

Yüzey Dalgası Analizi ile Elde Edilen Kayma Dalgası Hızlarına Dayalı Zemin Tepki Analizleri ile Hesaplanan Transfer Fonksiyonlarının HVSR Eğrileri ile Karşılaştırılması

Onur EYİSÜREN^{1*}, Öznur KARACA², Sadık ÖZTOPRAK³

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 17100 Merkez ÇANAKKALE

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 17100 Merkez ÇANAKKALE

³İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar İSTANBUL

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/05/2025
Düzeltilme: 04/06/2025
Kabul: 13/06/2025

Anahtar Kelimeler

Kayma Dalgası Hız profili
Lineer Zemin Tepki Analizi
Transfer Fonksiyonu
Yatay/Düşey Spektral Oran
Hakim Frekans

Article Info

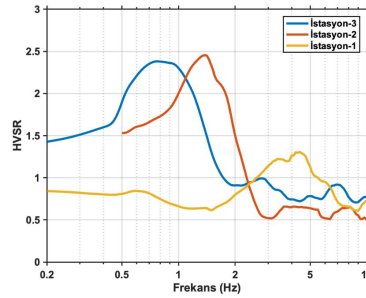
Research article
Received: 10/05/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 13/06/2025

Keywords

Shear Wave Velocity Profile
Linear Site Response
Analysis
Transfer Function
Horizontal/Vertical
Spectral Ratio
Dominant Frequency

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen Vs profillerinden hesaplanan 1B lineer analizlere dayalı transfer fonksiyonları, üç sahada deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan HVSR eğrileriyle karşılaştırılarak hakim frekansların uyumu değerlendirilmiştir. / In this study, transfer functions based on 1D linear analyses calculated from Vs profiles obtained through surface wave methods were compared with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise records at three sites, and the consistency of the dominant frequencies was evaluated.



Şekil A: Her istasyon için mikrotremör ölçümlerinden elde edilmiş HVSR eğrileri / **Figure A:** The HVSR curves obtained from microtremor measurements for each station

Önemli noktalar (Highlights)

- Yüzey dalgası yöntemleri ve HVSR analizlerinin bütünsel kullanımı saha karakterizasyon doğruluğunu artırmaktadır. / Integrated use of surface wave methods and HVSR analysis enhances site characterization accuracy
- Deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilen HVSR eğrileri arasında iyi bir uyum görülmektedir. / There is a good agreement between the HVSR curves obtained from earthquake and ambient noise records.
- Lineer tepki analizleri ve HVSR eğrilerinin karşılaştırılması zemin modelinin doğruluğunu artırmaktadır. / The comparison of linear site response analyses and HVSR curves improves the accuracy of the soil model.

Amaç (Aim): 1B analizlerle hesaplanan transfer fonksiyonları ile HVSR eğrilerini karşılaştırmak. / Comparing transfer functions from 1D analyses with HVSR curves.

Özgünlük (Originality): Yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen Vs profilleri ve HVSR analizleri kullanılarak hesaplanan transfer fonksiyonları ile hakim frekansların doğruluğunun araştırılması. / Investigation of dominant frequency accuracy through transfer functions from Vs profiles and HVSR analyses.

Bulgular (Results): Vs profili ile Lineer tepki analizi kullanılarak hesaplanan transfer fonksiyonları özellikle alüvyon sahalarda deprem kayıtları ve çevresel gürültü kayıtlarının sonuçları ile örtüşmektedir. / Transfer functions calculated by linear site response analysis using Vs profiles show good agreement with results from earthquake and ambient noise records, especially in alluvial sites.

Sonuç (Conclusion): 1B lineer analizlerden elde edilen transfer fonksiyonları ile HVSR yöntemlerinin karşılaştırılması, saha koşullarına özgü rezonans davranışlarının daha doğru belirlenmesini sağlamaktadır. / Comparing transfer functions from 1D linear analyses with HVSR methods allows more accurate identification of site-specific resonance behavior.



Yüzey Dalgası Analizi ile Elde Edilen Kayma Dalgası Hızlarına Dayalı Zemin Tepki Analizleri ile Hesaplanan Transfer Fonksiyonlarının HVSR Eğrileri ile Karşılaştırılması

Onur EYİSÜREN^{1*}, Öznuur KARACA², Sadık ÖZTOPRAK³

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisanüstü Eğitim Enstitüsü, 17100 Merkez ÇANAKKALE

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 17100 Merkez ÇANAKKALE

³ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar İSTANBUL

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10/05/2025
Düzeltilme: 04/06/2025
Kabul: 13/06/2025

Anahtar Kelimeler

Kayma Dalgası Hız profili
Lineer Zemin Tepki
Analizi
Transfer Fonksiyonu
Yatay/Düşey Spektral
Oran
Hakim Frekans

Öz

Bu çalışmada, yüzey dalgası analizi yöntemleri (MASW ve Remi) ile elde edilen kayma dalgası hızı (Vs) profillerine dayanarak gerçekleştirilen bir boyutlu (1B) lineer zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının, aynı lokasyonda kaydedilmiş ivme ve gürültü kayıtlarından hesaplanan yatay/düşey spektral oran (HVSR) eğrileri ile frekans düzleminde karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, zemin tepki analizinde girdi hareketi olarak bölgesel deprem kayıtlarının ivme değerlerine benzer özellikte yapay deprem kaydı kullanılarak zeminin frekans tepkisi belirlenmiş ve bu yolla rezonans özelliklerinin tanımlanması amaçlanmıştır. Elde edilen transfer fonksiyonları, sahada kaydedilen deprem kayıtları ve gürültü kayıtlarından hesaplanan HVSR eğrileri ile karşılaştırılmış; hakim frekans başta olmak üzere, spektral tepkilerin uyumu değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yüzey dalgası yöntemleriyle belirlenen Vs profillerinin transfer fonksiyonu yaklaşımıyla birlikte değerlendirilmesinin, deprem ve gürültü kayıtlarından türetilen saha koşullarına özgü frekans karakteristiklerinin belirlenmesinde, özellikle 1B zemin davranışının hakim olduğu alanlarda güvenilir ve etkili bir yöntem sunduğunu ortaya koymaktadır.

Comparison of Transfer Functions Calculated from 1D Ground Response Analyses Based on Shear Wave Velocities Obtained by Surface Wave Methods with HVSR Curves

Article Info

Research article
Received: 10/05/2025
Revision: 04/06/2025
Accepted: 13/06/2025

Keywords

Shear Wave Velocity
Profile
Linear Site Response
Analysis
Transfer Function
Horizontal/Vertical
Spectral Ratio
Dominant Frequency

Abstract

In this study, the transfer functions derived from one-dimensional (1D) linear site response analyses based on shear wave velocity (Vs) profiles obtained through surface wave analysis methods (MASW and ReMi) are compared in the frequency domain with horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) curves computed from acceleration and ambient noise recordings acquired at the same locations. Within the scope of the study, synthetic earthquake records with characteristics similar to regional acceleration records were used as input motion in the ground response analyses to determine the frequency response of the soil and to identify resonance properties. The resulting transfer functions were compared with HVSR curves calculated from both seismic event and ambient noise recordings. The comparison focused primarily on dominant frequency and the agreement of spectral responses. The findings indicate that evaluating Vs profiles derived from combined surface wave methods using the transfer function approach offers a reliable method for identifying site-specific frequency characteristics, especially in locations where 1D soil behavior is dominant.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zeminlerin dinamik yükler (sismik, makine titreşimi vb.) altında gerilme deformasyon

davranışının belirlenmesi zemin saha tepkisinin belirlenmeye çalışıldığı geoteknik deprem mühendisliği bilim dalında kritik bir öneme sahiptir. Zeminlerin frekans tepkisini ve davranışını

belirlemek, özellikle yer hareketlerinin yapıların üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde tahmin etmek açısından büyük bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, yüzey dalgası yöntemleri (MASW ve ReMi), zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve özellikle Vs profillerinin elde edilmesinde yüksek güvenilirlik sağlayan yöntemler arasında yer almaktadır [1,2]. Ancak, elde edilen zemin profillerinin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için, zemin profilinin frekans tepkisinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi de gerekmektedir.

Zeminlerin frekans tepkisini değerlendirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri, transfer fonksiyonu yaklaşımı olup, bu yaklaşım, zemine uygulanan bir giriş hareketine karşılık olarak yüzeydeki tepkiyi frekans ortamında analiz edilmesine olanak tanır [3]. Transfer fonksiyonu, genellikle ivme kaydının zemin kolonunun alt sınırından verilmesi ile belirlenir ve bu sayede zeminin hakim frekansları ve rezonans davranışı belirlenebilir. Bu analiz, özellikle zemin profillerinin dinamik özelliklerini ortaya koymada önemli bir araçtır [4].

Diğer bir yöntem ise, HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio – Yatay/Düşey Spektral Oran) yöntemi hem deprem kayıtları hem de çevresel gürültü kayıtları kullanılarak zemin hakim frekansının belirlenmesi ve zemin davranışının anlaşılması amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yatay ve düşey ivme bileşenlerinin frekans spektrumları üzerinden hesaplanan spektral oran sayesinde rezonans frekansı hakkında bilgi edinilir [5]. HVSR eğrisinin, zemin profilinin doğruluğunun ve rezonans frekanslarının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı literatürde sıkça vurgulanmaktadır [6].

Literatürde, yüzey dalgası analizleri ile elde edilen Vs profillerinin ve HVSR analizlerinin karşılaştırılması üzerine bazı çalışmalar

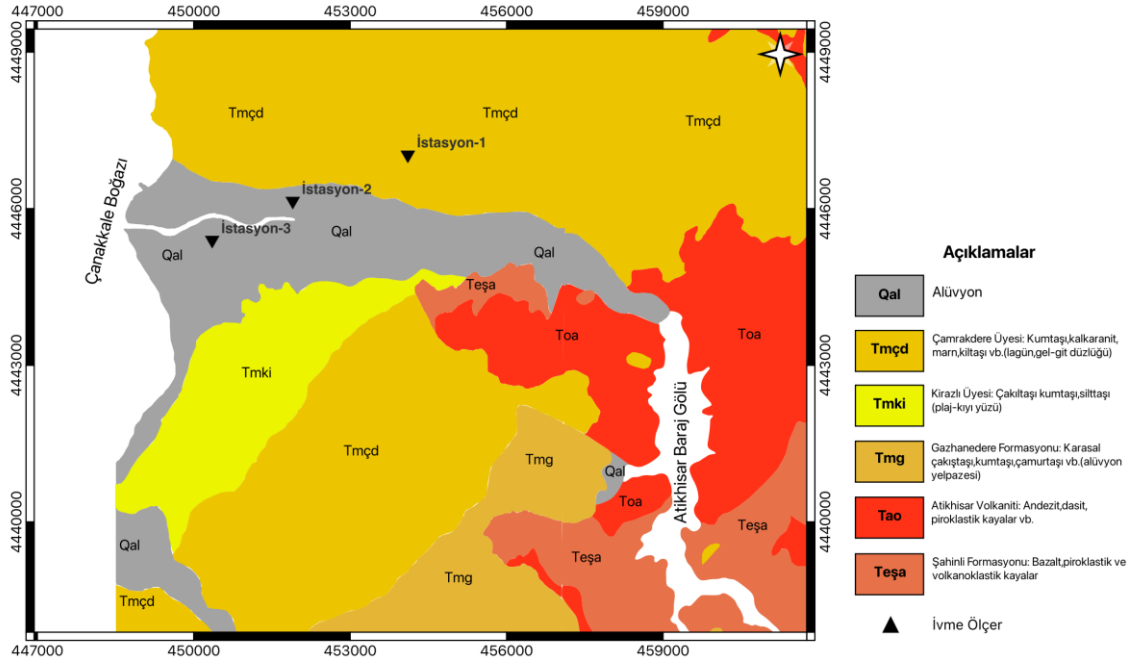
bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel sonuçlar sunmakta ve transfer fonksiyonu yaklaşımının zemin davranışı üzerindeki etkisi daha sınırlı bir biçimde ele alınmaktadır [7,8]. Bu nedenle bu çalışmanın amacı, sahada kurulmuş olan üç adet ivme istasyonunun bulunduğu alanda ölçülen Vs profilleri ile gerçekleştirilen 1B lineer zemin davranış analizleri ile hesaplanan transfer fonksiyonlarının, aynı lokasyonda kaydedilen ivme kayıtlarından ve çevresel gürültü ölçümlerinden elde edilen HVSR eğrileri ile karşılaştırılmasını yapmak ve uyumluluğunu tartışmaktır.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Çalışma Alanı ve Jeolojisi (Study Area and Geology)

Çalışma Sahası Çanakkale ili, Gelibolu Yarımadası ile Biga Yarımadası'nın büyük bir bölümünü içine almaktadır. Biga Yarımadası'nda farklı oluşumlara ve yaşlara sahip birçok farklı kaya grubu bulunmaktadır. Bu kaya gruplarının temeli Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalardan (Kazdağ metamorfik kompleksi) oluşmaktadır. Mesozoyik Karakaya kompleksi ve meta-ofiyolitik kayalar bu temelin üzerinde tektonik bir temas üzerinde yer almaktadır. Senozoyik zamanlarda yaygın magmatik kayalar (plütonik, subvolkanik ve volkanik) ve sığ deniz ve göl kıvrımlı tortulları gelişmiştir.

Çalışma alanında en altta Şahinli Formasyonu gözlenmektedir. Onun üstünde, andezit, dasit ve piroklastik kayalardan oluşan Atikhisar Volkaniti yer almaktadır. Çanakkale yerleşim alanı, Orta Miyosen-Pliyosen tortul birimleri "Çanakkale Grubu" [9], ve alüvyon birikintilerinden oluşan Çanakkale havzasında yer almaktadır. Çanakkale Grubu, alttan üste doğru Gazhanedere Formasyonu, Kirazlı Formasyonu, Çamrakdere Formasyonu ve Alçitepe Formasyonundan oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Jeoloji haritası ([12]'den değiştirilerek) ve ivme istasyonlarının konumu (Geological map (adapted from [12]) and the locations of acceleration stations)

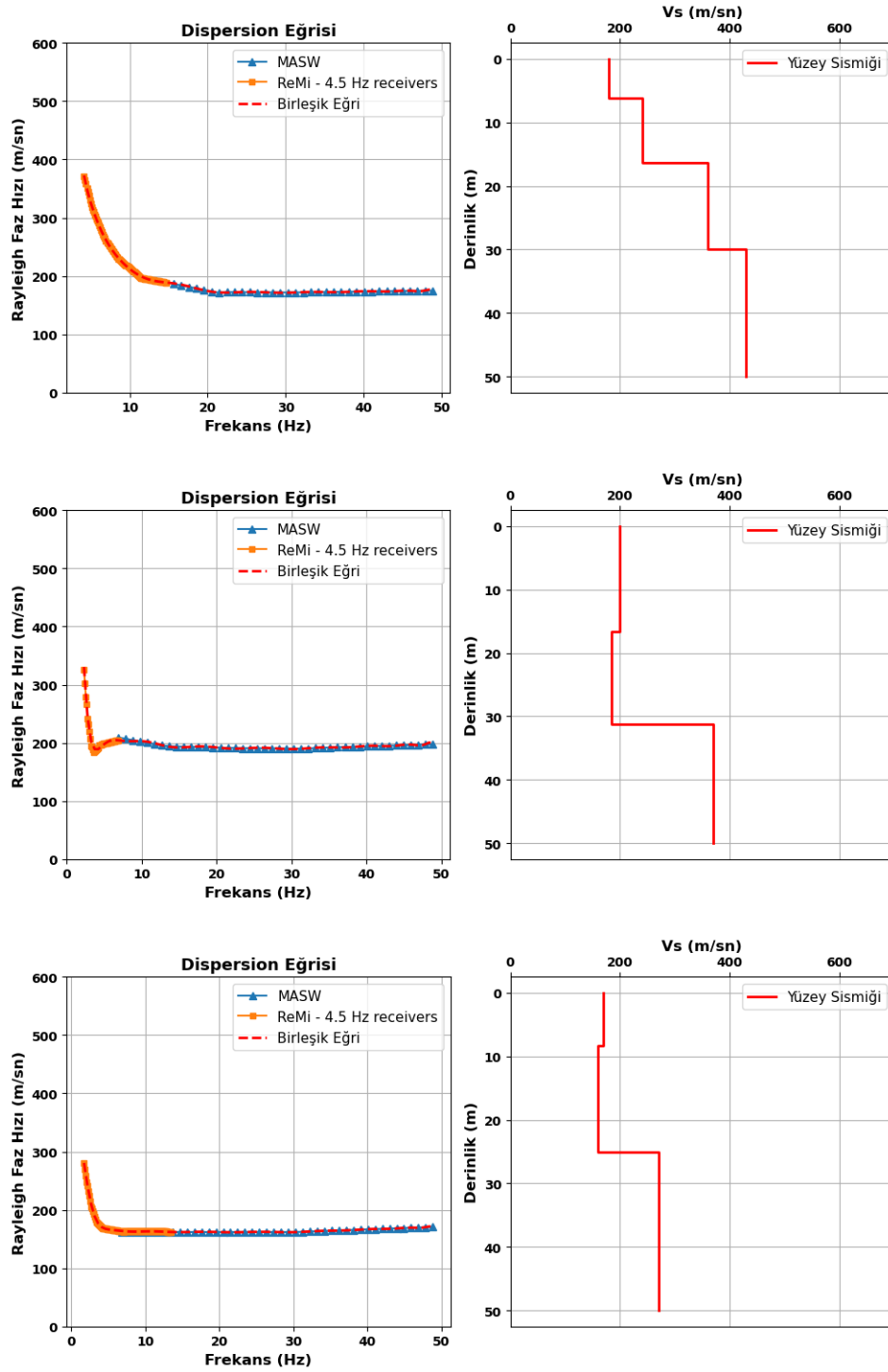
Gazhanedere Formasyonu inceleme alanının güneydoğu kesiminde yüzeylenmektedir. Konglomera, kumtaşı ve kırmızımsı gri renkli çamurtaşından oluşur [10]. Çakıltaşı, kumtaşı ve silttaşından oluşan Kirazlı Formasyonu, yerleşim alanının güneyinde yüzeylenmektedir. Çalışma alanının kuzey kesiminde yaygın olarak yüzeyleyen Çamrakerde Formasyonu, genellikle kumtaşı, kalkaranit, marn, kilitaşından oluşur [11]. Çanakkale yerleşim alanının büyük bir kısmı Sarıçay Nehri'nin oluşturduğu alüvyon çökelleri üzerinde yer almaktadır. Burada ivme istasyonları alüvyon kalınlığının farklı olduğu alanlar gözetilerek farklı hakim frekans değerlerine sahip olacağı düşüncesiyle üç sahada kurulmuştur.

2.2. Yüzey Dalgası Yöntemleri ile Vs Profilinin

Elde Edilmesi (Deriving the Vs Profile Using Surface Wave Analysis Methods)

Yüzey dalgası yöntemlerinden Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) ve Kırılma Mikrotremörü Yöntemi (ReMi) birlikte kullanılarak zeminlerin Vs profilleri elde edilmiştir. MASW yöntemi, sismik kaynak ile oluşturulan Rayleigh dalgalarının yayılma hızlarının analizine dayalı olarak yer altı tabakalarının Vs dağılımını belirlemektedir [1]. ReMi yöntemi ise çevresel ve rastgele kaynaklı mikrosismik gürültüleri kullanarak benzer şekilde yüzey dalgası yayılımına ilişkin dispersiyon eğrilerinin elde edilmesinde kullanılır [13].

Sahada veri toplama işleminde, 24 kanallı sismik kayıtçı ile 4.5 Hz merkezi frekansa sahip alıcılar ile MASW yöntemi için aktif sismik kaynak olarak balyoz kullanılmış, ReMi yönteminde ise aynı dizilimde çevresel gürültü belirli bir süre boyunca pasif olarak kaydedilmiştir. Her iki yöntem için elde edilen yüzey dalgası kayıtlarından, dispersiyon eğrileri çıkarılmış, ardından bu eğriler ters çözüm yöntemi ile Vs profiline dönüştürülmüştür. Ters çözümde başlangıç modeli olarak yerel jeolojik bilgiler ve literatürdeki ortalama zemin sınıflamaları dikkate alınmıştır. MASW ve ReMi yöntemlerinin birlikte kullanılması, aktif ve pasif kaynakların tamamlayıcılığından faydalanarak geniş bir derinlik aralığında Vs profilinin daha güvenilir bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır. MASW yöntemi, özellikle yüzeye yakın tabakalarda yüksek çözünürlük sağlarken; ReMi yöntemi, çevresel gürültüleri kullanarak daha derin tabakalara ilişkin bilgi vermekte ve profilin derinliğini artırmaktadır [14]. Bu sayede, farklı dalga boylarının duyarlı olduğu derinlik aralıkları birleştirilerek daha kapsamlı bir yer altı modeli oluşturulabilmektedir [13,15]. Aynı zamanda iki farklı yöntemden elde edilen dispersiyon eğrilerinin birbiri ile uyumunu da kontrol etme imkanı vermektedir. İvme istasyonlarının bulunduğu sahalarda MASW ve ReMi ölçümleri ile elde edilen birleşik dispersiyon eğrileri ve ters çözüm ile elde edilmiş Vs profilleri sırasıyla Şekil 2'de verilmiştir.



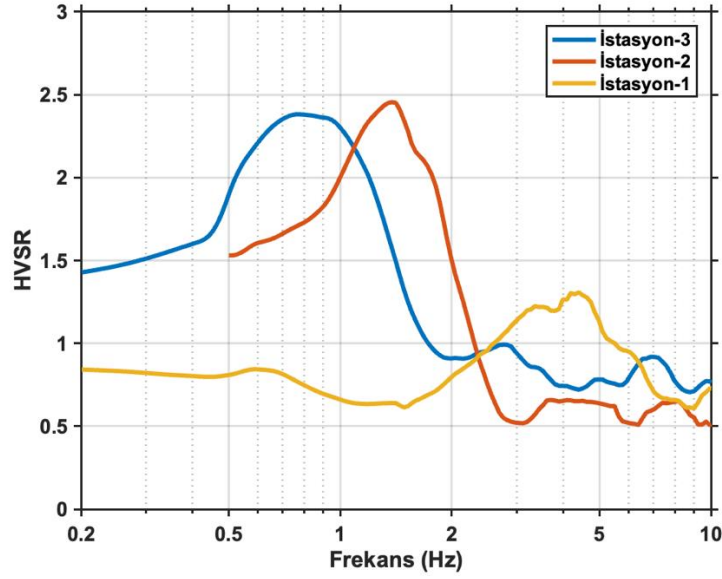
Şekil 2. Sırasıyla istasyonlarda elde edilen birleşik dispersiyon eğrisi ve Vs profilleri (The combined dispersion curves and Vs profiles obtained at the stations, respectively)

2.3. HVSr Eğrilerinin Hesaplanması (Calculation of HVSr Curves)

HVSr analizlerinde, ivme ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilen zaman serileri yatay ve dikey bileşenlerine ayrılarak, her bir bileşenin Fourier dönüşümleri hesaplanmış ve spektral oran yöntemi uygulanmıştır. Bu analizlerde veri işleme ve spektral oran hesaplamaları için açık kaynak kodlu Geopsy yazılımı [16] kullanılmıştır. Yatay

bileşenlerin (H_E, H_N) genliğinin karesinin toplamının karekökü ile dikey H_V bileşenin genliği arasındaki oran alınarak her ivme istasyonunun bulunduğu alan için HVSr eğrileri elde edilmiştir (Eşitlik1). Şekil 3'te çevresel gürültü verilerinden elde edilen HVSr eğrileri verilmiştir.

$$HVSr(f) = \frac{\sqrt{|H_E(f)|^2 + |H_N(f)|^2}}{V(f)} \quad (1)$$



Şekil 3. Her istasyon için mikrotremor ölçümlerinden elde edilmiş HVSR eğrileri (The HVSR curves obtained from microtremor measurements for each station)

Çalışmada elde edilen hakim frekansı değerleri ayrıca, [17]'de çalışma alanı için önerilen bağıntı kullanılarak mühendislik kayası derinliklerinin tahmin edilmesi için kullanılmıştır. HVSR analizlerinden elde edilen rezonans frekansı (f_r) ile mühendislik kayası derinliği (h) arasındaki ilişkiyi belirten ve Eşitlik (2)'de verilen ifade ile yer hareketinin 1B modele etkileyeceği derinlik belirlenmiştir.

$$h = 86.176xfr^{-1.063} \quad (2)$$

2.4.1B Lineer Zemin Tepki Analizi ve Transfer

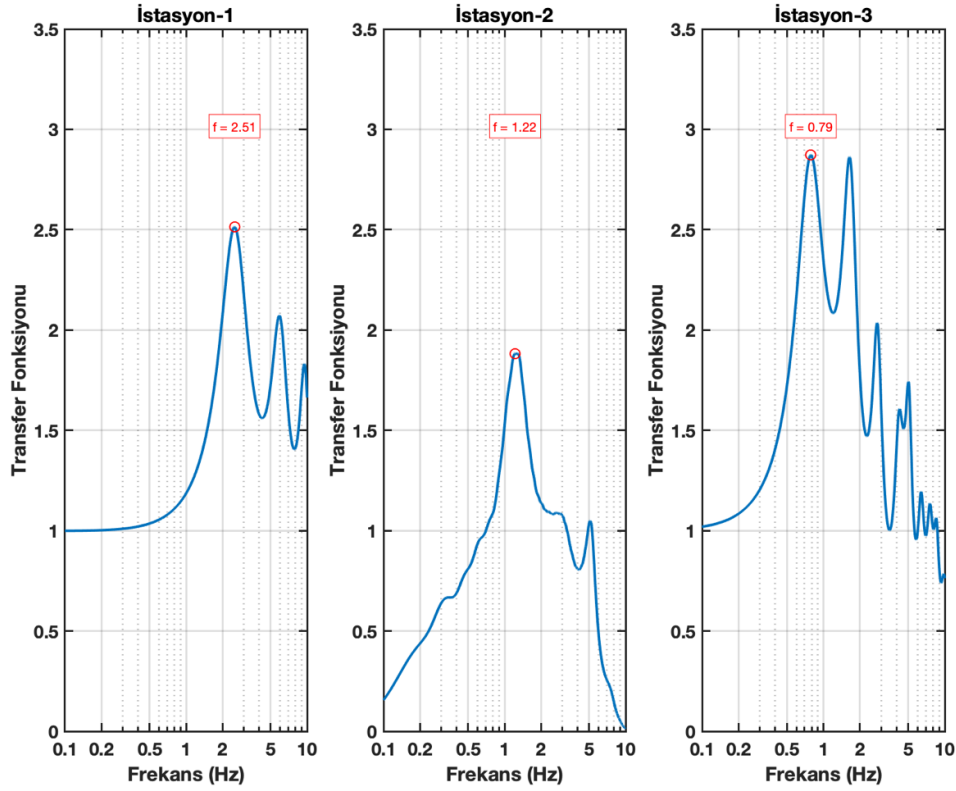
Fonksiyonunun Hesaplanması (1D Linear Site Response Analysis and Calculation of the Transfer Function)

Çalışmada MASW ve ReMi yöntemleriyle elde edilen Vs profili kullanılarak 1 boyutlu lineer zemin davranış analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, yaygın olarak kullanılan DEEPSOIL v7 yazılımı ile yapılmıştır [18]. Etki seviyesindeki ivme kaydını frekans ortamına taşımak için Fourier dönüşümü yapılarak zaman ortamındaki verilerin frekans ortamına aktarılması ve zeminin frekans tepkisinin ortaya konması sağlanmıştır.

Transfer fonksiyonu, sistemin giriş ve çıkış arasındaki frekans tabanlı ilişkiyi tanımlar ve bu çalışma kapsamında zemin profilinin dinamik davranışını değerlendirmek için kullanılmıştır. Analiz kapsamında, sönüm ve rijitlik özelliklerinin küçük genlikli deformasyonlar altında zemin

tepkisinin lineer olduğu varsayılmıştır. Bu işlemde lineer elastik model kullanılmıştır. Zemin katmanlarının dinamik özellikleri, bu modelde sabit kabul edilen elastik parametrelerle belirlenmiştir. Bu bağlamda, zemin profili her biri sabit Vs, yoğunluk ve sönüm oranına sahip yatay tabakalardan oluşan bir model şeklinde tanımlanmıştır. Zemin profiline ait her tabaka için birim hacim ağırlıkları, literatürde gevşekten orta sıkıya değişen alüvyon zeminler için öneriye uygun olarak 17-20 kN/m³ arasında belirlenmiştir [4]. 1970'li yıllardan itibaren günümüze değin laboratuvarında gerçekleştirilen zemin dinamik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler, dinamik yükler altında zemin rijitliğinin (kayma modlünün) kayma birim deformasyonuna bağlı olarak azaldığı; buna bağlı olarak sönüm yeteneğinin arttığını göstermektedir [19,20]. Zemin profiline ait her tabaka için sönüm oranları buna uygun olarak, Vs değerlerine bağlı değişken şekilde tanımlanmıştır. Gevşek alüvyon birimler için %4-5, orta derecede sıkı zeminler için %3-4, sert zemin ve düşük dayanımlı kaya ortamları için ise %2 aralığında sönüm oranları seçilmiştir [4,19]. Yüzeye ulaşan hareketin frekans cevabını gözlemlemek amacıyla, analizlerde Gabor kaydı girdi hareketi olarak kullanılmıştır. Gabor kaydı, merkezi frekansı belirlenmiş geniş bantlı bir sinyal olup, özellikle transfer fonksiyonlarının belirlenmesinde etkili bir araçtır [14]. Zemin profilinin alt sınırı elastik yarı uzay olarak sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, dalga alanında yapay yansımaların oluşmasını engelleyerek transfer fonksiyonunun

güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır. Elde edilen transfer fonksiyonları ve hakim frekans değerleri her istasyon için sırasıyla Şekil 4'te verilmiştir.



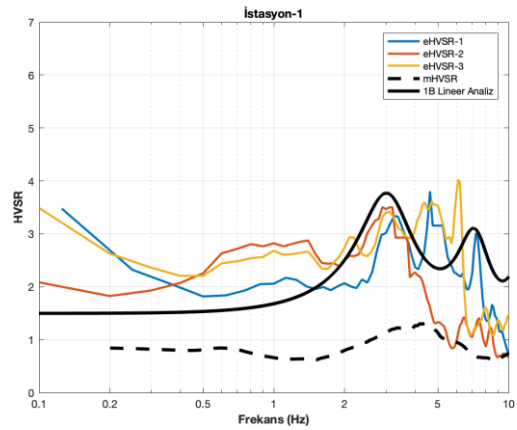
Şekil 4. İvme istasyonlarında hesaplanan transfer fonksiyonları ve hakim frekans değerleri (The transfer functions and dominant frequencies calculated at the acceleration stations)

3. BULGULAR (FINDINGS)

MASW ve ReMi yöntemleriyle elde edilen Vs profillerine dayanarak DeepSoil yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen 1B lineer zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonları, aynı noktalarda kaydedilen deprem kayıtlarından hesaplanan HVSR eğrileriyle frekans düzleminde karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, yüzeydeki hareketin temel kaya ortamına göre frekans karakteristikleri elde edilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonu, daha sonra aynı noktada kaydedilmiş bir ivme kaydından (eHVSR) ve çevresel gürültü kaydından (mHVSR) hesaplanan HVSR eğrileri ile karşılaştırılarak profilin doğrulanabilirliği tartışılmıştır.

İstasyon-1'de yapılan analizlerde (Şekil 5), transfer fonksiyonu ile eHVSR kayıtlarının hakim frekans değerleri uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak mHVSR sonuçlarının belirgin bir pik görülmemekle beraber düze yakın bir eğri elde edilmiştir. Sığ sedimanter ortamlarda, düşük empedans kontrastının olduğu durumlarda belirgin bir pik frekansın bulunmadığı ve HVSR eğrisinin düzleştiği bilinmektedir [21,22]. Bu duruma karşı

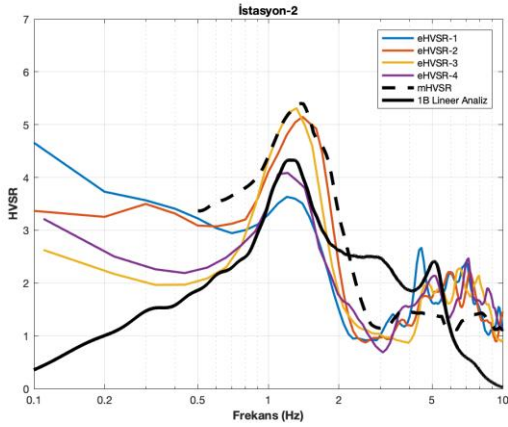
zemin hakim frekansının belirlenmesi için deprem kayıtlarının kullanılması önerilmiştir [23].



Şekil 5. İstasyon-1'de elde edilen transfer fonksiyonu ile deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilmiş HVSR eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the transfer function obtained at Station-1 with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise recordings)

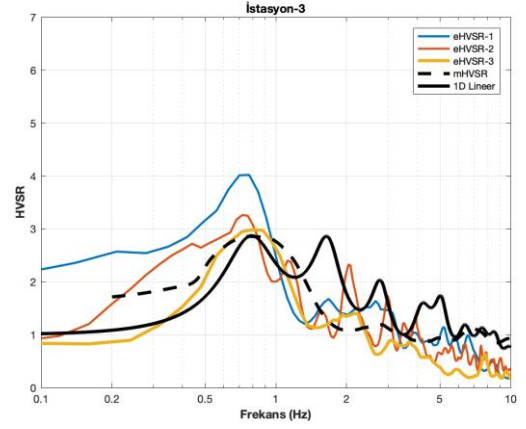
İstasyon-2'de elde edilen HVSR analiz sonuçları (Şekil-6), farklı deprem kayıtlarına dayalı dört ayrı eHVSR eğrisi, çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan ortalama HVSR (mHVSR) eğrisi ve 1B

lineer zemin tepki analizinden elde edilen transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Tüm eHVSER eğrileri ile mHVSER eğrisi arasında rezonans frekansı açısından genel bir uyum gözlenmektedir. Rezonans frekansı yaklaşık 1.7–1.8 Hz civarında belirlenmiştir. 1B lineer analiz ile elde edilen transfer fonksiyonu, rezonans frekansı bakımından eHVSER ve mHVSER eğrileriyle oldukça iyi örtüşmektedir. Ancak yüksek frekans bölgesinde (yaklaşık 4–6 Hz aralığı), transfer fonksiyonunun gösterdiği ikinci rezonans tepkisinin HVSR eğrilerinde belirgin şekilde gözlenmediği görülmektedir.



Şekil 6. İstasyon-2’de elde edilen transfer fonksiyonu ile deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilmiş HVSR eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the transfer function obtained at Station-2 with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise recordings)

İstasyon-3’de elde edilen HVSR analiz sonuçları (Şekil-7), farklı deprem kayıtlarından elde edilen üç ayrı eHVSER eğrisi, çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan ortalama HVSR (mHVSER) eğrisi ve 1B lineer analiz sonucunda elde edilen transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Burada da eHVSER eğrileri ile mHVSER eğrisi arasında rezonans frekansı açısından genel bir uyum gözlenmektedir. Rezonans frekansı yaklaşık 0.8–0.9 Hz civarında belirlenmiştir. Yüksek frekans bileşenleri (1.5–7 Hz arası) incelendiğinde, transfer fonksiyonunda bu bölgede görülen diğer modlar HVSR eğrilerinde daha az belirgindir. Bu durum, üst zemin tabakalarının derinlik yönlü empedans farklarının zayıf olmasından kaynaklanıyor olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 7. İstasyon-3’de elde edilen transfer fonksiyonu ile deprem ve çevresel gürültü kayıtlarından elde edilmiş HVSR eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the transfer function obtained at Station-3 with HVSR curves derived from earthquake and ambient noise recordings)

4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, yüzey dalgası analizi yöntemleri kullanılarak elde edilen Vs profilleri ile gerçekleştirilen bir boyutlu (1B) lineer zemin tepki analizlerinden hesaplanan transfer fonksiyonları, aynı lokasyonlarda kaydedilen ivme ve çevresel gürültü kayıtlarından hesaplanan yatay/düsey spektral oran (HVSR) eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda zeminin hakim frekansı bakımından önemli düzeyde uyum sağlandığı gözlenmiştir. Transfer fonksiyonları, zeminlerin dinamik davranışını frekans bazlı olarak tanımlamada etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle eHVSER ve mHVSER eğrileri ile transfer fonksiyonlarının rezonans frekansları açısından uyum, sahanın hakim frekans özelliklerinin doğruluğunu pekiştirmektedir.

Ancak, bazı deprem kayıtlarından elde edilen eHVSER eğrileri ve transfer fonksiyonu arasında düşük frekans aralıklarında küçük farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların temel nedenleri arasında kullanılan deprem kayıtlarının düşük genlikli olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Özellikle istasyon 1’de e HVSR analizinden düze yakın bir eğri elde edilmiştir. Bu durum, zemin tabakaları arasında önemli bir empedans kontrastının bulunmadığı durumlarda HVSR yönteminin, zemin hakim frekansını belirlemek için uygun olmadığını göstermektedir. Bu durumlarda hakim frekansı belirlemek için, mevcutsa deprem kayıtlarının kullanılması tercih edilmesi önerilir.

Zemin ve mühendislik kayası arasındaki empedans farkının bulunduğu durumlarda mHVSr yöntemiden başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Bu durum, deprem kayıtlarının mevcut olmadığı sahalarda mHVSr sonuçlarının kullanılabilirliğini ayrıca göstermektedir.

MASW ve ReMi yöntemlerinin bir arada kullanılması, Vs profillerinin etki derinliğinin ve doğruluğunun artırılmasında etkili olmuştur. ReMi yöntemi, daha derin tabakaların tespitinde avantajlar sunarken, MASW yöntemi ise özellikle yüzeye yakın tabakaların belirlenmesinde yüksek çözünürlük sağlamıştır. Bu iki yöntemin birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılması, güvenilir yer altı modellerinin oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Ancak mühendislik kayasının derinde yer alması bu yöntemler ile de derinliğinin tespit edilmemesine neden olmaktadır. Bu durumda daha derin sismik araştırmaların yapılması önerilmekle beraber saha için mevcut olması durumunda rezonans frekansı (f_r) ile mühendislik kayası derinliği (h) ilişkilerinin alternatif olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Sonuç olarak, zeminlerin dinamik tepkisinin belirlenmesinde 1B lineer zemin tepki analizleri ile hesaplanan transfer fonksiyonlarının, HVSr yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, saha koşullarına özgü rezonans davranışlarının daha kesin ve güvenilir biçimde tanımlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak benzer araştırmalarda yüzey dalgası yöntemlerinin ve HVSr analizlerinin bütünleşik kullanımı ve transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmasının model doğruluğunu arttırmak açısından önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminin FDK-2021-3833 nolu projesi tarafından desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Onur EYİŞÜREN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Öznür KARACA: Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the results and performed the writing process.

Sadık ÖZTOPRAK: Sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. B. Park, R. D. Miller, and J. Xia, "Multichannel analysis of surface waves (MASW)," *Geophysics*, vol. 64, no. 3, pp. 800–808, 1999. doi:10.1190/1.1444590.
- [2] J. Xia, R. D. Miller, C. B. Park, and G. Tian, "Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 52, no. 1, pp. 45–57, 2003. doi:10.1016/S0926-9851(02)00239-2
- [3] J. Garcia-Suarez, J. González-Carbajal, and D. Asimaki, "Analytical 1D transfer functions for layered soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 163, p. 107532, 2022. doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107532.
- [4] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.
- [5] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface," *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, vol. 30, no. 1, pp. 25–33, 1989.
- [6] J. Lermo, F. J. Chávez-García, "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 83, no. 5, pp. 1574–1594, 1993.
- [7] R. D. Borcherdt, "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 60, no. 1, pp. 29–61, 1970.

- [8] M. B. S. Yust, B. R. Cox, and T. Cheng, "Epistemic Uncertainty in Vs Profiles and Vs30 Values Derived from Joint Consideration of Surface Wave and H/V Data at the FW07 TexNet Station," in *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, GSP 291, pp. 387–396, 2018. doi:10.1061/9780784481462.038.
- [9] M. Siyako, "Geology of the Çanakkale Region, NW Turkey," *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 27, no. 1, pp. 45–59, 2006. doi:10.1016/j.jseaes.2005.03.004.
- [10] E. Atabey, K. Şentürk, Z. Karaköse, "Çanakkale-Altınkum Arasının Jeolojisi," *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, no. 129, pp. 47–65, 2004.
- [11] K. Şentürk, Z. Karaköse, "Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi," *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, no. 107, pp. 1–22, 1987.
- [12] A. Ilgar, E. S. Demirci, M. Duru, Ş. Pehlivan, M. Dönmez, A. E. Akçay, H15-H16 Paftası Jeoloji Haritası. Ankara, Türkiye: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2008.
- [13] J. N. Louie, "Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 91, no. 2, pp. 347–364, 2001. doi:10.1785/0120000098.
- [14] Foti, C. G. Lai, G. J. Rix, C. Strobbia, *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*, CRC Press, 2017.
- [15] L. V. Socco and C. Strobbia, "Surface-wave method for near-surface characterization: A tutorial," *Near Surface Geophysics*, vol. 2, no. 4, pp. 165–185, 2004. doi:10.3997/1873-0604.2004015.
- [16] M. Wathelet, J.-L. Chatelain, C. Cornou, G. Di Giulio, B. Guillier, M. Ohrnberger, and A. Savvaidis, "Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing," *Seismological Research Letters*, vol. 91, no. 3, pp. 1878–1889, 2020. doi:10.1785/0220190313.
- [17] A. Büyüksaraç, T. Bekler, A. Demirci, and O. Eyisüren, "New insights into the dynamic characteristics of alluvial media under the earthquake prone area: a case study for the Çanakkale city settlement (NW of Turkey)," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 6, p. 562, 2021. doi:10.1007/s12517-021-06665-w.
- [18] Y. M. A. Hashash, M. I. Musgrove, J. A. Harmon, D. R. Groholski, C. A. Phillips, and D. Park, *DEEPSOIL 2016, User Manual and Tutorial*. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.
- [19] H. B. Seed and I. M. Idriss, *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley, 1970.
- [20] Z. Huang, S. Cai, R. Hu, J. Wang, M. Jiang, and J. Gong, "Investigation of the effect of relative density on the dynamic modulus and damping ratio for coarse grained soil," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 15, pp. 6847, 2024. doi:10.3390/app14156847
- [21] A. Gosar, "Microtremor HVSR method – a passive geophysical tool to study site effects: Examples from Slovenia," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 17, no. 6, pp. 925–937, 2017. doi:10.5194/nhess-17-925-2017.
- [22] V. D'Amico, M. Picozzi, F. Baliva, and D. Albarello, "Ambient noise measurements for preliminary site-effects characterization in the urban area of Florence, Italy," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 98, no. 3, pp. 1373–1388, 2008. doi:10.1785/0120070231.
- [23] SESAME Project, *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation*, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026, December 2004.