



**ERZURUM İLİ İÇİN ZEMİN BÜYÜTMESİ
ÖZELLİKLERİNİN MİKROTREMOR YÖNTEMİ
VE BİR BOYUTLU ANALİZ YÖNTEMİ İLE
BELİRLENMESİ**

Şeyma SARIGÜL

Dr. Öğr. Üyesi Erdem BAYRAK
Yüksek Lisans Tezi
Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM İLİ İÇİN ZEMİN BÜYÜTMESİ ÖZELLİKLERİNİN MİKROTREMOR
YÖNTEMİ VE BİR BOYUTLU ANALİZ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

(Determination of Soil Amplification Characteristics of Erzurum using Microtremor and One
Dimensional Analysis Methods)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeyma SARIGÜL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdem BAYRAK

Erzurum
Kasım 2024



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**ERZURUM İLİ İÇİN ZEMİN BÜYÜTMESİ ÖZELLİKLERİNİN MİKROTREMOR
YÖNTEMİ VE BİR BOYUTLU ANALİZ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

Dr. Öğretim Üyesi Erdem BAYRAK danışmanlığında, Şeyma SARIGÜL tarafından hazırlanan bu çalışma, 14/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Jeoloji Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Çağlar ÖZER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Erdem BAYRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Kaan Hakan ÇOBAN <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun 31/10/2024
tarih ve 53/18 sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Dr. Öğretim Üyesi Erdem BAYRAK* danışmanlığında sunulan “Erzurum İli için Zemin Büyütmesi Özelliklerinin Mikrotremor Yöntemi ve Bir Boyutlu Analiz Yöntemi İle Belirlenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Yöntem	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuç ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	8	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Şeyma SARIGÜL	Dr. Öğr. Üyesi Erdem BAYRAK
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya cihaz desteği sağlayan Atatürk Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi'ne, PROJEO Mühendislik'e ve veri desteği için Erzurum Büyükşehir Belediyesi'ne teşekkür ederim. Bu süreci sağlıklı sonuçlandırmamı sağlayan İnşaat Mühendisi Fatih ÇARIKCIOĞLU'na, Jeofizik Yüksek Mühendisi Ömer Lütfü AYDIN'a, Jeofizik Mühendisi Mücahit KARAKÜTÜK'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bilgi ve becerisi ile çalışmama yön veren çok değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Erdem BAYRAK'a, tezin geliştirilmesinde yardım ve desteklerini esirgemeyen jüri üyelerine ve kıymetli eşim Ömer Faruk AVCI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Hayatım boyunca hep arkamda duran, eğitimime sonsuz destek veren ve bu tez çalışmamda benden desteğini esirgemeyen kıymetli Babacım, Annecim ve Kardeşim Ali'ye teşekkürlerimi sunarım.

Şeyma SARIGÜL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZURUM İLİ İÇİN ZEMİN BÜYÜTMESİ ÖZELLİKLERİNİN MİKROTREMOR YÖNTEMİ VE BİR BOYUTLU ANALİZ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Şeyma SARIGÜL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erdem BAYRAK

Amaç: Türkiye bulunduğu konum itibarı ile aktif depremselliğe sahip olup, büyük ve yıkıcı depremlerin yaşandığı bir ülkedir. Erzurum ili de yüksek seviyede deprem tehlikesi olan bir bölgede yer almakta olup şehrin büyük çoğunluğu aktif faylar tarafından kesilen alüvyon zeminler üzerinde gelişmiştir. Bu tezin temel amacı Erzurum ili içinde yer alan Palandöken ve Yakutiye ilçelerinde zeminlerin büyütmeye özelliklerini tek istasyon mikrotremor ölçüleri ve 1-boyutlu doğrusal eşdeğer analiz yöntemi kullanarak belirlemektir. Bu araştırma, bölgedeki zemin koşullarının deprem etkileri üzerindeki potansiyel etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza yardımcı olacaktır.

Yöntem: Bu çalışma kapsamında, öncelikle 25 farklı noktada tek istasyon mikrotremor tekniği ile üç bileşenli gürültü verileri toplanmıştır. Ardından, bu veriler Nakamura Yatay/Düşey spektral oran yöntemi ile analiz edilerek, çalışma alanına ait zemin hakim frekans (periyot) ve H/V değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak, çalışma alanına ait hakim periyot, zemin büyütmeye ve hasar görebilirlik indisi haritaları hazırlanmıştır. 1-boyutlu doğrusal eşdeğer analiz yöntemi, bölgedeki zeminin deprem sırasındaki dinamik davranışını incelemek ve tepki spektrumlarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu analiz sonucunda pek çok dinamik zemin parametresi elde edilebilmektedir. DEEPSOIL yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen bu yöntemle, çalışma alanındaki yerel zemin tabakalarında oluşabilecek deprem etkilerini değerlendirmek için, bölgenin sismik tehlike verileri ile uyumlu olarak doğrusal eşdeğer analiz yöntemi kullanılarak zemin büyütmeye analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Zemin hakim periyot değerleri 0.15 ile 3.7 sn arasında değişmektedir. H/V değerleri ise 2 ile 9 arasında değişmektedir. Palandöken Dağı eteklerinde 4'ten düşük HV değerleri gözlemlenirken, ova bölgesinde daha yüksek değerler elde edilmiştir. Periyot ve büyütmeye faktörü değerleri kullanılarak elde edilen Hasar Görebilirlik İndisi (Kg), deprem sırasındaki zemin performansı hakkında bilgi sağlar. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz ile elde edilen en büyük spektral ivme değeri ile deprem kaydından elde edilen en büyük spektral ivme değerleri birbirlerine oranlanarak zemin büyütmeye katsayıları elde edilmiştir.

Sonuç: Tüm bu analizlerin, yüksek periyot, yüksek HV ve yüksek Kg değerlerinin, çalışmanın ova kesiminde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu bölgedeki zemin araştırmaları, büyük bir dikkat ve multidisipliner bir yaklaşımla yürütülmelidir.

Anahtar Kelimeler: Erzurum, mikrotremor, Nakamura yöntemi, zemin hakim periyodu, hasar görebilirlik indisi, bir boyutlu eşdeğer analiz

Kasım 2024, 48 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

DETERMINATION OF SOIL AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF ERZURUM USING MICROTREMOR AND ONE DİMENSIONAL ANALYSIS METHODS

Şeyma SARIGÜL

Supervisor: Asst. Dr. Erdem BAYRAK

Purpose: Turkey has active seismicity due to its location and is a country where large and destructive earthquakes frequently occur. Erzurum province is also located in a region with a high level of earthquake hazard and most of the city has developed on alluvial soils intersected by active faults. The main objective of this thesis is to determine the amplification properties of soils in Palandöken and Yakutiye districts of Erzurum province using single station microtremor method and 1-D linear equivalent analysis method. This research will help us to understand in more detail the potential effects of soil conditions in the region on earthquake effects.

Method: Within the scope of this study, firstly, three-component noise data were collected by single station microtremor method at 25 different locations. Then, these data were analysed by Nakamura Horizontal/Vertical spectral ratio method and the dominant frequency (period) and H/V values of the study area were obtained. Using these values, the dominant period, ground amplification and vulnerability index maps of the study area were prepared. The 1-D linear equivalent analysis method is used to investigate the dynamic behaviour of the soil in the region during earthquakes and to determine the response spectra. Many dynamic soil parameters can be obtained as a result of this analysis. In order to evaluate the earthquake effects that may occur in the local soil layers in the study area, ground amplification analyses were performed by using the linear equivalent analysis method in accordance with the seismic hazard data of the region by using DEEPSOIL software.

Findings: Soil dominant period values vary between 0.15 and 3.7 s. H/V values vary between 2 and 9. While HV values lower than 4 were observed in the foothills of Palandöken Mountain, higher values were obtained in the plain region. The Vulnerability Index (Kg), which is obtained by using the period and amplification factor values, provides information about the soil performance during earthquakes. Ground magnification coefficients were obtained by dividing the maximum spectral acceleration values obtained by one-dimensional equivalent linear analysis and the maximum spectral acceleration values obtained from the earthquake record.

Results: All these analyses show that high period, high HV and high Kg values are mainly distributed in the lowland part of the study area. Soil investigations in this region should be carried out with great care and a multidisciplinary approach.

Keywords: Erzurum, microtremor, Nakamura method, soil dominant period, vulnerability index, one dimensional linear equivalent analysis

November 2024, 48 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
Genel Bilgiler	1
Çalışma Alanı.....	1
Çalışma Alanının Jeolojisi	2
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Önceki Çalışmalar	4
Zemin Büyütmesi	5
Çalışma Alanının Depremselliği	6
VERİ VE METOT	10
Tek İstasyon Mikrotremor Verileri	10
Yatay/Düşey Spektral Oran Yöntemi (Nakamura Yöntemi, H/V):	10
Hasar Görebilirlik İndisi (Kg)	11
Zemin Davranış Analizleri	11
Eşdeğer lineer zemin davranış analizi.....	13
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	16
Tek İstasyon Mikrotremor Ölçümleri	16
Nakamura Yöntemi ile Frekans ve H/V Değerlerinin Elde Edilmesi	17
Eşdeğer Lineer Analiz Sonuçları	26
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR.....	33
ÖZGEÇMİŞ.....	36

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 1900'den Günümüze Kadar Erzurum ve Civarını Etkileyen Depremler	9
Tablo 2. Tek İstasyon Mikrotremor Ölçü Noktalarına Ait Koordinat Bilgileri ve Her Nokta İçin Elde Edilen F (frekans), A(büyütme faktörü), T (periyot) ve Kg (hasar görülebilirlik indisi) Değerleri	19
Tablo 3. Nakamura Yöntemi İle Elde Edilen HV Sonuçları ve 1-boyutlu Doğrusal Eşdeğer Analiz Sonucu Elde Edilen Zemin Büyütmelerinin Karşılaştırılması	30



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu ve Google Earth görüntüsü	2
Şekil 2. Çalışma alanına ait genelleştirilmiş jeoloji haritası	3
Şekil 3. Deprem dalgalarının farklı zemin türlerindeki davranışı	6
Şekil 4. Erzurum ve çevresindeki aktif faylar ve 1900-2024 yılları arasında meydana gelen depremlerin merkez üssü dağılımı	8
Şekil 5. Mikrotremor ölçümlerini açıklamak için kullanılan basit metod.....	11
Şekil 6. Zemin davranış analizinin n tabakalı bir ortamda şematik gösterimi	12
Şekil 7. Eşdeğer lineer analiz yönteminde kullanılan birim şekil değiştirme-gerilme grafiği. 13	
Şekil 8. DeepSoil programında zemin profilinin oluşturulması ve spektral ivme sonuçları (Soldaki şekilde zemin tabakaları ve Vs hızlarını göstermektedir, sağdaki grafik ise deprem kaydının spektral ivmesini ve yüzeydeki spektral ivmeyi göstermektedir.) . 15	
Şekil 9. Maraş depreminin 3141 kodlu istasyondaki kaydından elde edilen spektral ivme (mavi), TBDY'e göre Erzurum il merkezi için elde edilen dizayn spektrumu (gri) ve ölçeklendirilmiş veriye ait spektral ivme grafiği.....	15
Şekil 10. Mikrotremor ölçümlerinde kullanılan sismometre.....	16
Şekil 11. Arazide elde edilen mikrotremor verilerinden Nakamura yöntemi ile zemin hakim periyot ve büyütme faktörü değerlerinin elde edilmesi a) Arazide alınan ham veriler b) 0.05-20 Hz Aralığında bant geçişli filtre uygulanmış veriler c) Uygun zaman pencerelerin seçilmesi d) Hakim frekansı belirlemek için H/V eğrisi ve büyütme faktörü	17
Şekil 12. Nakamura yöntemi ile her bir ölçü noktasında elde edilen HV grafikleri	20
Şekil 13. Nakamura yöntemi ile elde edilen zemin hakim periyot değerleri haritası (Siyah çizgiler aktif fayları göstermektedir, üçgenler ise ölçü noktalarını göstermekte olup periyot değerlerine göre renklendirilmiştir).....	23
Şekil 14. Nakamura yöntemi ile elde edilen zemin büyütme faktörü (H/V) değerleri haritası (Siyah çizgiler aktif fayları göstermektedir, üçgenler ise ölçü noktalarını göstermekte olup H/V değerlerine göre renklendirilmiştir).....	24
Şekil 15. Hasar görülebilirlik indisi haritası (Siyah çizgiler aktif fayları göstermektedir, üçgenler ise ölçü noktalarını göstermekte olup Kg değerlerine göre renklendirilmiştir)	26
Şekil 16. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonrası R1-R10 noktaları için elde edilen PSA grafikleri.....	27

Şekil 17. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonrası R11-R20 noktaları için elde edilen PSA grafikleri.....	28
Şekil 18. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonrası R21-R25 noktaları için elde edilen PSA grafikleri.....	29



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

A	: Zemin Büyütme Faktörü
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
F	: Zemin Hakim Frekansı
H/V	: Nakamura yöntemi ile elde edilen yatay/düşey genlik oranı
Hz	: Hertz
Kg	: Hasar Görebilirlik İndisi
M	: Magnitüd
m	: Metre
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
sn	: Saniye
T	: Zemin Hakim Periyodu
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDTH	: Türkiye Deprem Tehlike Haritası
Vs30	: Yer altındaki ilk 30 metredeki tabakaların kesme dalga hızlarının ortalaması

GİRİŞ

Genel Bilgiler

Deprem, insanlık tarihi boyunca meydana gelen en önemli doğal afetlerden biri olarak, büyük yıkımlara neden olmuştur. Ülkemiz, Dünya'nın en aktif deprem bölgelerinden biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almakta olup, özellikle yapı tasarımındaki eksiklikler ve zemin özelliklerinin yetersiz belirlenmesi nedeniyle birçok bina bu depremler sonucunda yıkılmıştır (Taşdelen vd. 2015). Depremlerin sebep olacağı hasarı en aza indirmek, insan hayatını koruma konusunda en önemli adımlardan biridir.

Depremler sırasında zemine etki eden dinamik kuvvetler, zeminlerin farklı tepkiler vermesine yol açar. Bu farklı zemin davranışı, binaların depreme verdiği tepkilerde çeşitliliğe neden olabilir ve benzer yapılar, farklı zemin koşulları altında farklı düzeylerde hasar görebilir. Bu sebeple, zeminlerin fiziksel özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesi, güvenli yapı tasarımı açısından büyük bir önem taşımaktadır. Yapıların ve zeminlerin sismik kuvvetlere karşı verdikleri tepkilerin bir arada ele alınması, deprem-zemin-yapı etkileşiminin doğru şekilde değerlendirilmesi açısından zorunludur. Zemin ile yapı arasındaki bu etkileşim, her iki unsurun da davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle, yüzey tabakalarının özelliklerinin, yani yerel zemin koşullarının bilinmesi, deprem kuvvetlerinin yapı üzerindeki etkisini tahmin etmede kritik bir rol oynamaktadır (Nakamura, 1989).

Zemin özelliklerinin belirlenmesinde sondaj ve laboratuvar çalışmalarının yanı sıra jeofizik yöntemler de sıkça kullanılmaktadır (Borcherdt vd. 1991; Park vd. 1999; Okada, 2003). Jeofizik yöntemlerin temel prensibi, aktif ya da pasif kaynaklar kullanılarak oluşturulan enerjinin alıcılarda kaydedilip analiz edilmesi üzerine kuruludur. Bu çalışmada ise, hem ülkemizde hem de dünya genelinde yaygın olarak kullanılan pasif kaynaklı mikrotremor yöntemi tercih edilmiştir.

Çalışma Alanı

Bu çalışmada, Erzurum ili Yakutiye ve Palandöken ilçeleri çevresinde mikrotremor ve eşdeğer lineer analiz yöntemleri kullanılarak zemin özellikleri incelenmiştir (Şekil 1). Çalışmada zemin hakim periyot, büyütme faktörü ve hasar görebilirlik indeksi gibi parametreler belirlenmiştir.

Erzurum ilinin merkez ilçeleri Palandöken ve Yakutiye'dir. Yakutiye ilçesi şehrin kuzeydoğusunda, Palandöken ilçesi ise güneyinde yer almaktadır. Türkiye İstatistik

Kurumu'nun 2023 verilerine göre, Yakutiye ilçesinin nüfusu 186.066, Palandöken ilçesinin nüfusu ise 177.109'dur. Erzurum genelinde toplam 197.862 adet kullanılan bina bulunmaktadır (<https://www.tuik.gov.tr/>).



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu ve Google Earth görüntüsü (<https://earth.google.com/>)

Çalışma Alanının Jeolojisi

Erzurum, Erzurum-Kars Platosu içinde yer almakta olup, çarpışma kökenli volkanik aktivitelerin 11 ila 2,5 milyon yılları arasındaki jeolojik süreçlerini barındırması nedeniyle büyük bir öneme sahiptir (Keskin, 1998).

Bu bölge, Arap ve Anadolu levhalarının çarpışması sonucunda Tetis Okyanusu'nun kapanması ve yer kabuğunun kalınlaşmasıyla yükselmiştir. Çarpışma sonucunda meydana gelen volkanik faaliyetler, proklastik malzemeler ve lavlar ile Erzurum-Kars Platosu'nun büyük bir kısmını kaplamıştır.

11 ila 2,5 milyon yıl süren bu volkanik aktivite, yer yer 1 km kalınlığa ulaşan volkanik tabakaların birikmesine neden olmuştur. Bu volkanik malzemeler, genellikle KD-GB doğrultusunda uzanan ve volkanik faaliyetler boyunca aktif olan fay hatlarıyla yüzeye çıkmış, havzaları lavlarla doldurmuştur (Keskin, 1998; Tavlaşoğlu, 2021).

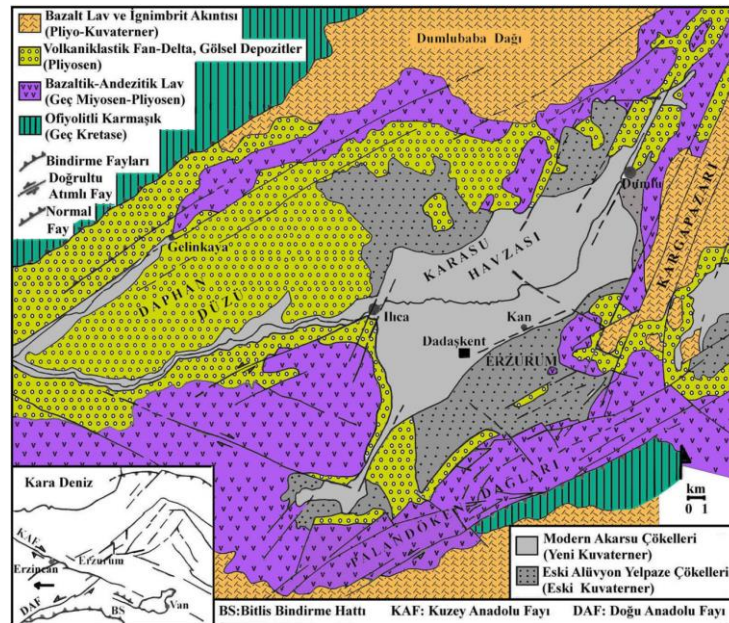
Bölgenin jeomorfolojik yapısı incelendiğinde, Erzurum ve çevresindeki volkanik malzemelerin yükselmesi sonucu oluşan düzlüklerin, Karasu ve Palandöken Dağları'ndan gelen alüvyon malzemeleriyle dolarak günümüzdeki şeklini aldığı görülmektedir (Aydiner Mühendislik, 2016).

Çalışma alanında üç farklı jeolojik formasyon bulunmaktadır (Akbaş vd. 2011). Bu formasyonlar, alt kısımdan üst kısma doğru Üst Miyosen-Pliyosen dönemine ait Çobandede volkanitleri, Kuvaterner yaşlı eski alüvyon ve güncel alüvyon olarak sıralanmaktadır.

Yeni Alüvyon (Qal): Akarsu vadilerinde ve düzlük alanlarda oluşumu devam eden bu alüvyonlar, çalışma alanının en alt düzlüğünü kaplamaktadır.

Eski Alüvyon (Qeal): Ovaların kenar bölgelerinde daha önce oluşmuş alüvyonlardır. İnceleme sahasında, bu alüvyon tabakası ile Çobandede volkanitleri arasında yer alır. Genellikle daha sıkı yapıda olup, iri taneli (kum, çakıl, blok) ve yer yer az pekişmiş eski Karasu çökellerinden oluşur.

Çobandede Volkanitleri (Tç): Genellikle bazaltlardan oluşan ve Pliyosen dönemine ya da daha genç yaşlara ait volkanik kayalardır. Çobandede bazaltları (Tokel, 1965) ve Kargapazarı bazaltları (Akkuş, 1965) olarak da adlandırılmıştır. Proklastik malzemelerin önemli oranda bulunması ve "Çobandede" isminin yaygın kullanılması nedeniyle bu isim tercih edilmiştir.



Şekil 2. Çalışma alanına ait genelleştirilmiş jeoloji haritası (Akbaş vd. 2011)

KURAMSAL TEMELLER

Önceki Çalışmalar

Nakamura (1989) anakaya konumu ve zemin-anakaya sismik empedans farkının zemin büyütme kapasitesindeki rolünü vurgulamıştır. Zemin tabakaları deprem dalgalarını belirli frekans aralıklarında büyüttüğü için bu frekanslar, mühendislik açısından bazen çok kritik olabilir ya da yapılar için tehlike oluşturabilir. Depremin olası zararlarını azaltmanın bir yolu, zeminin ve üzerine yapılacak yapıların hakim frekans frekanslarının birbirinden uzak tutulması sağlanır.

Okan (2005), Güney Marmara Bölgesi'nde yer alan Yenişehir (Bursa) ilçesinin alüvyal zeminlerinin büyütme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, jeoteknik veriler kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuş, ilçede sondajlar ve jeofizik çalışmalar yapılarak yerel zemin koşulları belirlenmiştir. Ardından, görgül ilişkiler, tek boyutlu sayısal analiz ve mikrotremör yöntemiyle zemin büyütmesi değerlendirilmiştir. Standart penetrasyon darbe sayısından (SPT-N) makaslama dalgası hızı (V_s) tahmin edilmiş, ayrıca bu çalışmada ölçülen V_s değerleriyle zemin büyütme katsayıları hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tekebaş (2011), Yalova ve çevresindeki (Altınova, Çiftlikköy ve Çınarcık) 81 noktada 92 mikrotremör ölçümü yapmıştır. Ölçümler CMG 6-TD cihazı ile Ekim, Ocak, Nisan ve Temmuz aylarında dört farklı dönemde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, Nakamura'nın (1989) tek istasyon yöntemi ile yatay/düşey (H/V) spektral oranlar hesaplanarak zemin tepki fonksiyonları oluşturulmuştur. H/V eğrileri jeolojik verilerle birlikte değerlendirilerek Yalova'nın zemin özellikleri belirlenmiştir.

Hazer (2013) çalışmasında MASW ve mikrotremör yöntemleri kullanılarak Denizli kent merkezindeki zeminlerin hakim titreşim periyotları ve kesme dalgası hızları belirlenmiştir. Kesme dalgası hızına dayalı olarak zemin büyütme değerleri hesaplanmış, SPT-N değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, inceleme alanının güneyinde zemin özelliklerinin daha iyi olduğunu, kuzeye doğru zayıf zeminlerin ortaya çıktığını göstermiştir. Elde edilen bulgular, literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içindedir.

Subaşı (2017), Güzelyalı (Bursa) beldesinde mikrobölgeleme amacı ile yapılan sondaj verilerini kullanarak zemin dinamik analizlerini yapmıştır. Ayrıca bu sondaj alanlarında tek istasyon mikrotremör ölçümleri alarak zemin hakim periyodu ve zemin büyütmelerini

belirlemiştir. Her iki yöntem ile belirlediği kayma şekil değiştirmesi parametresini karşılaştırarak arasındaki uyumu incelemiştir.

Atar (2019), Antalya'nın Alanya ilçesinde yer alan Cumhuriyet ve Obagöl mahallelerini kapsayan Oba Düzlüğü'ndeki zeminlerin dinamik özellikleri incelemiştir. Çalışma, mikrotremör ölçümleri, saha tepki spektrumlarının oluşturulması, hâkim titreşim periyotları ve bunlara karşılık gelen büyütme katsayılarının araştırılmasını içermektedir. Bölge, yumuşak kil ve turba gibi zayıf zemin sınıflarına sahiptir ve yer altı su seviyesi yüzeye oldukça yakındır. Bölgenin deprem geçmişi, sorunlu zemin yapısı ve yüksek yer altı su seviyesi, çalışma alanının seçilmesinde etkili olmuştur.

Karslı ve Bayrak (2024), Erzurum ili Yakutiye ilçesi Hilalkent Mahallesi ve çevresinde mikrotremör yöntemiyle zemin özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, zemin hâkim periyodu, büyütme faktörü, Vs30 ve hasar görebilirlik indisi belirlenmiştir. İlk olarak, 60 noktada tek istasyon mikrotremör yöntemiyle üç bileşenli gürültü kayıtları alınmış, ardından bu veriler Nakamura Yatay/Düşey yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen zemin hâkim periyodu ve büyütme faktörü değerlerine dayanarak Vs30 ve hasar görebilirlik indisi haritaları oluşturulmuştur.

Saraç (2023), Erzurum ilinde bulunan Atatürk Üniversitesi kampüs alanında zemin özelliklerini belirlemek için 45 adet tek istasyon mikrotremör ölçüsü almıştır. Tek istasyon mikrotremör yöntemi ile; zemin baskın periyodu (T), yatay/düşey spektral oranı (H/V) ve ampirik bağıntılar kullanılarak anakaya derinliği, hasar görebilirlik indisi (Kg) ve Vs30 değerleri elde edilmiştir. Kampüsün güneydoğusunda yüksek frekans değerleri gözlenirken diğer alanlarda daha düşük frekans değerleri elde edilmiştir.

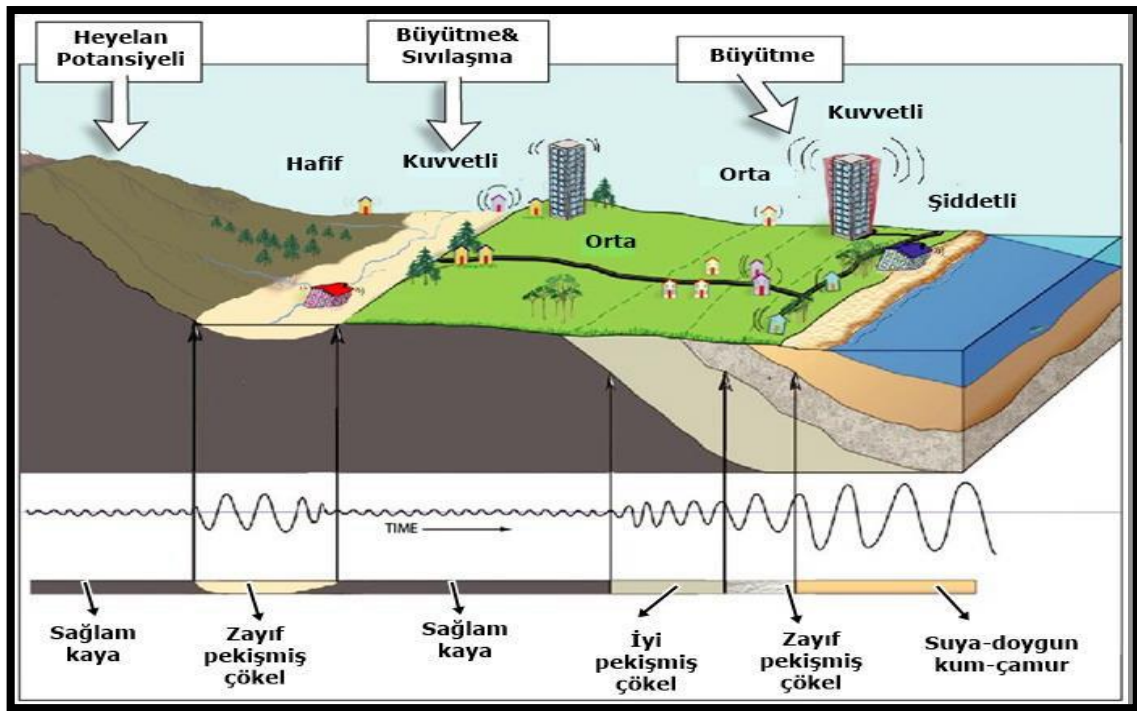
Zemin Büyütmesi

Zemin büyütmesi, büyük depremler sırasında yerleşim alanlarında meydana gelen zararları etkileyen önemli faktörlerden biridir. Deprem sırasında yumuşak zemin üzerindeki yapıların sert zeminlerdeki yapılara göre daha fazla hasar görmesinin başlıca nedenlerinden biri, zemin büyütme etkisidir. Bu etkinin, ana kaya ile belirli bir derinlik arasındaki sayısal değerlendirmesi ise "zemin büyütme oranı" olarak adlandırılır (Kramer, 1996).

Zemin büyütmesi, deprem sırasında kaynak noktadan ana kayaya doğru yayılan ve yüzeye ilerleyen sismik dalgaların, yumuşak zemin tabakaları içerisinde hareket ederken genliklerinde meydana gelen artış olarak tanımlanabilir. Zemin tabakalarının fiziksel özellikleri ve bu tabakaların sismik dalgalara karşı gösterdiği direnç, yüzeydeki hareketin karakteristiğini de etkiler. Zemin büyütmesi, depremin frekansına bağlı olarak değişir, çünkü yumuşak zemin

tabakaları her frekansta aynı tepkiyi göstermez. Bazı frekanslarda sismik dalgalar büyütülürken, bazı frekanslarda sönümlenir. En yüksek zemin büyütmesinin hangi periyotlarda gerçekleşeceği, sismik dalgaların hızı ve yumuşak zemin tabakalarının kalınlığına bağlıdır. Analizler sonucunda en fazla büyütmenin gözlemlendiği periyot, "zemin hâkim periyodu" (T_0) olarak adlandırılır.

Zemin büyütme değerinin belirlenmesi, çalışma alanında yüzey spektrumunun ana kaya spektrumuna oranlanmasıyla yapılır. Ayrıca, zemin büyütme analiz sonuçlarına göre tehlike düzeyi, büyütme ölçütüne bağlı olarak belirlenir (Ansal vd., 2002).



Şekil 3. Deprem dalgalarının farklı zemin türlerindeki davranışı (Anonim, 2022).

Çalışma Alanının Depremselliği

Türkiye, deprem riski yüksek bir bölgede yer almakta olup, geçmişten günümüze kadar birçok büyük deprem yaşamış ve bu depremler ciddi can ve mal kayıplarına yol açmıştır. Depremler önlenemez ya da ertelenemez olsa da, alınacak önlemlerle hasarların en aza indirilmesi mümkündür. Can kayıpları açısından bakıldığında Türkiye, dünya sıralamasında Çin, Japonya ve İtalya'dan sonra gelmektedir. Depremler yalnızca can kayıplarına değil, aynı zamanda Türkiye ekonomisi üzerinde de büyük olumsuz etkiler yaratmaktadır. Türkiye'nin genç bir jeolojik yapıya sahip olması, kıvrımlı fay hatları ve fay zonlarının yoğunluğu, depremlerin özellikle bu bölgelerde sık görülmesine neden olmaktadır.

Erzurum ili ise, çoğu volkanik kökenli olan Dumlu (3169 m), Palandöken (3176 m) ve Kargapazarı (3120 m) dağlarıyla çevrilmiştir (Keskin, 1998). Arap, Afrika, Avrasya ve Anadolu levhaları arasında devam eden tektonik hareketler, Erzurum ve çevresinde çeşitli fay hatları ve çatlakların oluşumuna sebep olmuştur. Erzurum ve civarındaki önemli fay hatları arasında şunlar bulunmaktadır (Koçyiğit ve Canoğlu, 2017):

- Erzurum-Dumlu Fay Zonu (EDFZ),
- Palandöken Fay Zonu (PFZ),
- Başköy-Kandilli Fay Zonu,
- Aşkale Fay Zonu (AFZ).

Lahn (1939), yaptığı çalışmada bölgedeki volkanizmanın kökeninin üst Miyosen dönemine dayandığını vurgulamıştır. Erinç (1953) ise Erzurum'un belirgin tektonik yapılarının kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda olduğunu belirtmiştir. Erentöz (1954) Erzurum ve çevresinde meydana gelen önemli tektonik hareketleri ele almıştır. Lahn (1956), bölgenin jeolojik gelişiminin özellikle Oligosen ve Miyosen dönemlerinde önemli ilerlemeler kaydettiğini ifade etmiştir.

Atalay (1978), Erzurum'un şekillenmesinde Miyosen-Pliyosen ve hatta Kuvaterner dönemlerinde oluşan gerilimler sonucu meydana gelen faylanmaların rol oynadığını söylemiştir. Ayrıca, Karlıova Üçlü Kesişim Noktası'nda Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu fay zonlarının kesiştiğine dikkat çekmiş ve bu bölgenin Erzurum'u da etkileyebileceğini belirtmiştir.

Demir (1985), Erzurum-Kars depremi sonrasında can ve mal kayıplarının yaşandığını, bu nedenle yapıların sınıflandırılarak depreme karşı dayanıklılıklarının ölçülmesi gerektiğini öne sürmüştür. Yarbaşı ve arkadaşları (2002), Erzurum'un ikinci derece deprem bölgesinde yer aldığını ve şehrin büyük bölümünün aktif faylar üzerinde bulunan alüvyon yelpazelerinin üzerinde kurulu olduğunu belirterek, bölgenin deprem riski taşıdığını belirtmişlerdir.

Gök vd. (2007), depremlerin yol açtığı ekonomik kayıpların yanı sıra sosyal ve psikolojik etkilerine değinmişlerdir. Yapıcı (2015) ise Anadolu'nun büyük bir deprem kuşağı üzerinde yer aldığını ve hem tarihsel hem de aletsel dönemlerde farklı büyüklüklerde depremlerin yaşandığını belirtmiştir.

Koçyiğit ve Canoğlu (2017), Erzurum çek-ayır havzasının gelecekte deprem üretme potansiyeli taşıyan tektonik bir bölge olduğuna dikkat çekmiştir. Kuşçu (2019), Erzurum ve çevresinin litolojik yapısının oldukça karmaşık olduğunu vurgulamıştır. Özer vd. (2019), Doğu

Tablo 1. 1900'den Günümüze Kadar Erzurum ve Civarını Etkileyen Depremler (AFAD, 2022)

Tarih	Boylam	Enlem	Derinlik (km)	Büyükölük	Yer
08.11.1901	41,53	40,03	10	6,1 (Ms)	Pasinler-Erzurum
28.04.1903	42,5	39,1	30	6,3 (Ms)	Malazgirt-Muş
28.12.1906	40,5	42,0	30	6,0 (Ms)	Oltu-Erzurum
13.09.1924	41,94	39,96	10	6,8 (Ms)	Köprüköy-Erzurum
17.08.1949	40,62	39,57	40	6,7 (Ms)	Tercan-Erzincan
19.08.1966	41,56	39,17	26	6,9 (Ms)	Varto-Muş
20.08.1966	40,98	39,42	14	6,2 (Ms)	Karlıova-Bingöl
30.10.1983	42,173	40,331	15	6,6 (Mw)	Horasan-Narman-Erzurum

VERİ VE METOT

Tek İstasyon Mikrotremor Verileri

Mikrotremor ya da küçük titreşimler, sismik olayların dışındaki faktörlerin etkisi ile meydana gelen titreşimlerdir. Bu titreşimlerin genlikleri 0,1-1 mikron arasında ve frekansları 0,05-20 Hz arasında değişmektedir. Bu titreşimlerin nedenleri arasında yeraltı sularındaki hareketler, sismik hareketler, atmosfer etkileri, gelgitler ve kültürel gürültüler yer alır. Bu faktörler, insanların hissetmediği fakat hassas sismometreler tarafından algılanır. Bu dalgalar periyotlarına göre kısa ve uzun periyotlu olarak ikiye ayrılır. Kısa periyotlu mikrotremorlar genellikle rüzgar, şehir trafiği ve endüstriyel faaliyetler gibi etkilerden kaynaklanırken, uzun periyotlu mikrotremorlar ise düşük basınç, okyanus dalgalarının etkileri ve gelgit hareketlerinden kaynaklanır.

Mikrotremorların en belirgin özelliklerinden biri, yerden yere önemli ölçüde değişiklik göstermeleridir. Bu değişiklikler, yer altı yapısı ile bağlantılıdır. Mikrotremor yönteminin temel prensibi, titreşimlerin bu sığ jeolojik yapıdaki değişimlerin nasıl farklılaştığına dayanır.

Sert zeminlerde daha küçük periyot ve genlik değerleri gözlenirken yumuşak zeminlerde ise daha büyük periyot ve genlik değerleri gözlenmektedir. Bu durum baskın periyot süresinin kısılmasına yol açar. Kanai ve Tanaka (1961), deprem sırasında ölçülen yerin baskın periyotları ile mikrotremor ölçümleriyle elde edilen baskın periyotların ilişkili olduğunu ve eğer zemin homojen ve basitse bu benzerliğin daha güçlü olduğunu belirtmiştir.

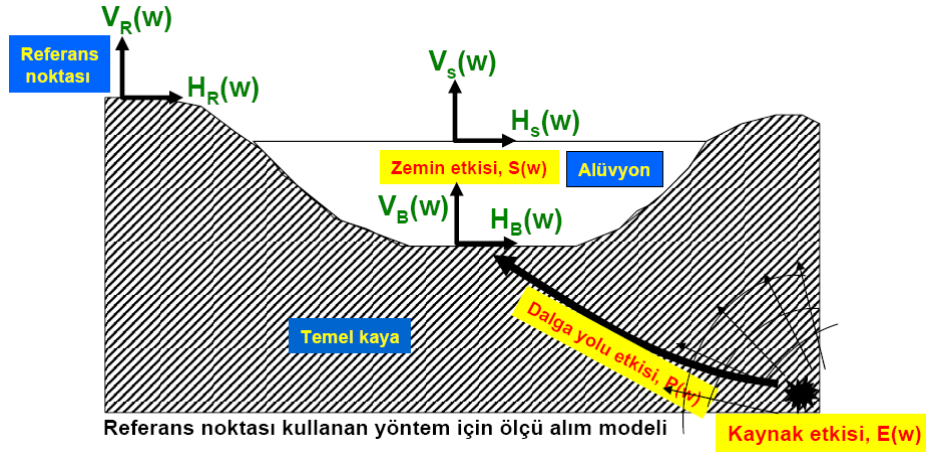
Zemin hâkim periyodu (T) ve zemin büyütme faktörü (H/V) değerleri tek istasyon mikrotremor yöntemi ile tespit edilebilir. H/V oranı ile yapılan değerlendirme, Nakamura tekniği olarak bilinir ve bu yöntemle mikrotremor verileri analiz edilerek zemin parametreleri hesaplanabilir. Mikrotremor çalışmaları sırasında, belirli bir süre boyunca kaydedilen veriler analiz edilerek sonuçlar değerlendirilir.

Yatay/Düşey Spektral Oran Yöntemi (Nakamura Yöntemi, H/V):

Bu yöntemin temel amacı, tek bir istasyonda yapılan mikrotremor ölçümlerinde kaydedilen üç bileşenli verilerin yatay bileşenlerinin karekök ortalamasının, düşey bileşene oranlanmasıdır (Nakamura, 1989).

Nakamura (1989) yönteminde, Rayleigh dalgalarının yarı sonsuz ortamda yayılan bir tabakalı modeli yaklaşımı ile mikrotremorları açıklamıştır. Fourier frekans alanında dört farklı genlik spektrumu tanımlamıştır. Yer yüzeyindeki yatay (H_s) ve düşey (V_s) hareket bileşenlerine

ait genlikler ile üst tabakanın tabanındaki yatay (H_B) ve düşey (V_B) hareket bileşenlerine ait genlik spektrumlarını kapsamaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Mikrotremor ölçümlerini açıklamak için kullanılan basit metod (Nakamura, 1989)

Yer hareketi yüzeydeki yatay ve dikey bileşenler cinsinden tanımlanır. K-G ve D-B olarak kaydedilen yatay bileşenlerin ortalamasını almak için (1.1) formülünden yararlanılır ve ardından, düşey bileşen $V_S(w)$ ile oranlanarak (1.2) formülü kullanılarak sonuç elde edilir.

$$H_S(\omega) = \sqrt{NS(\omega)^2 + EW(\omega)^2} \quad \text{Denklem 1.1}$$

$$S_M(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} \quad \text{Denklem 1.2}$$

Hasar Görebilirlik İndisi (K_g)

Nakamura (1997, 2000) çalışmalarında, hasar görebilirlik indisi (K_g) ile H/V oranı ve periyot arasındaki ilişkiyi incelemiş ve bu yöntemle deprem gerçekleşmeden önce çalışma alanındaki riskli bölgelerin tespit edilebileceğini öne sürmüştür. Hasar görebilirlik indisi (K_g) değerini ise şu şekilde hesaplamıştır.

$$(K_g) = A^2 * T \quad \text{Denklem 1.3}$$

Burada K_g hasar görebilirlik indisi, A büyütme faktörü ve T hakim periyot (1/f) değerleridir.

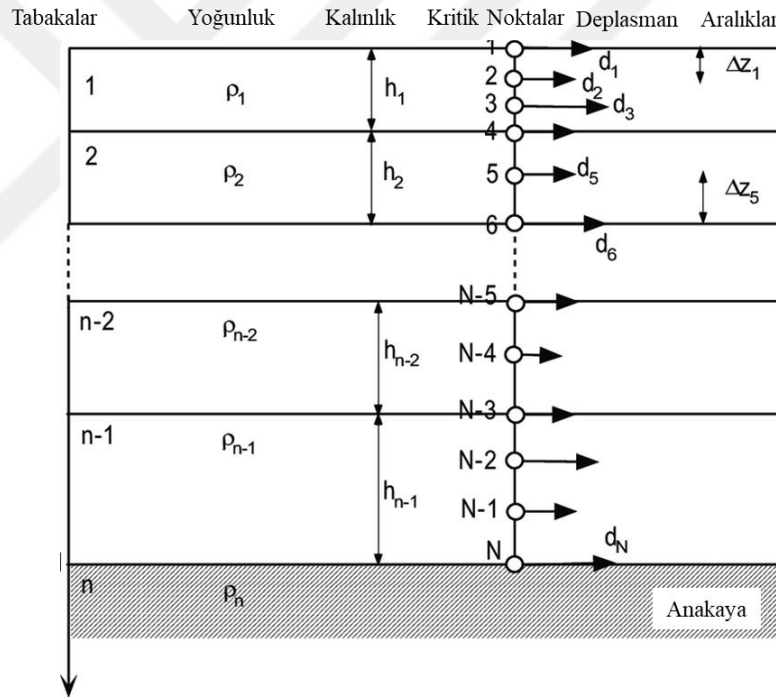
Zemin Davranış Analizleri

Kuvvetli yer hareketleri sırasında zemin tabakalarında meydana gelen kayma deformasyonları, yapısal hasar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu kayma deformasyonları, depremin ivme kayıtlarıyla birlikte yapılan 2 ve 3 boyutlu dinamik analizler aracılığıyla tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda, zemin dinamik davranışının incelenmesi amacıyla, pratik ve

güvenli sonuçlar veren 1-boyutlu (1B) zemin dinamik analizlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır (Ansal vd. 2011). 1B zemin dinamik analizleri, anakayadan yüzeye kadar tabakalar boyunca ilerleyen deprem dalgasının yayılımını incelemektedir. 1B varsayımlarda, zeminlerin yatay yönde homojen ve sonsuz olduğu varsayılmaktadır (Bardet ve Tobita, 2001). Bu varsayımlar ile yapılan analizler, deprem dalgalarının yüzeye ulaşmasını Denklem 1.4 ile açıklamaktadır.

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad \text{Denklem 1.4}$$

Denklem 1.4’de yer alan semboller şu şekilde tanımlanmaktadır: ρ , yoğunluk; d , yatay düzlemde oluşan yer değiştirmeleri; z , derinliği; t , zamanı; τ , kayma gerilmelerini; ve η ise zemin tabakalarının kütlelerine bağlı olarak sönüm oranlarını ifade eder. Depremin mühendislik anakayasından yüzeye kadar olan yayılım yolu, Şekil 6’da gösterilmiştir. Anakaya ile birlikte n farklı tabakadan oluşan zeminlerin çeşitli konumlarındaki deplasmanları (d) hesaplanmıştır. Δz ise deplasmanın hesaplandığı konumların birbirlerine olan mesafesini ifade etmektedir.

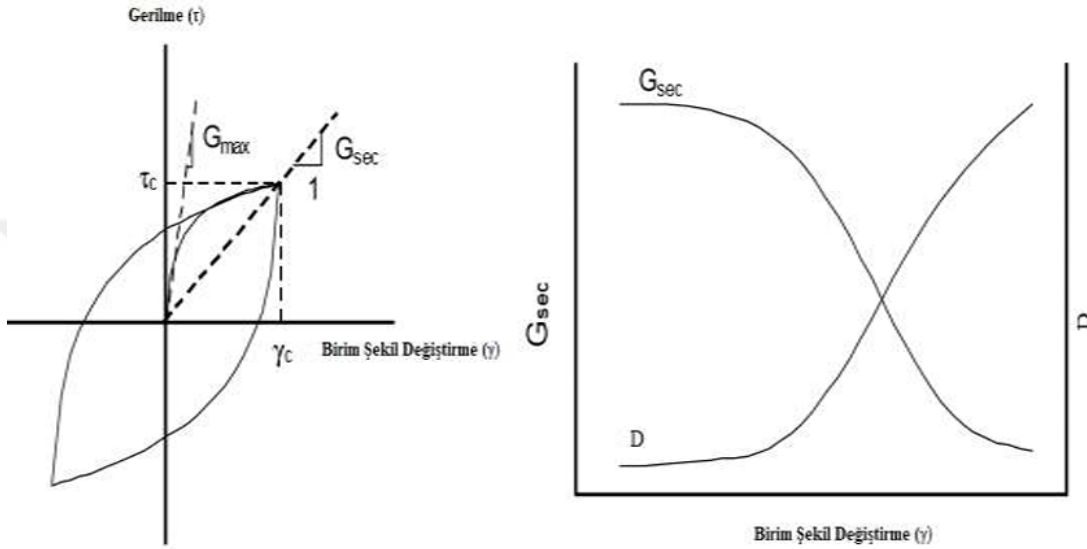


Şekil 6. Zemin davranış analizinin n tabakalı bir ortamda şematik gösterimi (Bardet ve Tobita (2001)’dan değiştirilerek alınmıştır.)

1B zemin dinamik analizleri, deprem sırasında yerel zemin koşullarının etkisiyle hakim periyotlara göre zeminlerin sergilediği davranışları modellemek amacıyla sıkça tercih edilmektedir (Selçuk vd. 2007). Bu analizler kapsamında, lineer, eşdeğer lineer ve nonlineer yöntemler kullanılmaktadır. Günümüzde ise daha yaygın olarak eşdeğer lineer ve nonlineer analiz yöntemleri tercih edilmektedir.

Eşdeğer lineer zemin davranış analizi

Son yıllarda yaygınlaşan eşdeğer lineer saha davranış analizi, zemin tabakalarının lineer olmayan davranışlarını dikkate alarak geliştirilmiştir. Bu yöntem, zemin davranışını modellemek için dinamik kayma modülü ve sönüm oranı üzerinden gerçekleştirilen yinelemeler ile yapılmaktadır (Hashash vd. 2016). Yöntemde, zemin tabakalarının davranışlarını modellemek için, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile kayma mukavemeti ve sönüm oranının birim şekil değiştirme ile olan uyumu kullanılır (Şekil 7).



Şekil 7. Eşdeğer lineer analiz yönteminde kullanılan birim şekil değiştirme-gerilme grafiği

Zemin tabakalarının lineer olmayan dinamik davranışı, Şekil 7'de histerezis eğrileri kullanılarak modellenmiştir. Eşdeğer lineer analiz yönteminde sekant modülü (G_{sec}) tercih edilmekte ve aşağıdaki denklem ile belirlenir:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad \text{Denklem 1.5}$$

Tekrarlı yüklemeler altında kayma modülü ve sönüm oranı, kayma birim deformasyonlarına bağlı olup yinelemeli yöntemler yardımıyla elde edilmektedir. Efektif kayma birim deformasyonları (γ_{eff}) Denklem 1.6'da ile hesaplanmaktadır.

$$\gamma_{eff} = SSR \times \gamma_{maks} \quad \text{Denklem 1.6}$$

γ_{maks} en büyük kayma birim deformasyonunu, SSR ise azaltma katsayısını ifade etmektedir. Deprem büyüklüğü M ile gösterilmekte olup, bu azaltma katsayısı Denklem 1.7 ile hesaplanmaktadır.

$$SSR = \frac{M-1}{10} \quad \text{Denklem 1.7}$$

Eşdeğer lineer analiz pratikliği ve uygulama kolaylığı ile bir boyutlu analizlerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Ancak, bu yöntem özellikle kalın alüvyal çökellerinde, zeminin karmaşıklığını ve non-lineer davranışlarını tam olarak yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir. Derin zemin çökelleri için yapılan saha davranış analizlerinde, nonlinear saha davranış analizi ise daha doğru sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır (Selçuk vd. 2007).

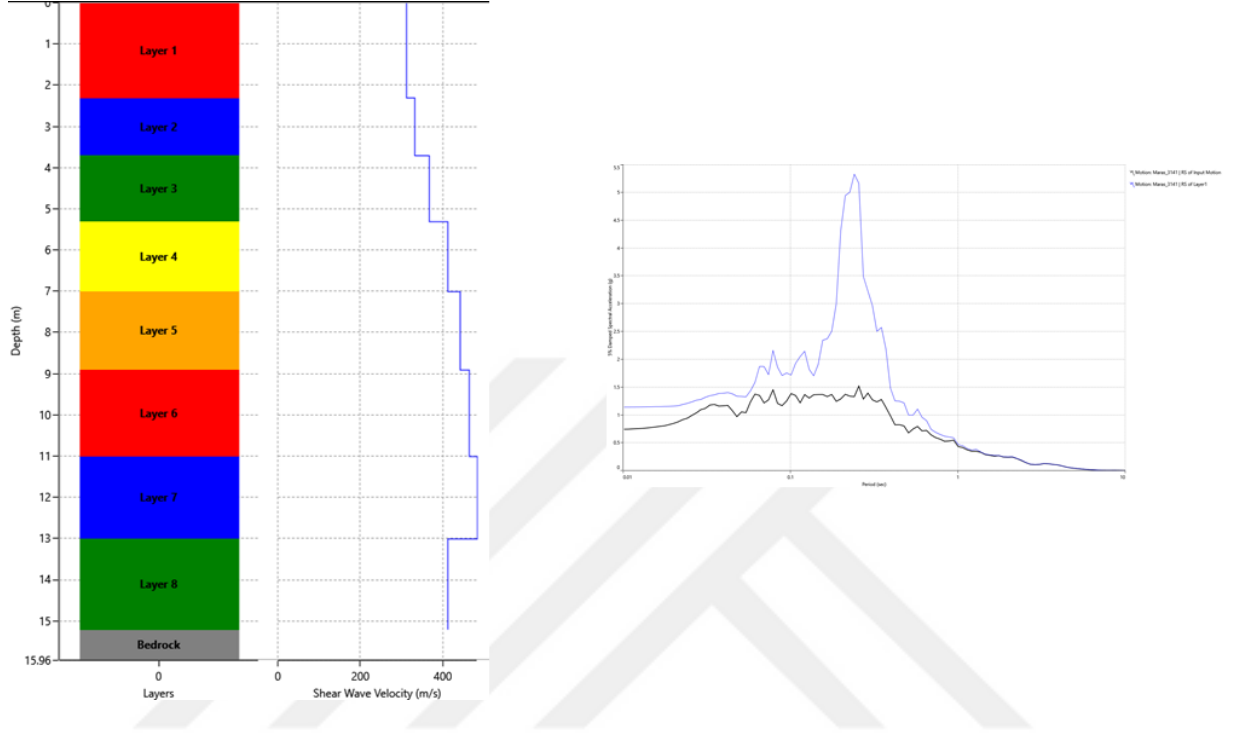
Bu çalışma kapsamında DeepSoil yazılımı (<https://deepsoil.cce.illinois.edu/Index.html>) kullanılarak bir boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucunda, yüzeydeki maksimum ivme (PGA), büyütme faktörleri ve belirli zaman dilimlerinde zemin yüzeyinde oluşan spektrumlar hesaplanmıştır.

Bu çalışmada zemin davranış analizleri beş ana adımda tamamlanmıştır. İlk adımda, yapılacak analiz türü seçilmiş olup bu çalışma kapsamında eşdeğer doğrusal analiz tercih edilmiştir. Analizlerde ilk olarak, sondaj kuyularındaki veriler MASW ölçümleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen sondaj logları ve Vs hızlarının değişimi kullanılarak DeepSoil programında zemin modelleri oluşturulmuştur (Şekil 8).

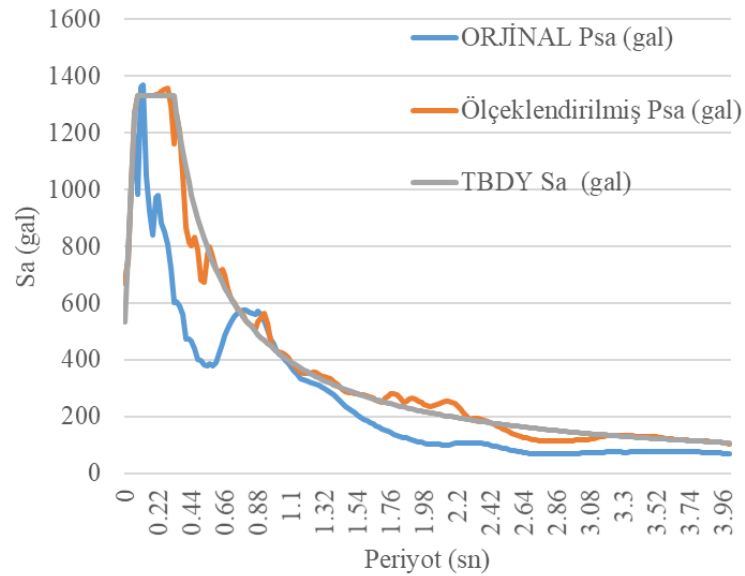
Ayrıca, kullanılan kayma dalgası hızlarına bağlı olarak çeşitli zemin modelleri tanımlanmıştır. Zemin tabakaları, plastisite indislerine göre gruplandırılmıştır. Farklı plastisite indislerine sahip zeminler için Vucetic ve Dobry (1991) zemin modelleri kullanılmıştır. Plastisite indisi düştükçe, büyük şekil değiştirmelerde sönüm oranları azalırken, küçük şekil değiştirmelerde G/G_{maks} oranı artış göstermektedir. Plastisite indisi arttıkça G/G_{maks} ile sönüm oranının kesişim noktası daha büyük şekil değiştirme seviyelerine kaymaktadır. Zemin tabakası özelliklerinden olan birim hacim ağırlığı için Mayne (2007) tarafından geliştirilen birim hacim ağırlığı-kesme dalgası hızı formülü kullanılmıştır.

Zemin tabakalarının özellikleri tanımlandıktan sonra, kullanılan deprem kaydının özellikleri belirlenmiştir. Çalışma alanında daha önce yapılan sondajlarda ve jeofizik çalışmalarda mühendislik anakayası derinliği belirlenememiştir. Bu durumda anakayada kaydedilen ivme kaydı yerine çalışma alanını temsil eden bir zeminde kaydedilen deprem kaydı seçilmiştir. Bu nedenle deprem seçiminde 2023 Maraş depreminin Hatay (Antakya)'da bulunan 3141 kodlu istasyondaki düşey bileşen kaydı kullanılmıştır. Bu kaydın seçilme nedeni ise bulunduğu zemin özelliklerinin bu çalışmadaki zemin özelliklerine olan benzerliği ve deprem konumuna olan uzaklığıdır. Bu istasyonun deprem kırığına olan uzaklığı (Rrup) yaklaşık 55 km olarak belirlenmiştir (tadas.afad.gov.tr). İstasyonun zemin sınıfı ise ZD ($V_{s30}=338$ m/sn) olarak tespit edilmiştir. Ayrıca bu kayıt SeismoMatch (2021) yazılımı kullanılarak Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan elde edilen dizayn spektrumuna göre ölçeklendirilmiştir (Şekil

9). Ölçeklendirilen kayıt uygun formatta hazırlanarak programın veri tabanına eklenmiş ve analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Son adımda, analiz parametreleri seçilerek analiz başlatılmıştır. SSR değerleri belirlenmiş ve kompleks kayma modülü hesaplamalarında frekansa bağlı formüller kullanılmıştır. Sonuçlar, her bir zemin tabakası için ayrı ayrı hesaplanmış ve Excel dosyasına kaydedilmiştir.



Şekil 8. DeepSoil programında zemin profilinin oluşturulması ve spektral ivme sonuçları (Soldaki şekilde zemin tabakaları ve Vs hızlarını göstermektedir, sağdaki grafik ise deprem kaydının spektral ivmesini ve yüzeydeki spektral ivmeyi göstermektedir.)



Şekil 9. Maraş depreminin 3141 kodlu istasyondaki kaydından elde edilen spektral ivme (mavi), TBDY'e göre Erzurum il merkezi için elde edilen dizayn spektrumu (gri) ve ölçeklendirilmiş veriye ait spektral ivme grafiği

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışma alanının zemin hâkim periyodu ($1/f$) ve büyütme faktörü (H/V , A) değerleri Nakamura yöntemi temel alınarak hesaplanmıştır (Nakamura, 1989; 2019). Gevşek zeminlerde genellikle düşük frekanslarda zemin büyütmesi belirgin hale gelirken, daha sıkı ve sağlam zeminlerde yüksek frekanslardaki büyütme değerleri ön plana çıkmaktadır (Borcherdt vd. 1991; Park vd. 1999; Louie, 2001; Okada, 2003; Pamuk vd. 2017; Subaşı vd. 2019).

Tek İstasyon Mikrotremor Ölçümleri

Tek istasyon mikrotremor tekniğiyle gerçekleştirilen bu çalışmada, yaklaşık 50 km²'lik bir alanda 25 noktada ölçümler yapılmıştır. Toplanan veriler GEOPSY yazılımında işlenmiş ve bu veriler üzerinden zemin özellikleri, zemin hakim periyodu ve büyütme faktörü tespit edilmiştir. Mikrotremor ölçümleri için SmartSolo marka üç bileşenli sismometre kullanılmıştır. Ölçümler 30 ile 90 dakika arasında, 100 Hz örnekleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Mikrotremor kayıtlarının güvenilirliğini sağlamak adına sonbahar mevsimi tercih edilerek doğal ve yapay gürültü kaynaklarından kaçınılmıştır. Yerleşim bölgelerinde, rüzgar ve insan kaynaklı seslerin az olduğu, inşaat faaliyetlerinin ve ağır iş makinelerinin kullanılmadığı zaman dilimleri seçilmiştir. Trafik gibi kaçınılmaz gürültü kaynaklarının bulunduğu alanlarda ise ölçüm süresi uzatılmıştır.



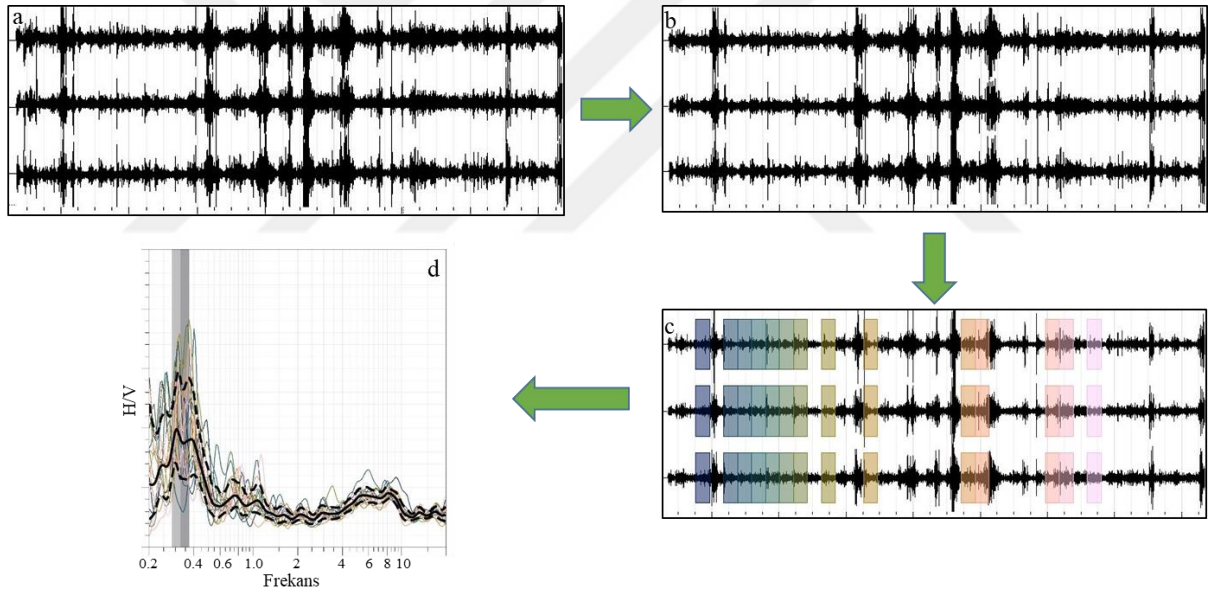
Şekil 10. Mikrotremor ölçümlerinde kullanılan sismometre

Nakamura Yöntemi ile Frekans ve H/V Değerlerinin Elde Edilmesi

Nakamura (1989) yöntemi ile ölçüm yapılan noktalardaki zemin hâkim periyodu ve büyütme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, şehir içi bölgelerde veya temel kayanın bulunmadığı alanlarda hızlı ve kolay bir şekilde uygulanabilmesi, ayrıca herhangi bir referans noktasına ihtiyaç duyulmamasıdır.

Nakamura yöntemi ile HVSR eğrilerinin çıkarılması amacıyla Geopsy (Wathelet vd. 2020) yazılımı kullanılmıştır. İlk veriden HVSR eğrisinin elde edilmesi sürecinde aşağıdaki iş akışı takip edilmiştir (Şekil 10).

Trend etkisinin giderilmesi: Mikrotremor verilerinin başında ve sonunda oluşan etkilerin ortadan kaldırılması amacıyla uygulanır. Bu işlem, verilerin yatay eksene hizalanmasını sağlar. Verinin Filtrelenmesi: Bilindiği gibi mikrotremorların periyotları 0,05 ile 20 Hz arasında değişmektedir. Bu nedenle veriye 0,05-20 Hz arasında bant geçişli süzgeç uygulanmıştır.



Şekil 11. Arazide elde edilen mikrotremor verilerinden Nakamura yöntemi ile zemin hakim periyot ve büyütme faktörü değerlerinin elde edilmesi a) Arazide alınan ham veriler b) 0.05-20 Hz Aralığında bant geçişli filtre uygulanmış veriler c) Uygun zaman pencerelerinin seçilmesi d) Hakim frekansı belirlemek için H/V eğrisi ve büyütme faktörü

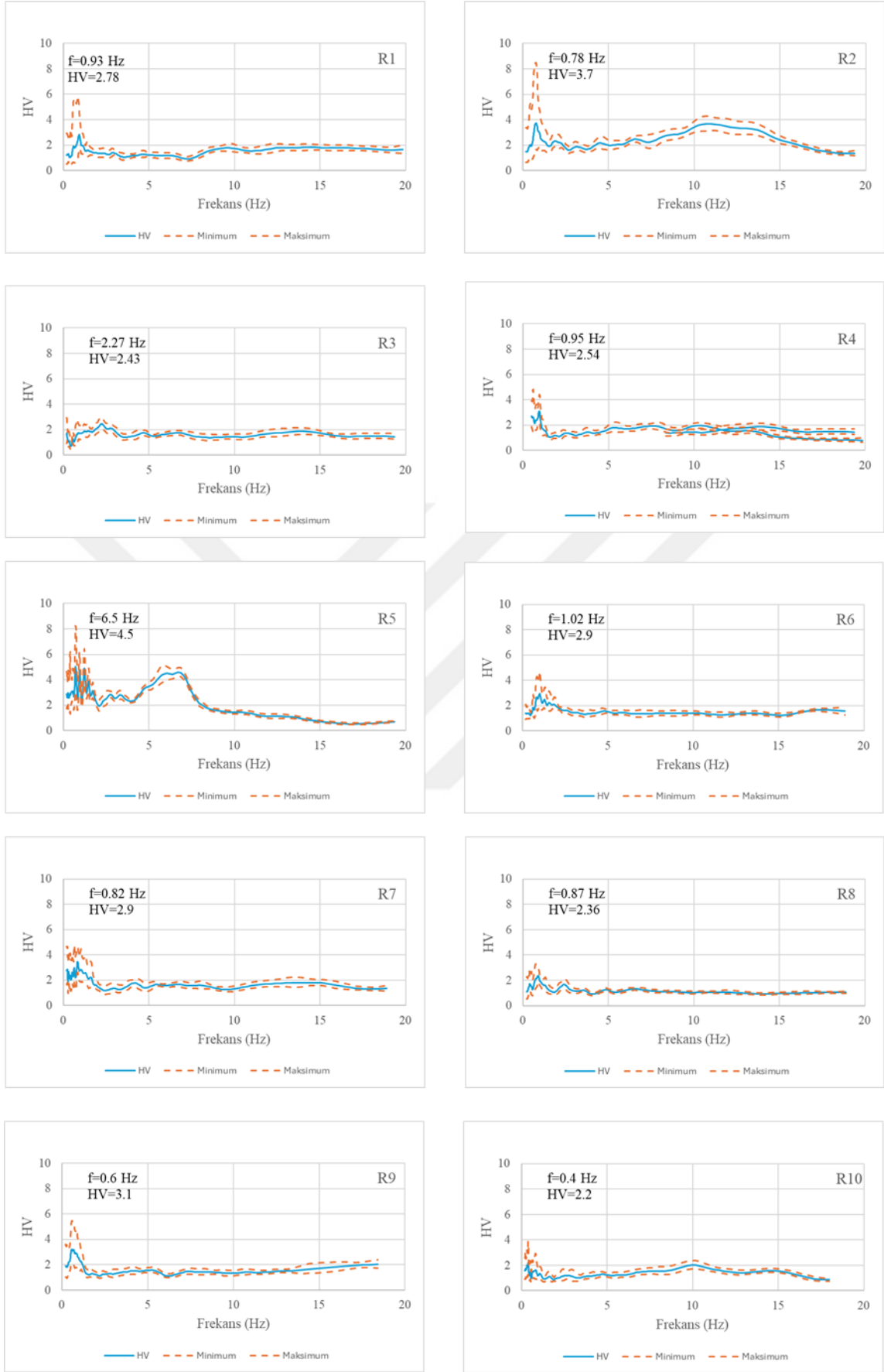
Genlik Spektrumlarının Elde Edilmesi: Zaman alanında toplanan veriler, ilk olarak hızlı Fourier dönüşümü ile frekans alanına dönüştürülür. Ardından, üç bileşen için genlik spektrumları hesaplanarak Konno & Ohmachi penceresi (Konno ve Ohmachi, 1998) ile yuvarlatma işlemi yapılır. Yatay/Düşey Spektral Oranın Hesaplanması: Bu adımda, önce yatay bileşenlerin genlik spektrumlarının karekök ortalaması alınır ve düşey bileşenin genlik spektrumuna oranlanarak H/V spektral oran grafiği elde edilir. Grafikte en yüksek genliğe sahip

frekans, zemin hâkim frekansı olarak tanımlanırken, bu frekansa karşılık gelen genlik değeri büyütme faktörü olarak kabul edilir.

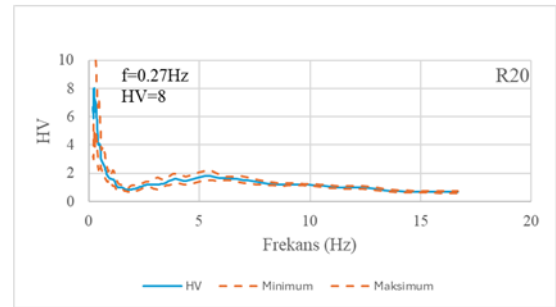
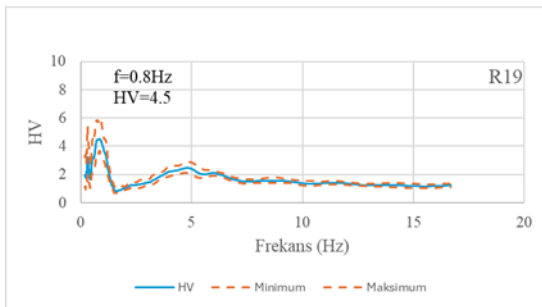
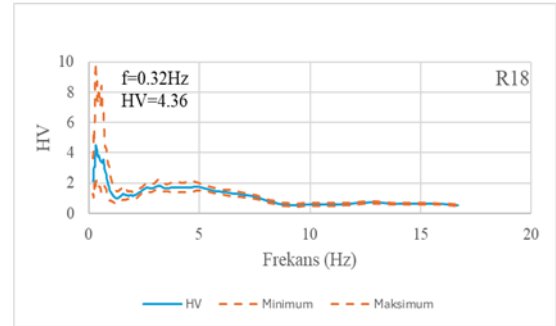
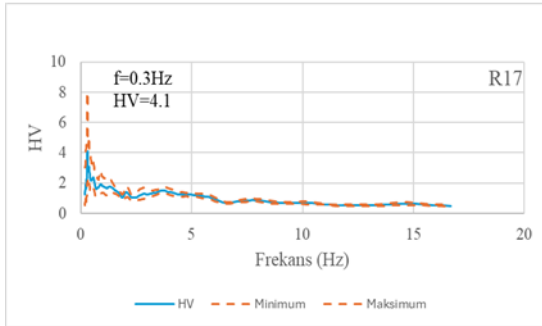
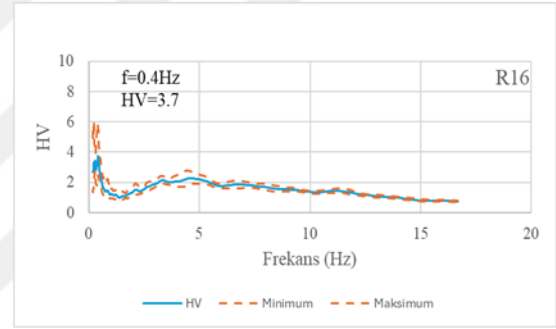
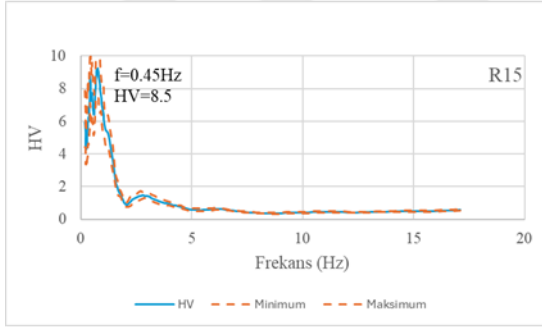
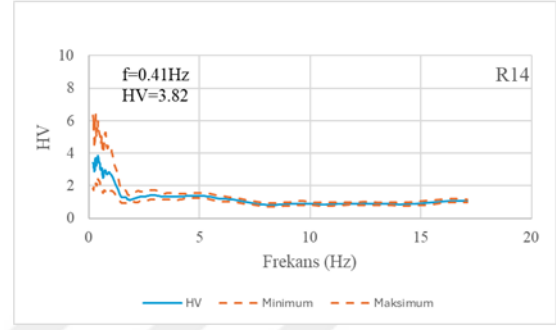
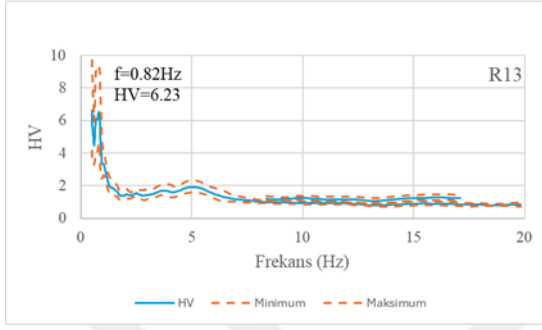
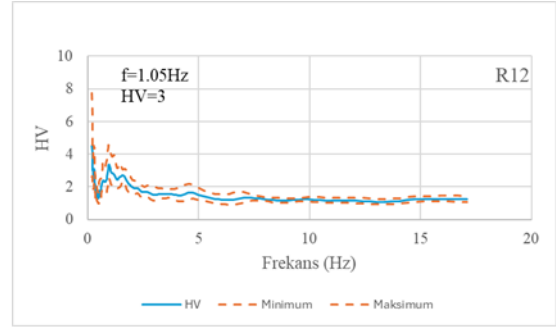
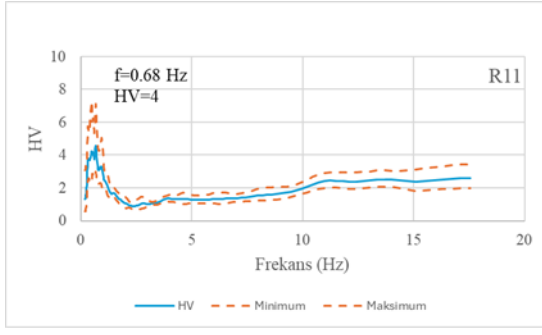
Zemin hakim periyodu ($1/\text{frekans}$) ve büyütme faktörü (H/V) değerleri Nakamura H/V tekniği ile hesaplanmıştır. Çalışma alanında periyot değerleri 0.4 ile 3.0 sn arasında değişmektedir. Düşük periyot değerleri çalışma alanının güney-güneybatısında R2 ve R7 ölçüm noktalarında gözlemlenmiştir. Bu alan Palandöken Dağı'nın eteklerinde yer almaktadır bu nedenle alüvyon kalınlığının çok yüksek olmadığı düşünülmektedir. Periyot değerlerinin, çalışma alanının kuzeyinde, yani ovaya doğru, önemli ölçüde arttığı görülmektedir. (R16-R25 ölçüm alanlarında).Yüksek periyot değerlerinin gözlemlendiği bölgelerdeki yapıların rezonans etkisine karşı dikkatli olunması ve zemin araştırmalarının multidisipliner bir yaklaşımla yürütülmesi önemlidir. R1-R7 ölçüm alanlarında ise periyot değerleri oldukça değişkendir. Bu nedenle, her parsel için özel olarak zemin incelemeleri yapılması, güvenli bina tasarımı için kritik bir gerekliliktir.

Tablo 2. Tek İstasyon Mikrotremor Ölçü Noktalarına Ait Koordinat Bilgileri ve Her Nokta İçin Elde Edilen F (frekans), A(büyütme faktörü), T (periyot) ve Kg (hasar görülebilirlik indisi) Değerleri

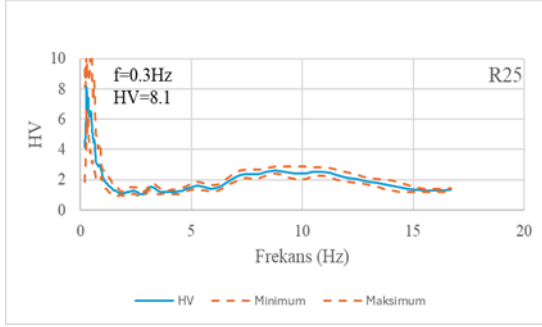
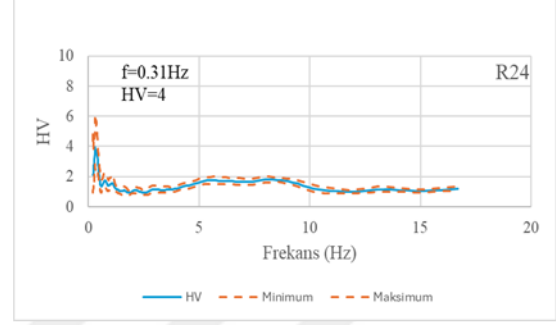
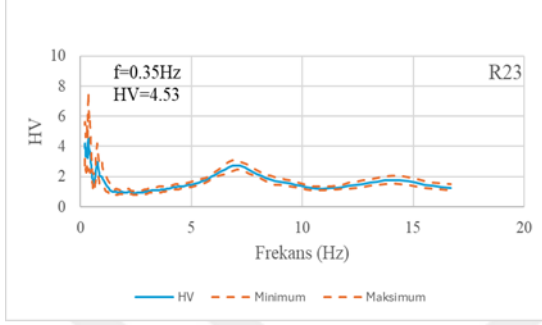
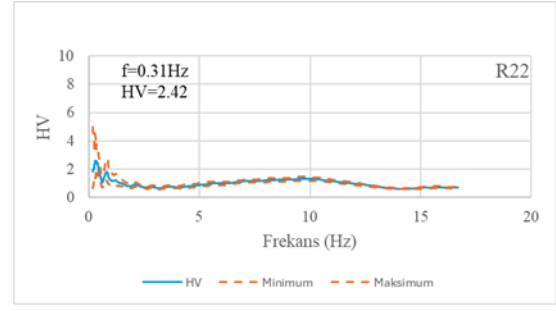
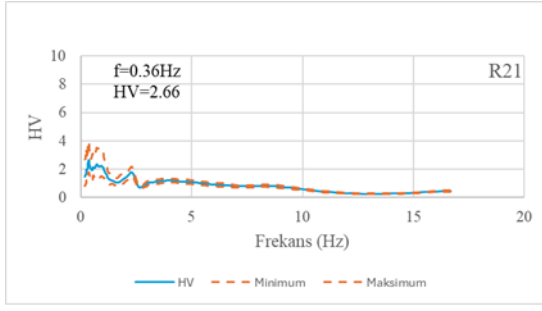
No	Frekans	Periyot	HV	Kg
R1	0.93	1.07	2.78	8
R2	0.78	1.28	3.7	17
R3	2.27	0.44	2.43	2
R4	0.95	1.05	2.54	6
R5	6.5	0.15	4.5	3
R6	1.02	0.98	2.9	8
R7	0.82	1.25	2.9	10
R8	0.87	1.15	2.36	6
R9	0.6	1.67	3.1	16
R10	0.4	2.5	2.2	12
R11	0.68	1.47	4	23
R12	1.05	0.95	3	8
R13	0.82	1.22	6.23	47
R14	0.41	2.44	3.82	35
R15	0.45	2.22	8.5	160
R16	0.4	2.5	3.7	34
R17	0.3	3.3	4.1	56
R18	0.32	3.12	4.36	59
R19	0.8	1.25	4.5	25
R20	0.27	3.70	8	237
R21	0.36	2.78	2.66	19
R22	0.31	3.22	2.42	18
R23	0.35	2.86	4.53	58
R24	0.31	3.22	4	51
R25	0.3	3.33	8.1	218



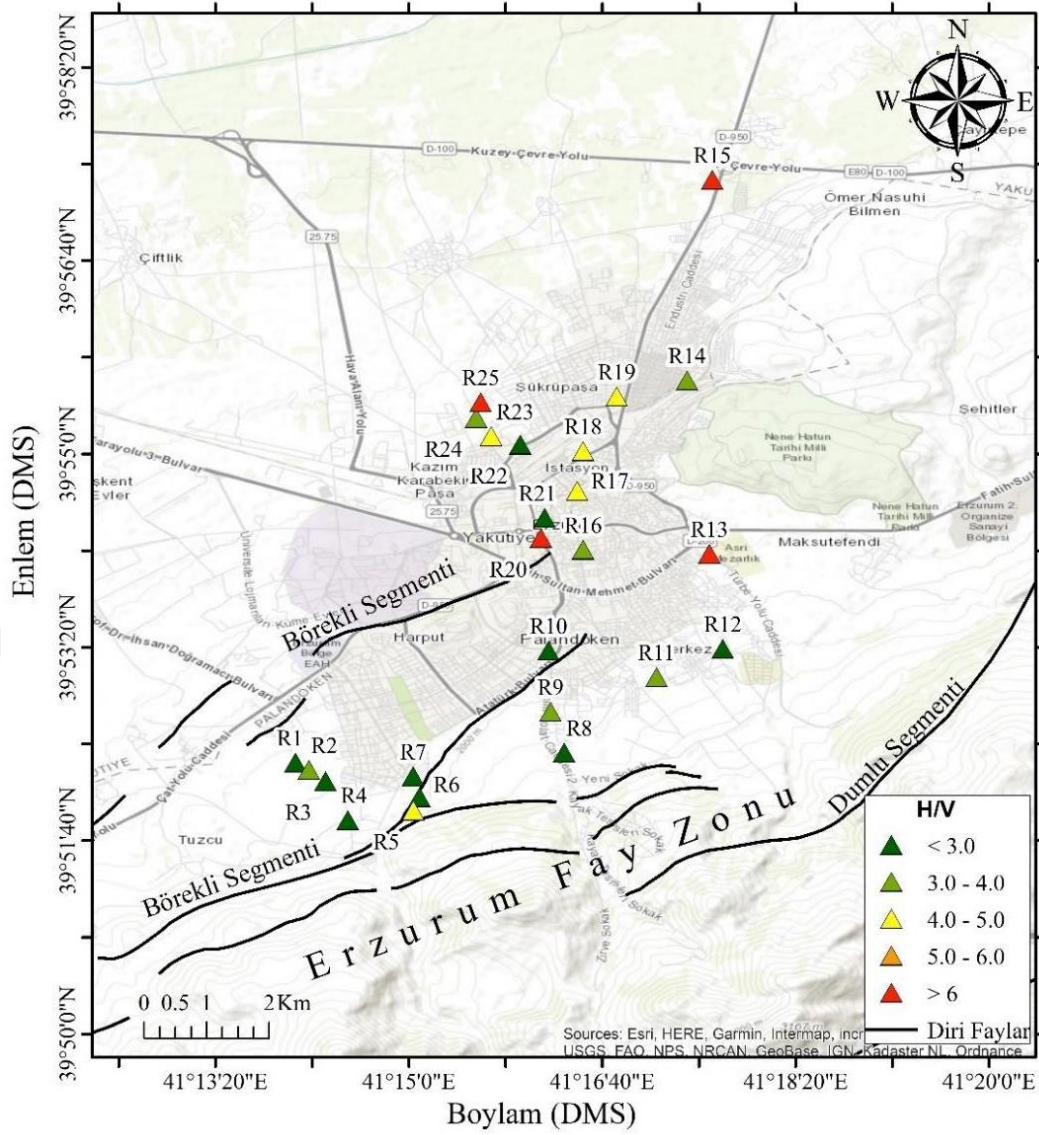
Şekil 12. Nakamura yöntemi ile her bir ölçü noktasında elde edilen HV grafikleri



Şekil 12. Nakamura yöntemi ile her bir ölçü noktasında elde edilen HV grafikleri (devamı)



Şekil 12. Nakamura yöntemi ile her bir ölçü noktasında elde edilen HV grafikleri (devamı)



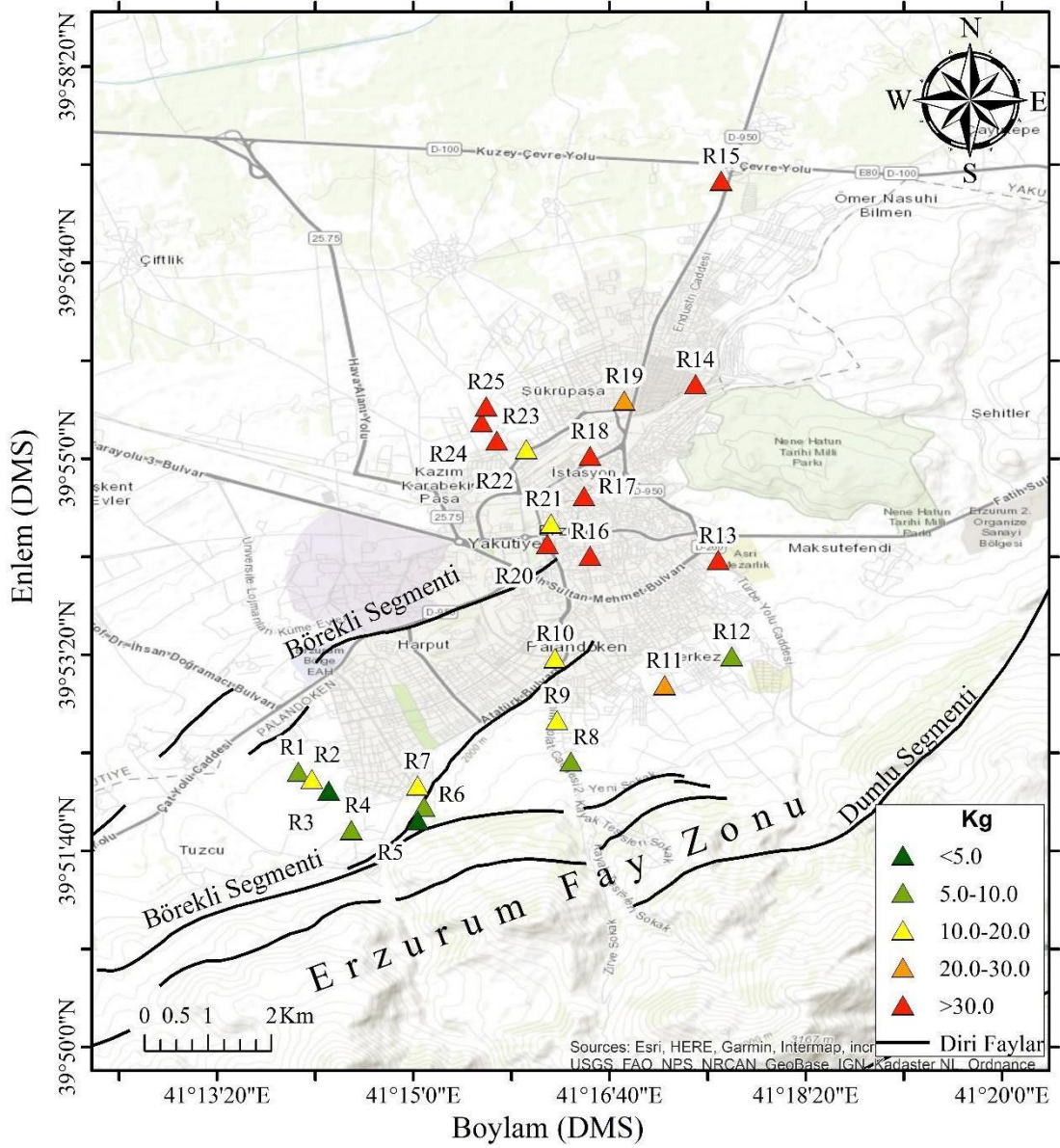
Şekil 14. Nakamura yöntemi ile elde edilen zemin büyütme faktörü (H/V) değerleri haritası (Siyah çizgiler aktif fayları göstermektedir, üçgenler ise ölçü noktalarını göstermekte olup H/V değerlerine göre renklendirilmiştir)

H/V yöntemiyle elde edilen büyütme faktörü değerleri yaklaşık olarak 2 ile 9 arasında değişmektedir. Çalışmada Palandöken Dağı'na yakın kesimlerde, düşük HV değerleri (<4) elde edilmiştir. Kuzey kesiminde ise daha yüksek HV değerleri gözlemlenmiştir. Yüksek HV değerleri, aynı zamanda yüksek periyot değerlerinin gözlemlendiği bölgelerde tespit edilmiştir.

Elde edilen zemin hakim frekans ve zemin büyütme faktörü kullanılarak ampirik ilişkiler yardımıyla K_g değerleri hesaplanmıştır. K_g değerleri, ülkemiz koşulları dikkate alınarak 10'un altında ve üzerinde olacak şekilde sınıflandırılmıştır (Akkaya, 2020). K_g haritasına göre dört noktada (R2, R7, R9, R10) K_g değerleri 10'dan yüksektir. Ayrıca (R11, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25) noktalarında K_g değeri 20'nin üzerindedir. Bu bölgelerde yapılacak inşaat çalışmalarında, aktif kaynaklı jeofizik

yöntemlerle detaylı araştırmalar yapılması gerekmektedir. Çalışmanın genel değerlendirmesinde, alanın güneyinde daha düşük, kuzeyinde ise daha yüksek Kg değerleri tespit edilmiştir. Pasif kaynakla yapılan bu çalışmanın, aktif kaynaklı jeofizik yöntemlerle zenginleştirilmesi ve yapı stoğu göz önüne alınarak deprem-zemin-yapı ilişkilerinin incelenmesi bu bölge için önerilmektedir.

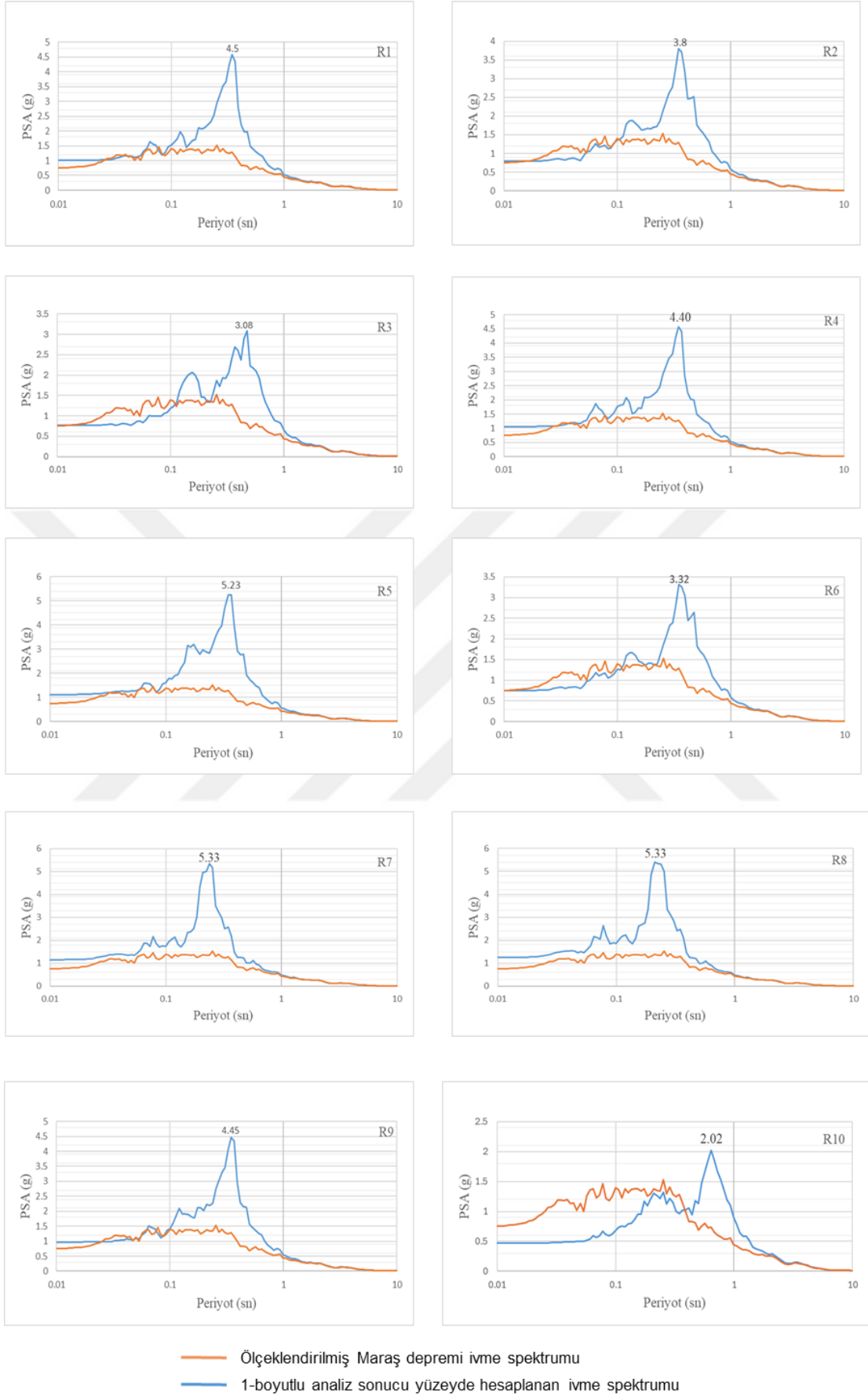
Elde edilen zemin hakim frekans ve zemin büyütme faktörü kullanılarak ampirik ilişkiler yardımıyla Kg değerleri hesaplanmıştır. Kg değerleri, ülkemiz koşulları dikkate alınarak 10'un altında ve üzerinde olacak şekilde sınıflandırılmıştır (Akkaya, 2020). Kg haritasına göre dört noktada (R2, R7, R9, R10) Kg değerleri 10'dan yüksektir. Ayrıca (R11, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25) noktalarında Kg değeri 20'nin üzerindedir. Bu bölgelerde yapılacak inşaat çalışmalarında, aktif kaynaklı jeofizik yöntemlerle detaylı araştırmalar yapılması gerekmektedir. Çalışmanın genel değerlendirmesinde, alanın güneyinde daha düşük, kuzeyinde ise daha yüksek Kg değerleri tespit edilmiştir. Pasif kaynakla yapılan bu çalışmanın, aktif kaynaklı jeofizik yöntemlerle zenginleştirilmesi ve yapı stoğu göz önüne alınarak deprem-zemin-yapı ilişkilerinin incelenmesi bu bölge için önerilmektedir.



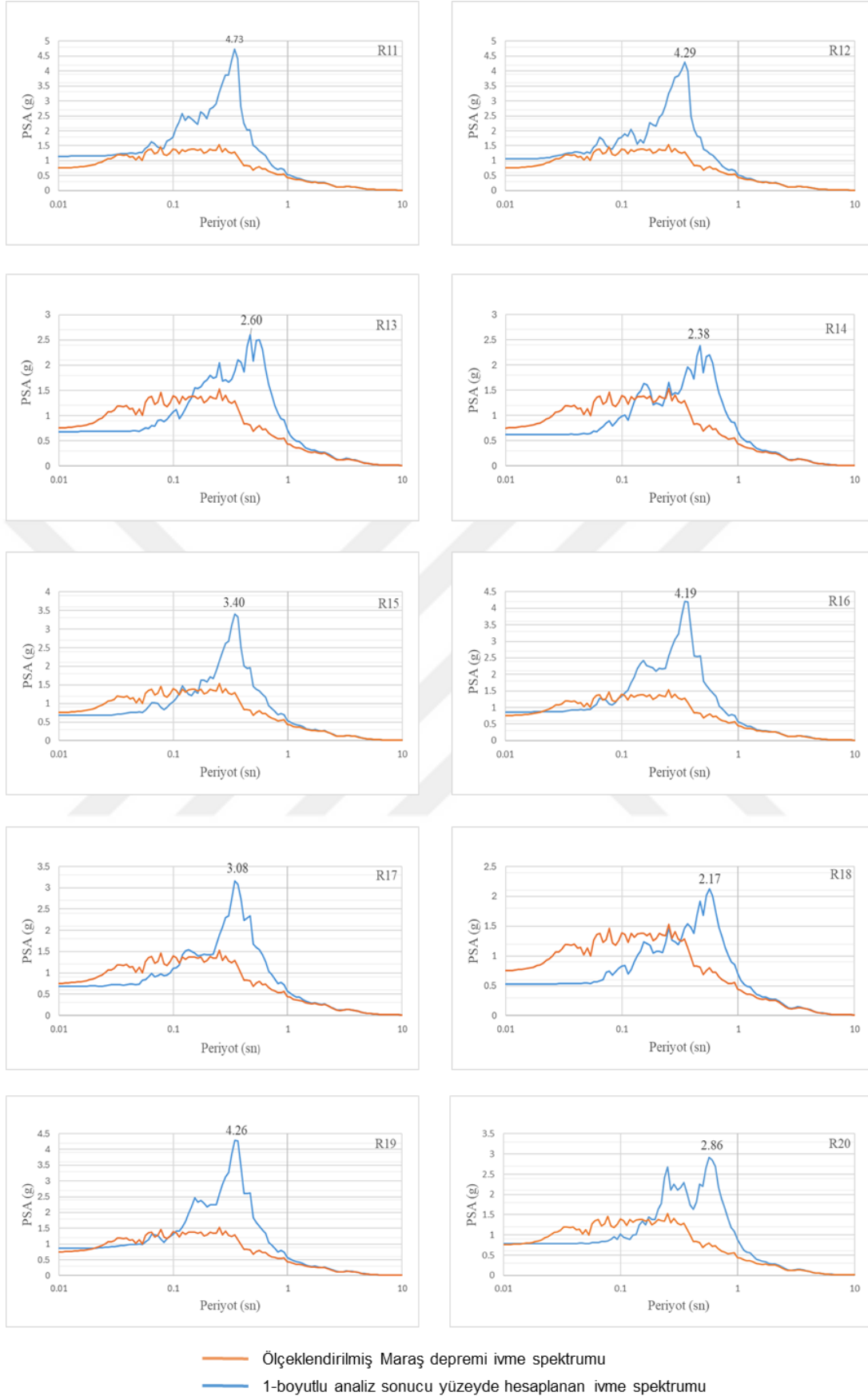
Şekil 15. Hasar görebilirlik indisi haritası (Siyah çizgiler aktif fayları göstermektedir, üçgenler ise ölçü noktalarını göstermekte olup Kg değerlerine göre renklendirilmiştir)

Eşdeğer Lineer Analiz Sonuçları

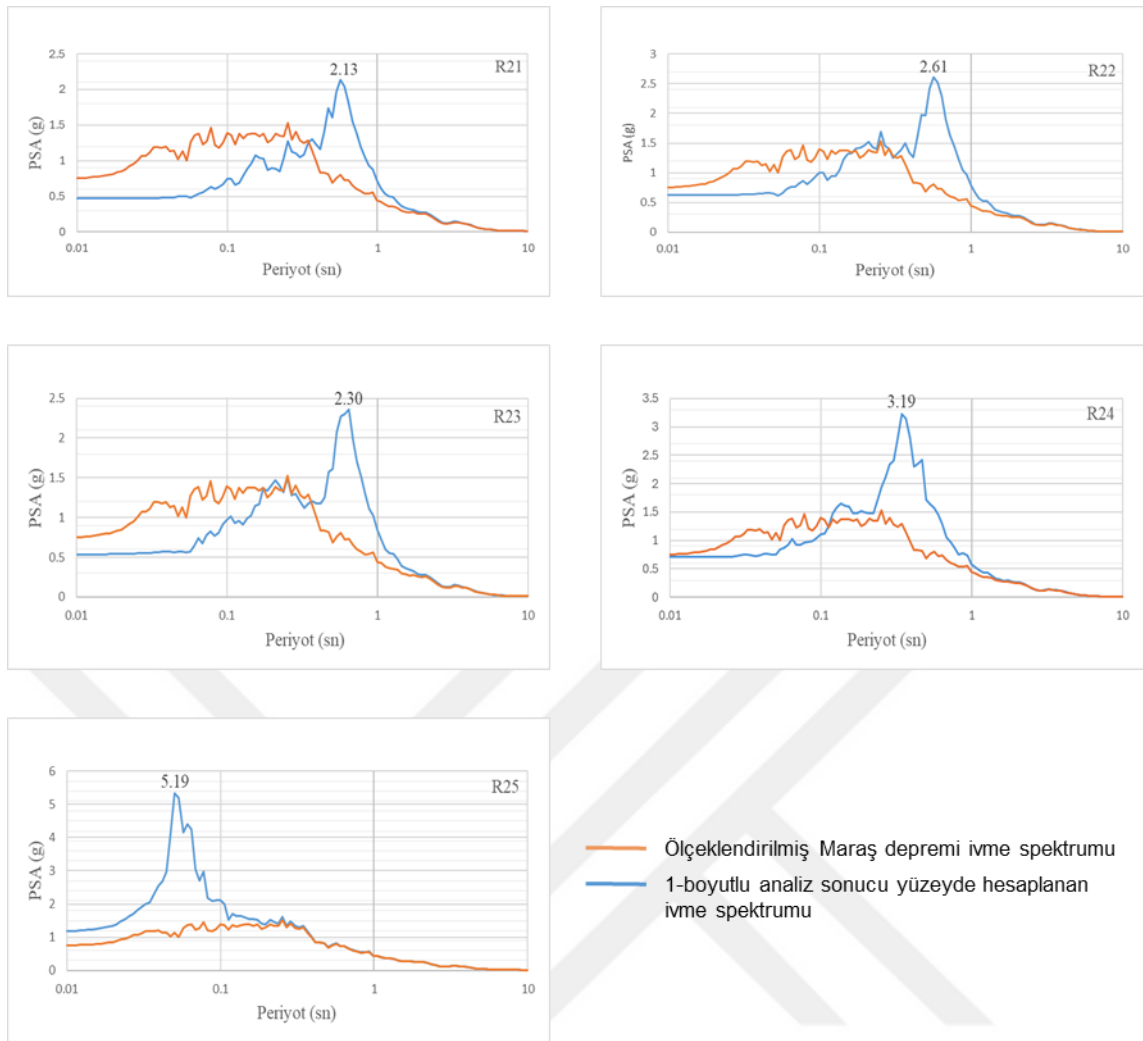
Erzurum İli Palandöken ve Yakutiye bölgelerinde önceki sondaj çalışmaları ile MASW analiz sonuçları bir araya getirilerek zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri kullanılarak, farklı büyüklükteki deprem kayıtları ile 1D eşdeğer lineer analizler yapılmış ve zemin yüzeyinde spektral ivmeler elde edilmiştir. Zemin yüzeyindeki spektral ivme değerleri ile kullanılan deprem kaydındaki ivme değerleri oranlanarak zemin büyütme katsayısı hesaplanmıştır (Şekil 15-17).



Şekil 16. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonrası R1-R10 noktaları için elde edilen PSA grafikleri



Şekil 17. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonrası R11-R20 noktaları için elde edilen PSA grafikleri



Şekil 18. Bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonrası R21-R25 noktaları için elde edilen PSA grafikleri

Tek boyutlu dinamik analizlerden elde edilen en büyük spektral ivme değerleri 2.02 g ile 5.33 g arasında değişmektedir. Deprem kaydından elde edilen en büyük spektral ivme değeri ile her zemin profilinden elde edilen en büyük spektral ivme değerleri birbirlerine oranlanarak zemin büyütme katsayıları elde edilmiştir. Hesaplanan zemin büyütme katsayıları 1.3 ile 3.5 arasında değişmektedir (Tablo 3). En küçük zemin büyütme katsayısı R10’da elde edilirken, en büyük zemin büyütme katsayısı ise R7, R8 ve R25’de elde edilmiştir. Nakamura Yöntemi ile hesaplanan zemin büyütmesi (H/V) değerleri ise 2.2 ile 8.5 arasında değişiklik göstermektedir. Her iki yöntem ile elde edilen değerlerde farklılıklar gözükmemektedir. Nakamura yöntemi ile elde edilen büyütme değerlerinin gerçekten büyük olduğu birçok çalışmada ortaya koyulmuştur. Ayrıca çalışmada kullanılan sondaj ve MASW verileri de anakaya derinliğine kadar inmediği için analizlerde hata payını arttıran faktörlerdendir.

Tablo 3. Nakamura Yöntemi İle Elde Edilen HV Sonuçları ve 1-boyutlu Doğrusal Eşdeğer Analiz Sonucu Elde Edilen Zemin Büyütmelerinin Karşılaştırılması

Ölçü Noktası	HV Sonuçları	1-Boyutlu Doğrusal Eşdeğer Analiz Sonuçları
R1	2.78	3
R2	3.7	2.5
R3	2.43	2
R4	2.54	2.9
R5	4.5	3.5
R6	2.9	2.2
R7	2.9	3.5
R8	2.36	3.5
R9	3.1	2.97
R10	2.2	1.33
R11	4	3.13
R12	3	2.8
R13	6.23	1.7
R14	3.82	1.6
R15	8.5	2.27
R16	3.7	2.8
R17	4.1	2
R18	4.36	1.44
R19	4.5	2.84
R20	8	1.9
R21	2.66	1.4
R22	2.42	1.7
R23	4.53	1.5
R24	4	2.1
R25	8.1	3.5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Erzurum ili, coğrafi konumu itibarıyla aktif tektonik yapılar üzerinde yer almakta olup, Türkiye'nin en büyük fay hatlarından Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay zonlarına yakın bir bölgededir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre, 50 yılda %2 aşılma olasılığına (yani 475 yıllık geri dönüş periyoduna) sahip bir depremde, Erzurum'da beklenen en yüksek ivme değeri yaklaşık 0,45 g'dir. Bu durum, Erzurum'da yerel zemin özelliklerinin detaylı şekilde belirlenmesinin, gelecekte yaşanabilecek depremlerin zararlarını azaltmak açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, Erzurum İli Palandöken ve Yakutiye ilçelerinde meydana gelebilecek kuvvetli yer hareketlerine yönelik olarak planlanmıştır. Bu doğrultuda, daha önce bölgeye yönelik yapılmış arazi çalışmalarının verileri toplanmış ve yerel zemin özelliklerini tespit etmek amacıyla 25 farklı noktada tekil istasyon mikrotremor ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Alınan bu mikrotremor kayıtları, H/V oranı yöntemiyle analiz edilmiş ve zemin hakim periyodu ile zemin büyütmesinin alansal dağılımı tespit edilmiştir. Nakamura Yöntemi ile değerlendirilerek, zemin hakim periyodu, büyütme faktörü ve hasar görebilirlik indeksi gibi önemli parametreler hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar, daha önce toplanan sondaj verileriyle birlikte değerlendirilmiş ve zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu zemin modelleri, bölgedeki olası deprem koşulları göz önüne alınarak tek boyutlu dinamik analizlere tabi tutulmuştur.

Mikrotremor analizlerinden elde edilen hakim periyot değerlerinin, alüvyon kalınlıkları ile uyumlu bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Mikrotremor analizlerinde elde edilen hakim periyotların 0.4 ila 3.0 saniye arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Zemin büyütmesi incelendiğinde, güneyde düşük periyot, kuzeyde ise yüksek periyot değerleri elde edilmiştir. Palandöken Dağı eteklerinde düşük periyotlar gözlenirken, ova bölgelerinde yüksek periyot değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, bölgedeki zemin özelliklerinde dağın eteklerinden ovaya doğru bir değişiklik olduğunu göstermektedir.

Çalışmada Palandöken Dağı'na yakın kesimlerde, düşük HV değerleri (<4) elde edilmiştir. Kuzey kesiminde ise daha yüksek HV değerleri gözlemlenmiştir. Yüksek HV değerleri, aynı zamanda yüksek periyot değerlerinin gözlemlendiği bölgelerde tespit edilmiştir. Çalışma alanının güneyinde 10'dan daha düşük Kg değerleri elde edilmiştir. Kg değeri özellikle çalışma alanının kuzeyinde yükselmektedir.

Tek boyutlu dinamik analiz sonuçları ile mikrotremor ölçümlerinden elde edilen zemin büyütmelerinde farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Tek boyutlu dinamik analizlerde kullanılan zemin profillerinin anakayaya kadar ulaşmamış olması, benzer şekilde MASW sonuçlarının da 30 metreye kadar ulaşmadığı görülmüştür. Bu durumlarında analizlerde hata payını arttığı görülmüştür. Daha gevşek zeminlerde zemin büyütmesi değerlerinin diğer zemin gruplarına kıyasla daha az elde edildiği gözlenmiştir. Özellikle alüvyon kalınlığının ve zemin büyütmesinin arttığı alanlarda bir boyutlu eşdeğer lineer analiz ile beklenenden daha küçük zemin büyütmeleri elde edildiği bu durumda yöntemin bir eksiği olduğu söylenebilir. Özellikle bu tür zeminlerde non-lineer analizlerin yapılması daha doğru sonuç verecektir.

Erzurum Palandöken ve Yakutiye bölgelerinde yapılan çalışmalar sırasında sondaj ve MASW verilerinin sınırlı olması nedeniyle, daha fazla veri elde edilmesi ve derin sondaj çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Ayrıca, diğer bölgelerde yapılacak arazi çalışmalarıyla sonuçların daha da geliştirilebilecektir. Bu çalışma, sınırlı sayıda sondaj, MASW ve mikrotremor verisi ile gerçekleştirilmiş olup, bölgedeki veri setinin genişletilmesiyle daha kapsamlı sonuçlara ulaşılması mümkündür.

Sonuç olarak, imar planları ve zemin etütlerinde jeoloji, jeofizik ve inşaat mühendislerinin iş birliği yaparak birden fazla yöntemi birlikte kullanmaları, deprem risklerinin azaltılmasına ve depreme dayanıklı, güvenli şehirlerin inşa edilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akbaşı, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ. E., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T., Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ. H., Hakyemez, H. Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N., Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M. F., Yurtsever, A. ve diğerleri, 2011. 1:1.250.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara-Türkiye.
- Akbayram, K., Bayrak, E., Pamuk, E., Özer, Ç., Kıranşan, K., Varolgüneş, S. 2022. Dynamic sub-surface characteristic and the active faults of the Genç District locating over the Bingöl Seismic Gap of the East Anatolian Fault Zone, Eastern Turkey. *Natural Hazards* 114(1), 825-847.
- Akin, Ö., Sayıl, N. 2016. Site characterization using surface wave methods in the Arsin-Trabzon province, NE Turkey. *Environmental Earth Sciences* 75, 1-17.
- Akkaya, İ. 2020. Availability of seismic vulnerability index (Kg) in the assessment of building damage in Van, Eastern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 19(1), 189-204.
- Aktug, B., Dikmen, U., Dogru, A., Ozener, H. 2013. Seismicity and strain accumulation around Karlova triple junction (Turkey). *Journal of Geodynamics* 67, 21-29.
- Ansal, A. M., Iyisan, R., Güllü, H. 2002. Microtremor measurements for the microzonation of Dinar. *Earthquake Microzonation* 2525-2541.
- Aydın, U., Pamuk, E., Ozer, C. 2022. Investigation of soil dynamic characteristics at seismic stations using H/V spectral ratio method in Marmara Region, Turkey. *Natural Hazards* 110(1), 587-606.
- Atar, N. 2019. Oba düzlüğü'nde (Alanya-Antalya) yerel zemin koşullarının mikrotremör yöntemiyle araştırılması. Y. Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Bardet, J. P., Tobita, T., NERA, A. 2001. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Manual Program. University of Southern California. Department of Civil Engineering.
- Emre, O., Koehler, R.D., Hengesh, J.V., Duman, T.Y., Akyuz, S., Altunel, E., Barka, A. 2004. Late Holocene Activity of Erzurum Fault Zone in Eastern Anatolia Turkey. Geological Society of America annual meeting, Denver, USA, November, 148
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F. 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası. Ölçek 1:1.250.000, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1
- 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.
- Field, E. H., Jacob, K. H. 1995. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bulletin of the seismological society of America* 85(4), 1127-1143.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D., 2016. DEEPSOIL 6.1, User Manual.
- Hazer, G., 2013. Jeoteknik Parametrelerin Hâkim Titreşim Periyodu ve Zemin Büyütme Katsayısına Etkisi. Y. Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

- Ibs-von Seht, M., Wohlenberg, J. 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America* 89(1), 250-259.
- Karsli, F., Bayrak, E. 2024. Single-station microtremor surveys for site characterization: A case study in Erzurum city, eastern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 23(3), 563-576.
- Kocyigit, A., Canoglu, M. C. 2017. Neotectonics and seismicity of Erzurum pull-apart basin, East Turkey. *Russian Geology and Geophysics* 58(1), 99-122.
- KOERI, 2024. B.U. KOERI-RETMC Earthquake Catalog Search System, Retrieved from <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>.
- Konno, K., Ohmachi, T. 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88(1), 228-241.
- Kramer, S. L. 1996. *Geotechnical earthquake engineering*, Pearson Education India, 653.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America* 83(5), 1574-1594.
- Mayne, P.W., 2007. In-situ test calibrations for evaluating soil parameters. . *Characterization & Engineering Properties of Natural Soils*. Taylor & Francis Group, London, 1602-1652.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1).
- Nakamura, Y. 1997. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor, In: *Proceedings of world congress on railway research*, Firenze, Italy, 1–7.
- Nakamura, Y. 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, In: *Proceedings of 12th world conference on earthquake engineering*, Auckland, New Zealand, 2656.
- Nakamura, Y. 2019. What Is the Nakamura Method?, *Seismological Research Letters* 90(4):1437–1443.
- Okan, N., 2005. Yenişehir (Bursa) İlçesinde Zemin Büyütmesinin Jeoteknik Açısından Değerlendirilmesi. Y. Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pamuk, E., Özdağ, Ö. C., Özyalın, Ş., Akgün, M. 2017. Soil characterization of Tınaztepe region (İzmir/Turkey) using surface wave methods and Nakamura (HVSr) technique. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 16, 447-458.
- Pamuk, E., Özdağ, Ö. C., Tunçel, A., Özyalın, Ş., Akgün, M. 2018. Local site effects evaluation for Aliğa/İzmir using HVSr (Nakamura technique) and MASW methods. *Natural Hazards* 90, 887-899.
- Pamuk, E. 2019. Investigation of the local site effects in the northern part of the eastern Anatolian region, Turkey. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 60(4).
- Saraç, B., 2024. Atatürk Üniversitesi Yerleşkesi Zemin Özelliklerinin Mikrotremor Yöntemi ile İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- SeismoMatch (2021). SeismoMatch 2021 – A computer program for spectrum matching of earthquake records, available from <https://seismosoft.com/>.

- Selçuk, M.E., Kılıç, H., Özaydın, K. 2007. Kalın Zemin Çökellerinde Eşdeğer Lineer ve Non-Linear Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul.
- SESAME WP12 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient Vibrations-Measurements, processing and interpretation. SESAME European research project, Deliverable D23. 12., Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, “-62.
- TBEC 2018. Turkish Building Earthquake Code, Retrieved from <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>.
- Tekebaş, S., 2011. Yalova ili zemin tepki fonksiyonlarının mikrotremör verileri ile belirlenmesi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vucetic, M., Dobry, R., 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), 87-107.
- Wathelet, M., Chatelain, J.L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohnberger, M., Savvaïdis, A. 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. Seismological Research Letters 91(3):1878—1889.
- Zabcı, C., Akyüz, H. S., Sançar, T. 2017. Palaeoseismic history of the eastern part of the North Anatolian Fault (Erzincan, Turkey): Implications for the seismicity of the Yedisu seismic gap. Journal of Seismology 21, 1407-1425.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler
Adı Soyadı: Şeyma SARIGÜL
E-mail:
Uyruğu:
Eğitim
Lise:
Lisans:
Yüksek lisans:
Yabancı Dil Bilgisi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar
Tezden Üretilen Yayınlar