik cihazlar ile ilgili anormal durumlara yönelik sorular ve katılımcıların tarafsız gözlem yapma yetilerine yönelik sorulardan oluşmaktadır.

3.1) Saha Çalışması

24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi ($M_w=6.8$) yerel saat ile 20:55.11' de dışmerkez konumu $38.359^\circ\text{K}-39.063^\circ\text{D}$ (Elazığ ili, Sivrice ilçesi, Çevrimtaş Köyü'nün 800 metre kuzeyinde) olmak üzere yaklaşık 8.06 km odak derinliğinde meydana gelmiştir (AFAD 2020). Şekil 1'de ise depremin yer bulduru haritası yer almaktadır.



Şekil 1: 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi yer bulduru haritası (AFAD 2020'den uyarlanmıştır)
Figure 1: January 24, 2020 Elazığ-Sivrice Earthquake location map (adapted from AFAD 2020)

Elazığ-Merkez ve çevresinde konuşlandırılan barınma alanlarında bulunan kişi sayısı günlük ortalama 13000 kişidir. Araştırma sırasında kişilerin mesleki durumları ve/veya barınma olanaklarını değiştirmeleri durumuna göre kişi sayısında azalma olmuştur (TKD 2021).

Barınma alanlarındaki afetzede topluluğu depremin en çok zarar verdiği yerleşim bölgelerinden (Doğanıyol ile Sivrice arasında en fazla hasarın gerçekleştiği yerleşim alanları) gelen insanlardan oluşmaktadır. Afet sonrası travmatik vakaların varlığına rağmen, bu durumun deprem dışmerkezine yakın yerleşim bölgelerinden gelen insanların bir arada olduğu ve bu türden çalışmalara uygun bir evreni oluşturduğu söylenebilir.

$$n = \frac{Nt^2pq}{d^2(N-1)+t^2pq} \quad (1)$$

Bu çalışmada; Denklem (1)'i kullanarak hedef kitledeki birey sayısı ($N=13000$), homojen bir ortam için incelenen olayın gerçekleşme olasılığı ($p=0.8$), incelenen olayın gerçekleşmeme olasılığı ($q=0.2$), t bir sabit (%95 güvenirlilik için 1.96) ve örneklem hatası ($d=0.1$) olarak seçilir ise %95 güvenirlilik sınırları içinde ulaşılması gereken en az denek sayısı yaklaşık olarak $n=61$ olarak hesaplanabilir (Biemer ve diğ. 2004). Katılımcı güvenirliliği ile ilgili sorulara verilen yanıtlar üzerinden 127 katılımcı anket formu değerlendirilerek 39 anket formu değerlendirme dışı tutulmuştur. Saha çalışmasında 88 katılımcının anket formları kullanılmıştır. Katılımcı sayısı %10 örneklem hatası ile en az ulaşılması gereken denek sayısı olan 61 rakamının üzerindedir.

3.2) Veri Seti Güvenilirliği

Bu alışmada Elazığ' da kurulan kamp alanlarına yerleşen afetzedeler denek olarak seçilmiştir. Ancak, depremin ilk anlarından başlayarak bir süre devam eden beslenme, barınma, haberleşme, ulaşım gibi alanlarda oluşan ihtiyaçların giderilmesi ya da iyileştirilmesi beklenmiştir. Bu aşamada veri güvenilirliğinin öncelikli olduğu düşünülerek afete maruz kalan kişilere psikolojik ve fizyolojik olarak daha rahat bir ortam sağlandıktan sonra (yaklaşık 1 ay sonra) anket çalışmasına başlanmıştır.

Saha alışması kapsamında toplamda 127 katılımcıya ulaşılmıştır. İlk aşamada anket veri gveniliğini etkileyebileceği dşnncesiyle katılımcıların afet sonrası travma gibi bedensel-ruhsal sağlıkları değerlendirilerek toplam 39 katılımcının yer aldığı veri setleri değerlendirmeye dâhil edilmemiştir (Tablo 1). Özellikle ruhsal veya bedensel açıdan zarar görmüş bireylerin bu çalışmaya dâhil edilmediği söylenebilir. Ayrıca, bu saha çalışması kapsamında katılımcıların sıra dışı değerlişlikleri fark edebilme yetileri de 1-5 arasında değerşen bir lek (1: Hiç, 2: Çok az, 3: Biraz, 4: Oldukça, 5: Çok fazla) ile değerlendirilmiştir. Buna göre her bir soru için standart sapma 0.8-1.2 arasında değerşmek üzere grup ortalaması 4 puanın üzerinde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, katılımcıların etraflarındaki sıra dışı değerlişikleri kabul edilebilir bir güvenirlikte fark edebildikleri ifade edilebilir (Tablo 2).

Tablo 1: Katılımcıların sağlık durumlarının değerlendirilmesi
Table 1: Evaluation of the health status of the participants

Sorular	Frekans	Yüzde (%)
Uykusuzluk, dalgınlık ya da unutkanlık gibi sorunlarınız var mı?	16	23.2
Sigara, alkol ya da herhangi bir madde kullanıyor musunuz?	30	43.5
Yakın zamanda ciddi bir ruhsal rahatsızlık geçirdiniz mi?	8	11.6
Görme, duyma, koklama gibi duyu organlarıyla ilgili rahatsızlık geçirdiniz mi?	11	15.9
Algı durumunu etkileyen düzenli olarak kullandığınız bir ilaç var mı?	4	5.8
Toplam vaka (her bir katılımcı birden fazla rahatsızlığa sahiptir)	69	100.0

Tablo 2: Katılımcıların gözlem yapabilme yetileri ile ilgili sorular
Table 2: Questions about the ability of the participants to make observations.

İfadeler	Ortalama
Sezgilerimin çok güçlü olduğuna inanıyorum.	4.11
İyi bir gzlemciyim, etrafımdaki değerlişlikleri fark edebilirim.	4.09
Doğada vakit geçirmeyi, canlıları ve bitkileri gözlemlemeyi seviyorum.	4.22
Deprem olmadan önce yaşanılan olaylar deprem habercisi olabilir.	4.13
Deprem öncüllerinden faydalanılarak deprem tahminleri yapılabilir.	3.94

3.3) alışmanın Kısıtı

Bu çalışmada; yıkıcı depremler sonrasında afetzedelerin içinde bulunduğu sıra dışı yaşam koşulları ve yaşanılan travma süreci nedeniyle yüksek oranda sağlıklı gözlem yapabilen gönüllü katılımcı sayısına (%5 örneklem hatası) ulaşılamaması en önemli kısıttır (Biemer ve diğ. 2004). Bu kısıta rağmen hazırlanan ölçeğin depremi yaşayan bölgelerden gelerek barınma alanlarında toplanan gerçek denekler üzerinde test edilmesi önemli bir fırsat olarak görülmelidir. Veri gveniliği için katılımcıların tarafsız gözlem yapma yetileri ve afet sonrası travma gibi bedensel-ruhsal sağlıkları ölçek dahilinde değerlendirilmiştir. Tarafsız gözlem yapabilme yetileri olmayan ve ruhsal veya bedensel açıdan zarar görmüş bireyler bu çalışmaya dâhil edilmemiştir. Katılımcı sayısı düşük olsa da deprem odağına yakın yerleşim bölgelerinden gelen afetzedelerin gözlemlerine dayalı derlenen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu olması da elde edilen bulguların güvenirliliğini desteklemektedir.

4. VERİ

Bu çalışma kapsamında; yüz yüze anket tekniği ve MGM'den (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) temin edilen Elazığ-Sivrice hava durumu ile ilgili veri setleri kullanılmıştır. Anormal doğa ve canlı davranışları; anket tekniği sonuçları ve meteorolojik veri setleri ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu amaçla anket yöntemi ile katılımcıların aktardıkları anormal bulgular; MGM'den alınan Elazığ-Sivrice İlçesine ait meteorolojik veriler (sıcaklık, yağış, nem, rüzgâr, bulutluluk ve yatay görüş mesafesi) ile desteklenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma sonuçları; 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice depremi öncesi konu ile ilgili önceki çalışmalarda elde edilen bulgular ile örtüşebilen olası yerel gözlemlerin istatistiki açıdan yeterli sayıda ve güvenilirlikte derlenmesi ile sınırlandırılabilir.

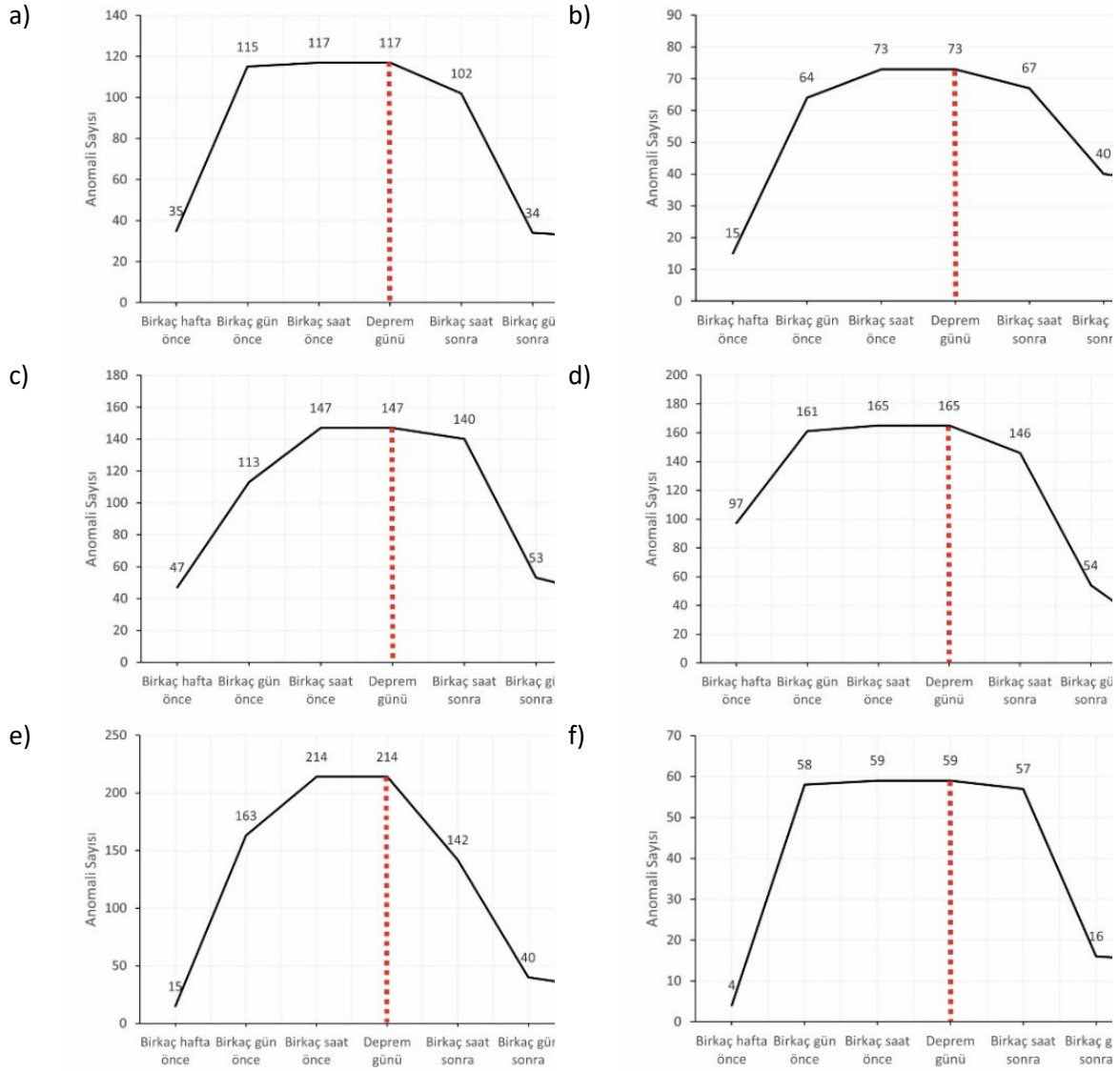
5. BULGULAR

Bu çalışmada demografik sorular incelendiğinde; katılımcıların %61 oranında 18-50 yaş aralığında, evli, ev hanımı ve okuryazar kadın bireylerden oluştuğu görülmektedir. Ağırlıklı olarak yerel kültür ölçeğinde psiko-sosyal gelişimini tamamlamış yetişkin bireyler üzerinde saha çalışması yürütüldüğü söylenebilir. Tablo 3'te "Deprem olmadan önce kendinizde veya çevrenizdeki insanlarda nasıl anormal bir durum gözlemlediniz" sorusu için 22 farklı davranış üzerinden toplamda 117 anomali bildirdi. İnsanlarda görülen bu anormal davranışların deprem öncesi-günü-sonrası tarih aralığına göre değişimi ise Şekil 2a'da gösterilmiştir. Katılımcıların depremden bir hafta önce gözlemlemeye başladıkları anormalliklerin zamansal dağılımı gösterilirken, en yüksek anormallik sayısına deprem günü ve deprem gününden birkaç gün önce ulaşıldığı görülmektedir.

Tablo 3: Katılımcılar tarafından insanlarda gözlemlenen anormal davranışlar
Table 3: Abnormal behaviors observed in humans by participants

Anormal Davranış	Frekans	Yüzde (%)
Sinir bozukluğu ve sıkıntı	23	19.7
Her an bir şey olacak hissi	17	14.5
Uyuyamama	13	11.0
Bitkinlik/Halsizlik	12	10.3
Huzursuzluk	12	10.3
Diğer 17 farklı anomali (<i>nedensiz; baş dönmesi, kabus, baş ağrısı, esneme, kalp rahatsızlığı, aşırı duygusallık, aniden uyanma, aşırı uyku isteği, diz ağrısı, mide problemleri, iştahsızlık, parmaklarda elektrikleme, ishal, göz seğirmesi, rahatsızlanma, düşük tansiyon ve titreme</i>) <%10	40	34.2
Toplam	117	100.0

Tablo 4'te "Deprem olmadan önce çevrenizdeki canlılarda nasıl anormal davranışlar gözlemlediniz?" sorusu için elde edilen sonuçlara bakıldığında; katılımcılar tarafından 6 farklı hayvan türünde 11 farklı anormal davranış bildirilmiştir. Katılımcıların beyanları doğrultusunda toplamda 214 anomali tespit edilmiştir. Katılımcılar tarafından belirtilen anormal davranışların sayısının zamana göre dağılımı birkaç saat ile birkaç hafta arasında değiştiği ve deprem günü en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir (Şekil 2b). Depremin meydana geldiği mevsime uygun olmayan davranışlar değerlendirmeye dâhil edilmiştir. Söz konusu anormal davranışların (evcil, kümes ve büyük baş hayvanlara ait) depremden birkaç gün önce yoğunlaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 2: Katılımcılar tarafından gözlemlenen anormal davranışların zamana göre dağılımı a) İnsanlar, b) Hayvanlar, c) Gökyüzü, d) Hava durumu, e) Çeşme/kaynak suları, f) Elektronik cihazlar
Figure 2: Distribution of abnormal behaviors observed by participants over time. Spectrums of a) People, b) Animals, c) Sky, d) Weather, e) Fountain/spring water, f) Electronic devices

Tablo 4: Katılımcılar tarafından hayvanlarda gözlemlenen anormal davranışlar

Table 4: Abnormal behaviors observed in animals by participants

Anormal Davranış	Frekans	Yüzde (%)
Bağırma	59	27.6
Yerinde duramama	32	15.0
Çırpınma	26	12.1
Huzursuzluk	26	12.1
Bir araya toplanma	25	11.7
Diğer 7 farklı anomali (nedensiz saldırganlık, telaşlanma, ortadan kaybolma, sessizleşme, içine kapanma, hastalanma ve yuvayı terk etme) <%10	46	21.5
Toplam	214	100.0

Tablo 5'te "Deprem olmadan önce gökyüzünde nasıl anormal bir durum gözlemlediniz?" sorusuna verilen yanıtlara bakıldığında; katılımcılar tarafından 6 farklı durum üzerinden toplamda 147 anomali bildirilmiştir. Anomalilerin haberci zaman aralığının ise; birkaç saat ile birkaç hafta arasında değiştiği söylenebilir (Şekil 2c). Bölgeye uygun mevsim şartları göz önünde bulundurularak, normalin dışında gelişen olaylar araştırmaya dâhil edilmiştir. Bu durumda en çok öne çıkan anormal durum puslu gün batımı ve gökyüzünde kızıl, pembe ya da mor renk değişiklikleridir.

Tablo 5: Katılımcılar tarafından gökyüzü ile ilgili gözlemlenen anormal durumlar
Table 5: Observed abnormal conditions related to the sky by participants

Anormal Durum	Frekans	Yüzde (%)
Puslu gün batımı	61	41.5
Kızıl, pembe ya da mor tonlarında renk değişiklikleri	35	23.8
Ani aydınlanma/parlama/ışık	29	19.7
Diğer 3 farklı anomali (normalden farklı ışımalar, anormal bulutlar ve yıldızların normalden daha fazla yere yakın gözükmesi) <%10	22	15.0
Toplam	147	100.0

Tablo 6'da "Deprem olmadan önce hava durumunda nasıl anormal bir durum gözlemlediniz?" sorusu için verilen yanıtlara bakıldığında; katılımcılar tarafından 5 farklı duruma göre 165 anomali bildirilmiştir. Anomalilerin haberci zaman aralığı ise 1-15 gün arasında değişmektedir (Şekil 2d). Depremlerin gerçekleştiği yer ve tarihte, mevsim normalleri dışında gelişen olaylar dikkate alınmıştır. Katılımcılar; önceki yıllarda bu tür hava durumu değişimlerinin olmadığını teyit etmişlerdir. Deprem gününden birkaç hafta öncesinden başlamak üzere en fazla görülen anormal meteorolojik olaylar; sisli/puslu bir hava ve ani sıcaklık değişimleridir.

Tablo 6: Katılımcılar tarafından hava durumunda gözlemlenen anormal değişimler
Table 6: Abnormal changes in weather by participants

Anormal Durum	Frekans	Yüzde (%)
Sisli/puslu bir hava	64	38.8
Ani sıcaklık değişimleri	47	28.5
Ani rüzgârlar	37	22.4
Diğer 2 farklı anomali (mevsim normalleri dışında; sıcaklık ve yağış oranları) <%10	17	10.3
Toplam	165	100.0

Tablo 7'de "Deprem olmadan önce kaynak sularında nasıl anormal bir durum gözlemlediniz?" sorusu için verilen yanıtlara bakıldığında; katılımcılar tarafından 6 farklı durum üzerinden toplamda 59 anomali bildirmiştir. Depremden 3-15 gün önce başlamak üzere doğal kaynak ve kaplıca sularındaki verilerin normal verilere göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 2e).

Tablo 7: Katılımcılar tarafından çeşme ve kaynak sularında gözlemlenen anormal durumlar
Table 7: Abnormal conditions observed in fountain and spring waters by participants

Anormal Durum	Frekans	Yüzde (%)
Keskin koku	17	28.8
Bulanık ya da kirli görüntü	14	23.7
Tat değişikliği	13	22.0
Renk değişikliği	13	22.0
Diğer 2 farklı anomali (sıra dışı; gaz çıkışı ve sıcaklık) <%10	2	3.5
Toplam	59	100.0

Tablo 8’de “*Deprem olmadan önce kullandığınız elektronik cihazlarda nasıl anormal bir durum gözlemlediniz?*” sorusu için verilen yanıtlara bakıldığında; katılımcılar 7 farklı durum için 73 anomali bildirmiştir. Depremden önceki 1-5 günlük zaman aralığında söz konusu anomalilerin gerçekleştiği ifade edilmiştir (Şekil 2f). Katılımcıların kullandığı cihazlarda herhangi bir arıza durumu olmadığı yönünde teyit alınarak, sonuçlar araştırmaya dâhil edilmiştir.

Tablo 8: Katılımcılar tarafından elektrik-elektronik cihazlarda gözlemlenen anormal durumlar
Table 8: Abnormal conditions observed in electronic devices by participants

Anormal Durum	Frekans	Yüzde (%)
İnternet/telefon çekmemesi, şebeke bozukluğu	27	37.0
Elektronik cihazlarda ani ve sebepsiz bozulmalar	20	27.4
Elektrik kesintisi	9	12.3
Diğer 4 farklı anomali (sıra dışı; cihazların görüntülerinde parlama ve bozulmalar, lambaların yanıp sönmesi, cihazlardan farklı seslerin gelmesi ve TV’lerin kendiliğinden açılıp kapanması) <%10	17	23.3
Toplam	73	100.0

Bu gözlemlere ek olarak, katılımcılar tarafından bitkilere yönelik 5 farklı durum üzerinden toplamda 21 anomali, göl ve baraj sularına yönelik olarak da 3 farklı durum üzerinden toplamda 31 anomali gözlemlenmiştir. Katılımcılar tarafından belirtilen anormal durumların birkaç gün öncesinden başlayarak gözlemlendiği ifade edilebilir.

6. TARTIŞMA

Depremlerden önce doğa ve canlılar üzerinde gerçekleşen anormal değişimlerin yaşandığı zaman dilimi haberci zaman olarak tanımlanabilir. Tarihsel depremleri inceleyen bir araştırma haberci zamanın ortalama olarak 21 saat olduğunu tespit etmiştir (Rikitake ve diğ. 1993). Kobe Depremi ile İzmit Depremi’nin karşılaştırıldığı diğer bir araştırmada ise depremden önceki son gün elektronik cihazlar, 1-7 gün önce jeofiziksel veriler ve 9 gün önce meteorolojik olaylar ile ilgili anormalliklerin pik yaptığı belirtilmiştir (Ulusoy ve Ikeya 2000). Bu çalışmada anomalilerin pik yaptığı zaman aralıklarına bakıldığında; insanlarda 1-2 gün, hayvanlarda birkaç saat, bitkilerde 1-5 gün, gökyüzü ve hava durumunda 5 gün, elektronik cihazlarda ise 1-2 gün önce olduğu tespit edilmiştir.

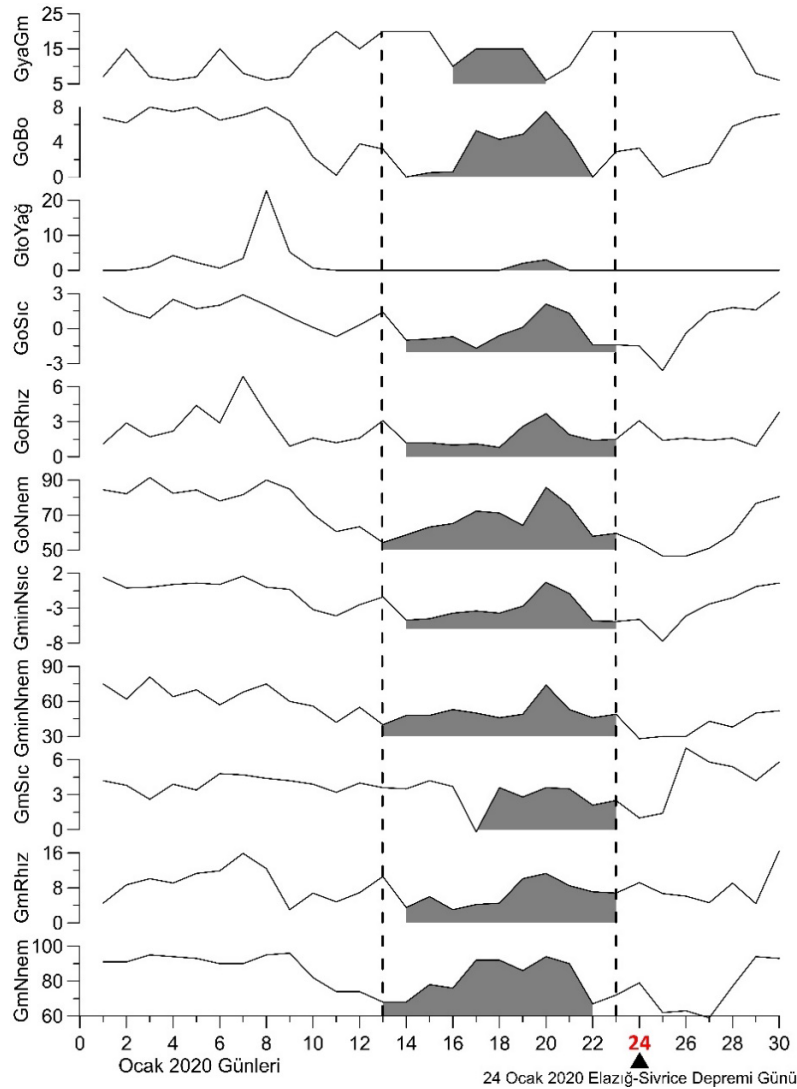
Daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde de en fazla hayvanlar ile ilgili anormal durum bildirildiği görülmektedir. Ancak bu çalışmada; katılımcı sayısının diğer araştırmalar ile kıyaslandığında daha az olmasından dolayı hayvanlara yönelik gözlemlerin ve anomali sayılarının daha az olduğu söylenebilir. Deprem bölgesinde deniz ve yerleşim yerine yakın baraj, göl, kaplıca gibi unsurların olmamasından dolayı bu alanla ilgili de katılımcılar tarafından çok fazla anomali gözlemi yapılamamıştır. Buna karşın, önceden yapılan benzer çalışmalar ile bu çalışma karşılaştırıldığında katılımcıların bildirdikleri anormal durumlardan elde edilen verilerin tutarlı olduğu söylenebilir (Tablo 9).

24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depreminde yaklaşık bir ay önce başlayarak canlıların, doğanın ve elektronik sistemlerin gözlemlenebilecek şekilde uyarılar verdiği söylenebilir. Anket çalışması ile elde edilen bulgular göz önüne alındığında katılımcılar tarafından en fazla gözlemlenen anormal durumların gökyüzü, hava durumu, hayvanlar ve insanlar ile ilgili olduğu görülmektedir (Şekil 2).

Tablo 9: 1995-Kobe Depremi, 1999-Marmara Depremi, 2016-Kaikauro-Christchurch Depremi ve 2020 Elazığ-Sivrice Depremi öncüllerinin karşılaştırılması

Table 9: Comparison of 1995-Kobe Earthquake, 1999-Marmara Earthquake, 2016-Kaikauro-Christchurch Earthquake and 2020 Elazığ-Sivrice Earthquake precursors

Anomali Türü	Anomali Sayısı (%)			
	1995 Kobe Depremi	1999 Marmara Depremi	2016 Kaikauro- Christchurch Depremi	2020 Elazığ-Sivrice Depremi (Bu çalışma)
Hayvan	51	53	57	26
Gökyüzü ve hava durumu	29	27	11	38
Deniz-kara	11	10	9	4
Elektrikli cihazlar	9	7	6	9
Bitkiler	1	3	-	2
İnsanlar	-	-	-	14
Diğer	-	-	17	7



Şekil 3: Meteorolojik parametrelerin karşılaştırılması
Figure 3: Comparison of meteorological parameters

Deprem; meteorolojik faktörleri etkileyerek sıcaklık, yağış, nem, rüzgâr, bulutluluk ve görüş mesafesi gibi parametrelerde değişikliğe neden olabilir. MGM'den temin edilen Elazığ-Sivrice yereline ait meteorolojik veriler anket sonuçları ile karşılaştırıldı. Bu veri seti; GminNnem (Günlük Minimum Nispi Nem), GoNnem (Günlük Ortalama Nispi Nem), GmNnem (Günlük Maksimum Nispi Nem), GminSıc (Günlük Minimum Sıcaklık), GoSıc (Günlük Ortalama Sıcaklık), GmSıc (Günlük Maksimum Sıcaklık), GoRh (Günlük Ortalama Rüzgâr Hızı), GmRh (Günlük Maksimum Rüzgâr Hızı), GtoYağ (Günlük Toplam Yağış Miktarı), GoBo (Günlük Ortalama Bulutluluk Oranı) ve GyaGm (Günlük Minimum Yatay Görüş Mesafesi) verilerinden oluşmaktadır (MGM 2020). Analiz sonuçlarında deprem gününden yaklaşık 10 gün öncesinden başlamak üzere tüm değerlerde mevsim normallerinin dışında anormal oranda keskin değişimler olduğu görülmektedir. Bu durum anket çalışmasına katılım sağlayan denekler tarafından "ani sıcaklık değişimleri, mevsimsiz sıcaklık, sisli-puslu bir hava ve ani rüzgârlar" şeklinde ifade edilmiştir. Sonuç olarak, yerel meteorolojik verilerle anket katılımcıların gözlemlerinin de örtüştüğü söylenebilir (Şekil 3).

7. SONUÇLAR

Deprem tahmini çalışmaları zaman, konum ve büyüklük ile ilişkilidir. Birkaç saatlik zaman dilimi can ve mal kayıplarının en aza indirgenmesi için yeterli olabilir. Ancak, yıkıcı depremler öncesinde insanlar tarafından gözlemlenebilen etkilerin doğa, canlılar ve insan yapımı cihazlar üzerindeki belirtilerinin incelenmesi uzun soluklu ve çok yönlü çalışmalar gerektirir.

Bu çalışmanın amacı olan bir depremi zaman, konum ve büyüklük parametrelerine bağlı olarak kestirmek değil, uluslararası düzeyde yürüyen uzun soluklu deprem tahmin çalışmaları veri tabanına katkı sunmaktır. Bu kapsamda, yıkıcı depremler meydana gelmeden önce doğa ve canlılar üzerinde meydana gelen anormal değişimler gözlem yapan afetzedelerin katılımı ile yüz yüze anket tekniği kullanılarak istatistiki açıdan anlamlı olabilecek şekilde derlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma özelinde elde edilen bulguların daha önce yapılan araştırmaların bulguları ile uyumlu olduğu söylenebilir. Ayrıca, sıra dışı doğa ve canlı davranışlarının bilimsel yollarla derlenip işlenmesi, istatistiki açıdan anlamlandırılması ve var olan depremlerle ilişkilendirilmesi üzerine tüm Dünya'da olduğu gibi Türkiye'de de birçok çalışma yürütülmeye devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında derlenen ve işlevsel verilere dönüştürülmüş olan öncül işaretler geleceğe dönük deprem tahmin çalışmalarında kullanılabilir.

Tüm dünyada, geçmişten beri var olan geleneksel deprem öncülleri büyük yıkıcı depremler sonrasında tutarlı bir şekilde arşivlenmeye devam etmelidir.

TEŞEKKÜR

Elazığ-Sivrice ilçesine ait meteorolojik veri setlerinin bu çalışma kapsamında kullanılmasına izin veren T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı-Meteoroloji Genel Müdürlüğüne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

AFAD, 2020. AFAD Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü-Deprem Dairesi Başkanlığı, Erişim adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/63389>

Alreck P.L., Settle R.B., 1995. The survey research handbook, McGraw-Hill Irwin, Chicago, 213 p.

Barnett V., 2002. Sample survey principles and methods, 3rd ed., London: Arnold, 31 p.

Bhargava N., Katiyar V.K., Sharma M.L., Pradhan P., 2009. Earthquake prediction through animal behavior: A review, *Indian Journal of Biomechanics* 78, 159-165

Biemer P.P., Groves R.M., Lyberg L.E., Mathiowetz N.A., Sudman S., 2004. Measurement Errors in Surveys, John Wiley & Sons, 367 p.

Davies G.F., Richards M.A., 1992. Mantle convection, *The Journal of Geology* 100(2), 151-206.

Fink A., 2017. How to conduct surveys: A Step-By-Step Guide, 6th ed., Sage Publications, California, 85 p.

Fowler F.J., 1995. Improving survey questions: Design and evaluation, Thousand Oaks, Sage, Newbury Park, 13 p.

Freund F.T., Kulahci I.G., Cyr G., Ling J., Winnick M., Tregloan-Reed J., Freund M.M., 2009. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71(17-18), 1824-1834.

Geller R.J., 1997. Earthquake prediction: a critical review, *Geophysical Journal International* 131(3), 425-450.

Grant R.A., Halliday T., Balderer W.P., Leuenberger F., Newcomer M., Cyr G., Freund F.T., 2011. Ground water chemistry changes before major earthquakes and possible effects on animals, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8(6), 1936-1956.

Ikeya M., Yamanaka C., Matsuda T., Sasaoka H., Ochiai H., Huang Q., Nakagawa T., 2000. Electromagnetic pulses generated by compression of granitic rocks and animal behavior, *Episodes Journal of International Geoscience* 23(4), 262-265.

Kamogawa M., 2006. Preseismic lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, *Eos Transactions American Geophysical Union* 87(40), 417-424.

Kondo G., 1966. The variation of the atmospheric electric field at the time of earthquake, *Mem. Kakioka Magnet. Observ.* 12, 11-23.

Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S., 2006. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly, *Journal of Geophysical Research* 111, 1-5.

MGM, 2020. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara, Erişim adresi: <https://www.mgm.gov.tr/>

Morozova L.I., 2005. Satellite monitoring of earthquakes, Vladivostok, Dalnauka, 137 p.

Neuman W.L., 2006. Social research methods: Qualitative and quantitative approaches, 6th ed., Pearson Education, Boston, 46 p.

Nishimura T., Okano H., Tada H., Nishimura E., Sugimoto K., Mohri K., Fukushima M., 2010. Lizards respond to an extremely low-frequency electromagnetic field, *Journal of Experimental Biology* 213(12), 1985-1990.

Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., Ishikawa T., Tokonami S., Shinogi M., 2007. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7(5), 629-635.

Ondoh T., 2003. Anomalous sporadic-E layers observed before M7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake; Terrestrial gas emanation model, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.* 17, 96-108.

Ouzounov D., Bryant N., Logan T., Pulinets S., Taylor P., 2006. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999-2003, *Physics and Chemistry of the Earth* 31(4-9), 154-163.

Presser S., Couper M.P., Lessler J.T., Martin E., Martin J., Rothgeb J.M. and Singer E., 2004. Methods for Testing and Evaluating Survey Questions, *Public Opinion Quarterly-Spring 2004* 109-130.

Pulinets S.A., Dunajacka M.A., 2006. Specific variations of air temperature and relative humidity around the time of Michoacan earthquake M8.1 Sept. 19, 1985 as a possible indicator of interaction between tectonic plates, *Tectonophysics* 431(1-4), 221-230.

Pulinets S.A., Gaivoronska T.B., Contreras A.L., Ciralo L., 2004. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Science* 4(5/6), 697-702.

Pulinets S., Ouzounov D., 2011. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model-An unified concept for earthquake precursors validation, *Journal of Asian Earth Sciences* 41(4-5), 371-382.

Qidong D., Pu J., Jones L.M., Molnar P., 1981. A preliminary analysis of reported changes in ground water and anomalous animal behavior before the 4 February 1975 Haicheng earthquake, *Earthquake Prediction: An International Review* 4, 543-565.

Rikitake T., Oshiman N., Hayashia M., 1993. Macro-anomaly and its application to earthquake prediction, *Tectonophysics* 222(1), 93-106.

St-Laurent F., 2000. The Saguenay, Québec, earthquake lights of November 1988-January 1989: A comparative study with reference to the geatmospheric lights classification proposed by Montandon in 1948 and a description put forward by Yasui in 1968, *Seismological Research Letters* 71(2), 160-174.

TKD, 2021, Türkiye Kızılay Derneği, Afet Yönetimi Genel Müdürlüğü, Erişim adresi: <https://afetyonetimi.kizilay.org.tr/tr/afet-yonetimi-gmy.html>

Toutain J.P., Baubron J.C., 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: a review, *Tectonophysics* 304(1-2), 1-27.

Turcotte D.L., 1991. Earthquake prediction, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 19(1), 263-281.

Ulomov V.I., Mavashev B.Z., 1971. The Tashkent earthquake of 26 April 1966, *Akad. Nauk. Uzbek SSR FAN* 188-192.

Ulukavak M., Yalcinkaya M., 2017. Precursor analysis of ionospheric GPS-TEC variations before the 2010 M7.2 Baja California earthquake, *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8 (2), 295-308.

Ulusoy Ü., Ikeya M., 2000. ESR studies of sepiolites, *Applied Magnetic Resonance* 18(4), 537-548.

Whitehead N.E., Ulusoy Ü., 2013. Macroscopic anomalies before the September 2010 M= 7.1 earthquake in Christchurch, New Zealand, *Natural Hazards & Earth System Sciences* 13, 167-176.

Yamauchi H., Uchiyama H., Ohtani N., Ohta M., 2014. Unusual animal behavior preceding the 2011 earthquake off the pacific coast of Tohoku, Japan: A way to predict the approach of large earthquakes, *Animals* 4(2), 131-145.

Yao Y.B., Chen P., Wu H., Zhang S., Peng W., 2012. Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 Mw 9.0 Japan earthquake, *Chinese Science Bulletin* 57(5), 500-510.

Yu F., Turco R.P., 2001. From molecular clusters to nanoparticles: Role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106(D5), 4797-4814.

Zhang Y., Guo X., Zhong M., Shen W., Li W., He B., 2010. Wenchuan earthquake: Brightness temperature changes from satellite infrared information, *Chinese Science Bulletin* 55(18), 1917-1924.

ARAŞTIRMA VERİSİ (*Research Data*)

Bu çalışmada; yüz yüze anket tekniği kullanılarak elde edilen gözlemsel veriler ve Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilen veri setleri kullanılmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (*Conflict of Interest / Relationship*)

Araştırma kapsamında yer alan bilgiler; herhangi bir kişiye, kuruma, ekipmana çıkar sağlamayı veya kişisel/kurumsal menfaat kazandırmayı amaçlamamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

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



T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI
AFET VE ACİL DURUM
YÖNETİMİ BAŞKANLIĞI

AFAD®

TÜRK DEPREM ARAŞTIRMA DERGİSİ

TURKISH
JOURNAL OF
EARTHQUAKE
RESEARCH



TUSAK
Türkiye Ulusal
Sismoloji ve Deprem
Fiziki Kurumu
Ankara / TÜRKİYE

e-ISSN: 2687-301X