



**T.C.**

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BASEN GEOMETRİSİNİN BELİRLENMESİNDE YÜZEY  
DALGASI SPEKTRAL ANALİZ YÖNTEMLERİ VE ZEMİN TEPKİ  
ANALİZLERİNİN KULLANIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**Onur EYİSÜREN**

**Tez Danışmanı**

**DOÇ. DR. ÖZNUR KARACA**

**ÇANAKKALE – 2025**





T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BASEN GEOMETRİSİNİN BELİRLENMESİNDE YÜZEY DALGASI  
SPEKTRAL ANALİZ YÖNTEMLERİ VE ZEMİN TEPKİ ANALİZLERİNİN  
KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Onur EYİSÜREN

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÖZNUR KARACA

EŞ DANIŞMAN

PROF. DR. SADIK ÖZTOPRAK

BU ÇALIŞMA, ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL  
ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ VE TÜRKİYE BİLİMSEL  
VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU TARAFINDAN DESTEKLENMİŞTİR.

PROJE NO: 2021-3833 VE 121M760

ÇANAKKALE – 2025



T.C.  
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Onur EYİSÜREN tarafından Doç. Dr. Öznur KARACA yönetiminde ve Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK eş danışmanlığında hazırlanan ve **20/08/2025** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Basen Geometrisinin Belirlenmesinde Yüzey Dalgası Spektral Analiz Yöntemleri ve Zemin Tepki Analizlerinin Kullanımı**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**İmza**

Doç. Dr. Öznur KARACA

(Danışman)

Prof. Dr. M. Celal TUNUSLUOĞLU

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ

Prof. Dr. N. Sinan IŞIK

Prof. Dr. Özcan BEKTAŞ

Tez No : 10612498

Tez Savunma Tarihi : 20/08/2025

.....  
Prof. Dr. Melis ULU DOĞRU

Enstitü Müdürü

.../.../2025

## ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

(İmza)

Onur EYİSÜREN

20/08/2025

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesini mümkün kılan değerli danışman hocam Doç. Dr. Öznur KARACA ve tez süresince her zaman destek veren eş danışmanım Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a öncelikle teşekkür ederim. Tez ve yürütülen projeler süresince her aşamada fikir ve desteklerini veren Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ hocama ayrıca minnettarım. Proje süresince analizlerde fikirlerinden çokça faydalandığım Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK hocama, her ihtiyacım olduğunda koşulsuz destek veren değerli arkadaşım Dr. Sinan SARGIN'a sonsuz teşekkür ederim. İhtiyaç duyduğumda her zaman desteğini aldığım Prof. Dr. Özcan BEKTAŞ hocama, arazide ölçümlerde destek veren Jeofizik Müh. Erdim SARITEPE'ye teşekkür ederim. Test sahalarındaki deprem verilerini benimle paylaşan Prof. Dr. Gülüm TANIRCAN ve Dr. Hakan ALÇIK hocalarıma da teşekkürlerimi sunarım. Bu tez kapsamında destek veren Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna teşekkür ederim. Son olarak bu uzun süreçte ihmal ettiğim ancak desteklerini her zaman hissettiğim değerli eşim Nilay ve kızım Nil Deniz'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onur EYİSÜREN

Çanakkale, Temmuz 2025

## ÖZET

### **BASEN GEOMETRİSİNİN BELİRLENMESİNDE YÜZEY DALGASI SPEKTRAL ANALİZ YÖNTEMLERİ VE ZEMİN TEPKİ ANALİZLERİNİN KULLANIMI**

Onur EYİSÜREN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Öznur KARACA

Eş Danışman: Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

20/08/2025, 68

Bu tez çalışmasında, basen geometrisinin modellenmesi amacıyla yüzey dalgası spektral analiz yöntemleri ile zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının birlikte kullanımı araştırılmıştır. Çanakkale ili sınırları içerisinde yer alan çalışma alanında, Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW), Kırılma Mikrotremörü (ReMi) ve Mekansal Özilişki (SPAC) yöntemleri uygulanarak geniş frekans aralığında dispersiyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler, ters çözüm yöntemleriyle değerlendirilerek zeminlerin kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) profilleri oluşturulmuştur. Elde edilen  $V_s$  profilleri, hem çevresel gürültü (mHVSR) hem de deprem kayıtlarına (eHVSR) dayalı spektral oran yöntemleriyle karşılaştırılmış; zeminlerin hakim frekansları belirlenmiştir.

Ayrıca, zemin tepki analizleri gerçekleştirilerek,  $V_s$  profillerine dayalı transfer fonksiyonları hesaplanmış ve gözlemsel HVSR eğrileriyle uyumu değerlendirilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım, basenlerin derinliğinin, kenar geometrisinin ve farklı konumlardaki hakim frekanslarının daha güvenilir şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, yüzey dalgası yöntemlerinin ve zemin tepki analizlerinin birlikte kullanımının, zemin davranışının modellenmesinde güçlü bir araç sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Basen Geometrisi, Yüzey Dalgası Analizi, Kayma Dalgası Hızı, Spektral Oran, Zemin Tepki Analizi



## ABSTRACT

### USE OF SURFACE WAVE SPECTRAL ANALYSIS METHODS AND SITE RESPONSE ANALYSES IN DETERMINING BASIN GEOMETRY

Onur EYİSÜREN

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Doctoral Dissertation in Geological Engineering

Advisor: Doç.Dr. Öznur KARACA

Co-Advisor: Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

20/08/2025, 68

In this study, the combined use of surface wave spectral analysis methods and transfer functions obtained from site response analyses was investigated for modeling basin geometry.. Within the study area located in the province of Çanakkale, Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW), Refraction Microtremor (ReMi), and Spatial Autocorrelation (SPAC) methods were applied to obtain dispersion curves over a wide frequency range. These dispersion curves were then inverted to derive shear-wave velocity ( $V_s$ ) profiles of the subsurface. The obtained  $V_s$  profiles were compared with dominant frequencies determined by horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) methods based on both ambient noise (mHVSr) and earthquake records (eHVSr).

Additionally, site response analyses were conducted to compute transfer functions based on the  $V_s$  profiles, and the consistency of these functions with observed HVSr curves was evaluated. This integrated approach enabled a more reliable determination of basin depth, edge geometry, and spatial variation of fundamental frequencies. The results

demonstrate that the joint application of surface wave methods and site response analyses provides a powerful tool for modeling site-specific seismic behavior.

**Keywords:** Basin Geometry, Surface Wave Analysis, Shear Wave Velocity, Spectral Ratio, Site Response Analysis



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x

## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı .....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	3

## İKİNCİ BÖLÜM

### KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi ile Basen Geometrisinin Belirlenmesi.....	6
2.2. Spektral Oran Yöntemlerinin Kullanımı.....	8

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM

3.1. Çalışma Sahası ve Jeolojisi.....	13
3.2. Sondaj ve Kuyu içi Deneyler .....	15
3.3. İvme Kayıt İstasyonlarının Kurulumu .....	20

3.4. Yüzeysel Dalgalarının Spektral Analizi Yöntemleri .....	21
3.4.1. Çok Kanallı Yüzeysel Dalgası Analizi (MASW) Yöntemi .....	22
3.4.2. Kırılma Mikrotremörü (ReMi) Yöntemi .....	25
3.4.3. Mekansal Özilişki (SPAC) Yöntemi .....	26
3.5. Spektral Oran Yöntemleri .....	28
3.5.1. Çevresel Gürültü Tabanlı Yatay/Düşey Spektral Oran (mHVSR) Yöntemi .....	29
3.5.2. Deprem Kayıtlarına Dayalı Yatay/Düşey Spektral Oran (eHVSR) Yöntemi .....	29
3.6. Zemin Tepki Analizleri.....	31

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Vs Profillerinin Elde Edilmesi ve Kalibrasyonu.....	32
4.2. HVSR eğrilerinin Yorumu .....	36
4.3. Zemin Tepki Analizlerden Elde Edilen Transfer Fonksiyonlarının Saha Verileri ile Karşılaştırılması .....	46
4.4. Derinlik-Frekans İlişkisinin Elde Edilmesi .....	49
4.5. <i>fo-h</i> İlişkisinin Çanakale Baseni Üzerine Uygulanması.....	52

## BEŞİNCİ BÖLÜM SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar.....	54
5.2. Öneriler.....	57
KAYNAKÇA .....	59

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$V_s$	Kayma dalgası hızı
HVSR	Yatay/Düsey spektral oran
MASW	Çok kanallı yüzey dalgası analizi
ReMi	Kırılma Mikrotremoru
SPAC	Mekansal Özilişki
mHVSR	Çevresel gürültü kayıtlarından elde edilen spektral oran
eHVSR	Deprem kayıtlarından elde edilen spektral oran
$f_0$	Hakim frekans
$h$	Sediman kalınlığı
OLS	En küçük kareler
WLS	Ağırlıklı en küçük kareler

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo No</b>	<b>Tablo Adı</b>	<b>Sayfa No</b>
<b>Tablo 1</b>	<i>fo-h</i> ilişkisinin literatür derlemesi	7
<b>Tablo 2</b>	Sondajlara ait bilgiler	16
<b>Tablo 3</b>	HVSR analizinde kullanılan deprem kayıtlarına ilişkin bilgiler	38



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Çalışma alanı jeolojisi	15
Şekil 2	Çalışma alanındaki test sahalarının konumları	16
Şekil 3	Sondaj kuyularından elde edilen numuneler	17
Şekil 4	PS Logging ölçüm sonuçları ve sondaj logları	19
Şekil 5	İvme istasyonlarının kurulumu	21
Şekil 6	MASW yönteminin veri işlem aşamaları	24
Şekil 7	ReMi yönteminin veri işlem aşamaları	26
Şekil 8	SPAC yönteminin veri işlem aşamaları	27
Şekil 9	SPAC ölçümlerine ilişkin her saha için ölçüm geometrileri	28
Şekil 10	HVSR veri işlem adımları	30
Şekil 11	MASW, ReMi ve SPAC yöntemlerinden her saha için elde edilen dispersiyon eğrileri	34
Şekil 12	PS Logging ve yüzey dalgası spektral analiz ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	36
Şekil 13	Geçici süreli kurulan ivme istasyonlarının konumları	37
Şekil 14	Sırasıyla istasyon 1, istasyon 2 ve istasyon 3'te hesaplanan HVSR eğrileri ve tüm eğrilerin birlikte gösterimi	39
Şekil 15	Test sahası 1'de hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması	40
Şekil 16	Test sahası 2'de hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması	41
Şekil 17	Test sahası 3'de hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması	42
Şekil 18	Test sahası 4'te hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması	43
Şekil 19	Test sahaları için sırasıyla HVSR azimuth analizleri	45

<b>Şekil 20</b>	Zemin modeli, 1 ve 2B zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması	47
<b>Şekil 21</b>	Test sahası 4 için zemin modeli, 1 ve 2B zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması	48
<b>Şekil 22</b>	Test sahası 4 için zemin modeli, 1 ve 2B zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması	49
<b>Şekil 23</b>	$f_o-h$ eğrisi	51
<b>Şekil 24</b>	Farklı çalışmalarda elde edilen sediman kalınlığı–frekans ( $f_o-h$ ) ilişkileri ile bu çalışmanın modelinin karşılaştırılması	52
<b>Şekil 25</b>	Sondajların korelasyonu ile elde edilen basen modeli	53
<b>Şekil 26</b>	Üretilen ilişkisi ile elde edilen basen modeli	53

# BİRİNCİ BÖLÜM

## GİRİŞ

Yer kabuğunun sismik dalgalara verdiği tepkiler, yer bilimleri ve mühendislik çalışmaları açısından temel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Özellikle zemin koşullarının ve yerel jeolojik yapıların sismik dalga alanı üzerindeki etkileri, yapıların deprem davranışlarının doğru bir şekilde öngörülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Basen yapıları ise, genellikle alüvyal dolgulu vadiler ya da eski göl alanları gibi gevşek zemin birimleri ile sınırlanmış veya fay ile denetlenen, empedans farkının yüksek olduğu belirli bir derinlik ve geometrik yapıya sahip yer şekilleri olup, sismik dalgaların hapsolmesine, tekrarlı yansımaların oluşmasına, yer hareketinin büyütülmesine, şiddetlenmesine sebep olarak yer hareketinin değişimine neden olabilmektedir. Bu sebeple basenlerin varlığı, boyutları, geometrileri ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi, bu alanlarının deprem tehlikesi açısından değerlendirilmesinde önemli bir adımdır.

Basen yapılarında dalga yayılımını belirleyen fiziksel etkenler büyük oranda anlaşılabilir olsa da geometrik ve mekanik faktörlerinin nicel etkisinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi hala önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Birçok çalışma, sismik büyütme etkisinin yalnızca zemin türüne değil, aynı zamanda basen geometrisine, sınır koşullarına ve elastik zemin özelliklerinin derinlik boyunca değişimine doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Bard ve Bouchon, 1985; Chávez-García ve Faccioli, 2000; Ktenidou vd., 2015).

### 1.1. Problemin Tanımı

Yerel zemin koşullarının sismik dalga yayılımı üzerindeki etkileri, özellikle basen gibi derin, düşük hızlı ve heterojen yapılarda, yüzey hareketlerinin frekans içeriğini ve büyütme oranlarını değiştirebilmektedir. Alüvyon dolgulu vadiler, eski göl alanları ve tektonik kökenli çökeltilerle dolu basenler, genellikle düşük rijitlikleri ve düzensiz geometrik yapıları nedeniyle yüzey dalgalarının enerji birikimine, rezonans etkilerine ve dalga alanında kompleks yapısal modlara yol açmaktadır. Bu tür jeolojik yapıların neden olduğu yerel zemin etkileri, özellikle deprem yer hareketlerinin büyütülmesi ve süresinin uzaması

açısından ciddi bir risk faktörü oluşturmaktadır. Basen yapılarının geometrisi, derinliği ve empedans farklılığı gibi özellikleri yüzeyden doğrudan gözlemlenememekte, dolayısıyla güvenilir şekilde tanımlanmaları saha verilerine ve doğru modelleme yöntemlerine bağlıdır.

Basenlerinin geometrisinin, derinliğinin ve elastik özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesi çalışmalarında doğrudan veri sağlayan sondaj çalışmaları ve kuyu içi sismik ölçümler basen yapılarına ilişkin en güvenilir yerinde veri kaynakları arasında yer almaktadır. Bu çalışmalar; litolojik özellikler ve değişimler, geçilen birimlerin geoteknik parametrelerinin hem yerinde arazi deneyleri ile hemde numune alınarak laboratuvarda fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi imkanı sunar. Kuyu içi sismik ölçümler ise, kuyu boyunca alüvyal, gevşek sediman ve mühendislik kayası gibi farklı rijitliklere sahip birimlerin sınırlarının belirlenmesine olanak tanır. Pek çok çalışmada, basen yapılarını belirlemede kuyu içi sismik ölçümlerden elde edilen doğrudan verilerin, özellikle model kalibrasyonu ve doğrulaması açısından vazgeçilmez bir rol oynadığı vurgulanmıştır (Fäh vd., 2001; Ktenidou vd., 2015). Özellikle derin basenlerde sondaj ve kuyu içi sismik yöntemlerin en önemli sınırlaması maliyet, kuyunun açılması ve techiz edilmesindeki güçlüklerdir. Bu nedenle kuyular arası mesafeler fazla diğer bir deyişle sayıları yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte geniş alanlarda basen geometrisinin tespiti için yüzey dalgası yöntemleriyle entegre kullanımı önerilmektedir (Cadet vd., 2012; Molnar vd., 2018).

Basen geometrisinin belirlenmesi amacıyla yüzey dalgası spektral analiz yöntemleri gibi aktif ve pasif sismik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Socco vd., 2010; Foti vd. 2014). Bu yöntemler sayesinde elde edilen kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) profilleri, derinlik boyunca zemin özelliklerinin tanımlanmasına imkân tanır. Ancak bu profillerin doğruluğu, kullanılan veri setlerinin kalitesine, analiz parametrelerine ve ters çözüm yaklaşımlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Özellikle düşük frekans içeriğine duyarlı ölçümler ve çözümün derinliğe etkili bir şekilde yansıtılması hâlâ saha uygulamalarında önemli bir zorluk oluşturmaktadır.

Bir diğer problem ise elde edilen  $V_s$  profillerinin sismik dalga alanı üzerindeki etkisinin doğrudan test edilememesidir. Bu nedenle, özellikle yerel zemin koşullarının

sismik büyütme ve rezonans davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla zemin tepki analizleri kullanılmaktadır. Farklı derinliklerdeki zemin birimlerinin elastik özelliklerine ve sönüm oranlarına bağlı olarak hesaplanan transfer fonksiyonları aracılığıyla, basen yapılarının rezonans frekanslarını ve büyütme etkilerini modellemek için güvenilir bir yöntem sunmaktadır. Ancak bu analizlerin geçerliliği ve sahaya özgü doğruluğu, çoğunlukla saha ölçümleri ve deprem kayıtları ile sınırlanmaktadır. Deprem kayıtlarının kullanıldığı saha çalışmaları, zemin profilinden beklenen büyütme etkisi ile gerçek yer hareketleri arasındaki ilişkiyi doğrudan gözleme imkânı sunduğu için, zemin tepki analizlerinin doğrulanmasında temel referanslardan biri olarak kabul edilmektedir.

Basen araştırmalarında yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem ise Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) yöntemidir. Çevresel gürültü veya deprem kayıtları kullanılarak zeminlerin hâkim rezonans frekanslarının belirlenmesinde dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. HVSR yönteminin en temel avantajlarından biri, saha uygulamalarının kolay ve ekonomik olması, ayrıca geniş alanlarda kısa sürede ölçüm yapılabilmesidir (Fäh vd., 2001). Bu özellikleri sayesinde yöntem, hem akademik araştırmalarda hem de mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (SESAME, 2004). HVSR yöntemi zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının saha doğrulamasında ve diğer jeofizik yöntemlerle entegre kullanımında tamamlayıcı bir araç olarak öne çıkmaktadır (Cadet vd., 2012; Hobiger vd., 2012).

Bu nedenle literatürde, yüzey dalgası yöntemleri ve zemin tepki analizleri birlikte kullanılarak basen yapılarını belirleme çalışmalarına rastlanmakla birlikte, yöntemlerin sistematik, bütüncül ve karşılaştırmalı bir şekilde kullanılarak saha verileriyle test edildiği uygulamalar sınırlıdır. Özellikle aktif tektonik bölgelerde, derinliği ve geometrisi farklılık gösteren basen yapılarının detaylı şekilde tanımlanması ve rezonans etkilerinin güvenilir biçimde ortaya konulması, mevcut yöntemlerin bütüncül kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, sondaj ve kuyu içi deneyler, yüzey dalgası spektral analiz yöntemleri ile Vs profilleri, çevresel gürültü ve deprem kayıtları kullanılarak elde edilen HVSR eğrileri ve zemin tepki analizleri ile hesaplanan transfer fonksiyonlarının sonuçlarını karşılaştırılarak, basen yapılarının geometrisi ve sahaya özgü  $f_o-h$  arasındaki ilişkinin değerlendirilmesidir. Çalışmada, yüzey dalgası yöntemleri kullanılarak belirlenen zemin profilleri doğrultusunda yapılan sismik analiz sonuçlarının saha verileri ile ne ölçüde uyumlu olduğu irdelenmiş, yöntemlere özgü sınırlılıklar ve belirsizlikler tartışılmıştır.

Çalışma kapsamında aşağıdaki temel hedefler doğrultusunda ilerlenmiştir:

- Yüzey dalgası spektral analiz yöntemleri (MASW, ReMi SPAC.) kullanılarak Vs profillerinin elde edilmesi,
- Elde edilen Vs profillerine dayanarak zemin tepki analizleri ile saha koşullarına özgü transfer fonksiyonlarının hesaplanması,
- 1 ve 2 boyutlu zemin tepki analizleri ile hesaplanan transfer fonksiyonlarından elde edilen  $f_o$  değerlerinin, HVSR yöntemi ile elde edilen saha verileri ile karşılaştırılması,
- Yöntemlerin saha koşullarına özgü doğruluklarının, tutarlılıklarının ve sınırlılıklarının belirlenmesi,
- Basen geometrisi ve etkilerinin belirlenmesinde yöntemlerin bütüncül kullanımının değerlendirilmesi,
- Sahaya özgü  $f_o-h$  arasındaki ilişkisinin tanımlanması.

Çalışmanın odaklandığı saha, aktif tektonik rejime sahip, alüvyal basen yapısı ile karakterize edilen Çanakkale Merkez ilçesidir. Bu saha özellikleri, çalışmanın hem akademik hem de mühendislik uygulamaları açısından genellenebilir ve karşılaştırılabilir çıktılar üretmesini hedeflemektedir.

Bu tez çalışmasının sonuçları, basen yapılarına sahip sahalarda kullanılan sismik veri toplama ve analiz yöntemlerinin etkinliği ile sınırlarını ortaya koyarak, yerel zemin koşullarının ve etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar ve sismik tehlike analizleri açısından literatüre katkı sunmayı hedeflemektedir.



## İKİNCİ BÖLÜM

### KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yerel zemin koşullarının sismik dalga yayılımı üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, deprem mühendisliği ve sismik tehlike analizlerinin en kritik aşamalarından biridir. Zemin–yapı etkileşimi, özellikle sedimanter havzalarda ve heterojen jeolojik ortamlarda belirginleşmekte; bu durum, hem deprem büyütme etkilerinin hem de rezonans davranışlarının sahaya özgü olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Mucciarelli ve Gallipoli, 2001; Bard ve Bouchon, 1985). Son yıllarda, Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) yöntemi ve yüzey dalgası analizleri (MASW, SPAC, ReMi) saha verilerinden doğrudan yararlanarak zemin profillerinin belirlenmesinde ve hakim frekansların haritalanmasında etkin araçlar haline gelmiştir (Hallal ve Cox, 2021a; Chatzis vd., 2022; Maghami vd., 2021). Bu yöntemlerin birlikte veya ayrı kullanımı, hem sığ hem de derin tabaka özelliklerinin ortaya konmasını sağlamakta; zemin tepki analizleriyle birleştirildiklerinde ise mühendislik tasarımlarına doğrudan katkı sunmaktadır (Wang vd., 2023; Saadi vd., 2023).

Bu bölümde, HVSR ve yüzey dalgası yöntemlerinin kuramsal temelleri, farklı veri kaynaklarıyla kullanım biçimleri, derinlik duyarlılıkları, basen geometrisinin belirlenmesindeki rolleri, çoklu yöntem kombinasyonlarının katkıları, zemin tepki analizleriyle bütünleşmiş uygulamaları ve hakim frekans–kaya derinliği ilişkisi literatürden örneklerle incelenecektir.

#### 2.1. Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi ile Basen Geometrisinin Belirlenmesi

Yüzey dalgalarının spektral analizi, sedimanter havzaların geometrisinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan jeofizik yöntemlerden biridir. Yöntem, Rayleigh ve Love dalgalarının farklı frekanslardaki faz hızlarının ölçülmesi ve bu verilerin ters çözüm teknikleriyle kesme dalgası  $V_s$  profillerine dönüştürülmesine dayanır (Park vd., 1999). Rayleigh dalgalarının dispersiyon özelliği, farklı dalga boylarının farklı derinliklerdeki

tabakalara duyarlı olması nedeniyle, farklı frekans aralıklarının ölçülmesi ile hem sığ hem de derin yapılar hakkında bilgi edinilmesini sağlar.

Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) yöntemi, aktif kaynak kullanarak 1–40 m arası sığ yapıların yüksek çözünürlükte modellenmesini mümkün kılar (Borges vd., 2016; Saadi vd., 2023). Mekansal Özilişki (SPAC) yöntemi, pasif kaynaklı çoklu istasyon dizilimleri ile kilometre ölçeğinde derin yapıların belirlenmesinde etkilidir (Maghami vd., 2021; Chatzis vd., 2022). Kırılma Mikrotremörü (ReMi) yöntemi ise pasif gürültü kayıtlarını kullanarak geniş alanlarda orta derinlikli tabaka yapılarını belirlemede avantaj sağlar (Cheng vd., 2020). Bu yöntemler, elde ettikleri dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile Vs profilleri üretir ve sediman–anakaya sınırının derinliği, anakaya eğimi ve süreksizlikleri hakkında yüksek doğrulukta bilgi sunar (Comina vd., 2023).

Basen geometrisinin belirlenmesinde spektral analiz yöntemlerinin en önemli avantajı, farklı frekans aralıklarından elde edilen hız bilgilerini derinlik duyarlılığı açısından birleştirebilmesidir. Düşük frekanslı (uzun dalga boylu) yüzey dalgaları derin tabakalara, yüksek frekanslı (kısa dalga boylu) dalgalar ise yüzeye yakın tabakalara karşı duyarlıdır. Bu sayede, farklı yöntemlerin birlikte uygulanmasıyla hem sığ hem de derin yapı aynı model içerisinde temsil edilebilir (Chatzis vd., 2022; Comina vd., 2023).

Bard ve Bouchon (1985) sayısal modelleme çalışmalarıyla basen kenarlarında sismik dalgaların odaklanma ve büyütme etkilerini ortaya koymuş; rezonans etkisinin frekans–mekân dağılımının basen geometrisini doğrudan yansıttığını göstermiştir. Hallal ve Cox (2021) ise geniş alan yüzey dalgası ölçümlerini tek bir sondaj verisiyle entegre ederek pseudo-3D basen modeli oluşturmuş ve modelin doğruluğunu HVSR ve zemin tepki analizleri ile test etmiştir. Maghami vd. (2021) çalışmasında ise SPAC ve HVSR verilerini birlikte kullanarak sediman kalınlığını yüksek doğrulukla belirlemiş, teorik–gözlemsel rezonans frekanslarını karşılaştırarak model doğrulaması yapmıştır.

Bu bağlamda, yüzey dalgalarının spektral analizi yalnızca tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde değil, aynı zamanda sismik tehlike değerlendirmeleri için kritik

parametrelerin (hakim frekans, büyütme faktörü, zemin sınıfı vb.) elde edilmesinde de önemli bir araçtır. Özellikle karmaşık basen kenar geometrilerinin modellenmesinde, spektral analiz yöntemlerinin HVSR ile birlikte kullanılması, modelin hem derinlik hem de yatay doğruluğunu artırmakta ve mühendislik tasarımına güvenilir veri sağlamaktadır (Comina vd., 2023; Saadi vd., 2023).

## 2.2. Spektral Oran Yöntemlerinin Kullanımı

Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) yöntemi, Nakamura (1989) tarafından geliştirilen ve hem çevresel gürültü (mikrotremor) hem de deprem kayıtlarının değerlendirilmesinde kullanılan, uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle geniş kabul görmüş bir tekniktir. Yöntem, kayıtların yatay bileşenlerinin (N-S, E-W) genlik spektrumlarının karelerinin toplamının karekökünün, düşey bileşenin genlik spektrumuna oranlanması ile elde edilir. Bu spektral oran, genellikle zemin-anakaya empedans kontrastına bağlı olarak belirgin bir tepe gösterir. Bu tepe frekansı ile sediman kalınlığı arasındaki ilişki çoğu durumda şu basit formülle ifade edilir (Ibs-von Seht ve Wohlenberg, 1999; Delgado vd., 2000a):

$$h = af_o^b \quad (1.1)$$

Sediman kalınlığının bu ilişki ile araştırmacılar tarafından tanımlanmış olan literatür özeti Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1.

*f<sub>o</sub>-h* ilişkisinin literatür derlemesi

Referans	İncelenen Basen	<i>a</i>	<i>b</i>
Ibs-von Seht ve Wohlenberg (1999)	Batı aşağı ren ovası (Almanya)	96	-1.38

Tablo 1. Devamı

Delgado vd. (2000a)	Segura Nehir Vadisi (Güneydoğu İspanya)	55.11	-1.256
Delgado vd. (2000b)	Bajo Segura Havzası (Güneydoğu İspanya)	55.64	-1.268
Parolai vd. (2002)	Köln (Almanya)	108	-1.551
Hinzen vd. (2004)	Aşağı Ren Ovası (Almanya)	137	-1.19
Garcia-Jerez vd. (2006)	Zafarraya Havzası (İspanya)	194.6	-1.14
Motamedi vd. (2007)	Bam (İran)	135.19	-1.979
D'Amico vd. (2008)	Floransa Havzası (İtalya)	140	-1.172
Birgören vd. (2009)	Güney İstanbul (Türkiye)	150.99	-1.153
Dinesh vd. (2010)	Bangalore, Hindistan	58.30	-0.952
Gosar and Lenart (2010)	Ljubljana Havzası (Slovenya)	105.53	-1.25
Özalaybey vd. (2011)	İzmit Körfezi (Türkiye)	141	-1.27
Sukumaran vd. (2011)	Narmada Vadisi (Batı Hindistan)	102.1	-1.47
Poggi vd. (2012)	Luzern, İsviçre	158.54	-2.45
Del'Monaco vd. (2013)	L'Aquila, merkez (İtalya)	53.461	-1.01
Fairchild vd. (2013)	Cape Cod, Massachusetts (ABD)	90.53	-1
Harutoonian vd. (2013)	Batı Sidney (Avustralya)	73	-1.17
Paudyal vd. (2013)	Katmandu ve Himalaya Bölgesi (Nepal)	146.01	-1.2079
Pugin vd. (2013)	Ottawa, Kanada	64.98	-1.198
Mendecki vd. (2014)	Yukarı Silezya Kömür Havzası (Polonya)	59.626	-1.68
Bisvas vd. (2015)	Shillong, (Kuzeydoğu Hindistan)	160.94	-1.459
Khan ve Khan (2016)	İslamabad (Pakistan)	134.06	-1.23
Maresca ve Berrino (2016)	Volturara Irpina, (İtalya)	129	-1.38
Tün vd. (2016)	Eskişehir Havzası (Türkiye)	136	-1.357
Sant vd. (2017)	Batı Hindistan	110.18	-1.97
Joshi vd. (2018)	Aravalli (Hindistan)	56.8	-1

Tablo 1. Devamı

Liang vd. (2018)	İnci Nehri Deltası (Çin)	55	-1.02
Molnar vd. (2018)	Ottawa (Kanada)	64.98	-1.198
Anbazhagan vd. (2019)	Hint-Gang Düzlüğü (Hindistan)	137.88	-1.174
Mascandola vd. (2019)	Po Ovası (İtalya)	98	-1.17
Moon vd. (2019)	Singapur	92.5	-1.06
Thabet (2019)	Japonya	117.13	-1.197
Rupar ve Gosar (2020)	Ljubljana Bataklık Havzası (Slovenya)	202.97	-1.139
Büyüksaraç vd. (2021)	Çanakkale (Türkiye)	101	-0.988
Maghami vd. (2021)	Kum Havzası (İran)	96.17	-1.01
Büyüksaraç vd. (2023)	Hatay (Türkiye)	86,176	-1.063

HVSR uygulamaları, geniş alanlarda hızlı veri toplama imkânı sunarak yüzlerce noktanın rezonans frekans haritalarının çıkarılmasına olanak tanır (Cipta vd., 2018; Badreldin vd., 2023). eHVSR ise gerçek deprem dalgalarının neden olduğu yerel büyütme özelliklerini doğrudan yansıtarak mühendislik tasarımı açısından kritik bilgi sağlar (Maghami vd., 2021; Hallal vd., 2023).

Basen geometrisinin belirlenmesinde HVSR'nin en büyük katkısı, yatayda ölçülen  $f_0$  dağılımı sayesinde anakaya derinliğinin ve basen kenar eğimlerinin haritalanabilmesidir (Bard ve Bouchon, 1985; Agostini vd., 2015). Hallal ve Cox (2021b), tek bir derin sondajdan elde ettikleri Vs profili ile yüzlerce HVSR ölçümünü entegre ederek pseudo-3D basen modeli oluşturmuş, modeli zemin tepki analizleri ve deprem kayıtları ile karşılaştırarak yüksek uyum elde etmiştir.

Büyüksaraç vd. (2021), Çanakkale şehir merkezi için MASW ve HVSR ölçümlerine dayalı geliştirdikleri sediman kalınlığı bağıntısını önermiş, havzadaki sediman kalınlığı ile mühendislik kayası arasındaki ilişkiyi tanımlamışlardır. Büyüksaraç (2023)'te ise basen

modelini tek istasyon verilerinden elde edilen Rayleigh dalgası elliptikliği ile hesaplanan Vs hızları ve mikrogravite ölçülerinden belirlenen geometri ile karşılaştırmışlardır.

HVSR verilerinin yüzey dalgası yöntemleri ile birlikte değerlendirilmesi, yöntemin derinlik çözünürlüğü konusundaki sınırlılıklarını ortadan kaldırır. Örneğin, Chatzis vd. (2022) ve Comina vd. (2023), MASW, SPAC ve HVSR yöntemlerini entegre ederek hem sığ hem de derin tabaka özelliklerini içeren kesintisiz modelleri üretmiş, teorik ve gözlemsel rezonans frekanslarının yüksek korelasyon gösterdiğini rapor etmiştir. Bu tür bütünleşik yaklaşımlar, basen geometrisinin daha güvenilir şekilde modellenmesini ve deprem tehlike analizlerinin doğruluğunu artırmaktadır.

Zemin tepki analizleri, sahadan elde edilen jeofizik verilerin mühendislik uygulamalarına entegrasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Bu analizlerde amaç, belirli bir zemin profilinin deprem dalgalarına karşı dinamik davranışını belirlemek ve yüzeyde oluşacak ivme, hız veya deplasman spektrumlarını öngörmektir (Kramer, 1996). HVSR ve yüzey dalgası yöntemlerinden (MASW, SPAC, ReMi) elde edilen Vs profilleri, bu analizlerin en önemli girdilerini oluşturur.

1D zemin tepki analizleri, genellikle transfer fonksiyonu hesaplamaları yoluyla sahada ölçülen spektral büyütmelemlerle karşılaştırılır. Teorik transfer fonksiyonu, katmanlı ortam modellerinde dalga yayılım denklemlerinin çözümü ile elde edilir ve rezonans frekanslarının hem HVSR hem de deprem kayıtlarından hesaplanan değerlerle tutarlılığı, model doğruluğunun en önemli göstergelerindedir (Fäh vd., 2001; Stewart vd., 2014).

Hallal ve Cox (2021) çalışmasında, HVSR ölçümlerinden türetilen rezonans frekansları ile yüzey dalgası yöntemlerinden elde edilen Vs profillerine dayalı 1D zemin tepki analizleri karşılaştırılmış, iki veri seti arasında yüksek korelasyon tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Maghami vd. (2021) SPAC ve HVSR verilerini entegre ederek oluşturduğu Vs modelleri ile teorik transfer fonksiyonlarını hesaplamış, saha ölçümleriyle yüksek uyum elde etmiştir. Bu tür karşılaştırmalı çalışmalar, hem deneysel hem de teorik yaklaşımların doğruluğunu test etmenin yanı sıra, model belirsizliklerini azaltma açısından da önemlidir (Comina vd., 2023). Özellikle karmaşık basen kenar geometrilerinde, yalnızca 1D değil,

2D/3D sayısal modellemeler de kullanılmakta; bu modellerde sahadan elde edilen Vs profilleri ve empedans kontrast bilgileri girdi olarak kullanılmaktadır (Bard ve Bouchon, 1985; Chavez-Garca ve Faccioli, 2000).

Pratik mühendislik uygulamalarında, zemin tepki analizleri ile HVSR ve yüzey dalgası verilerinin birlikte kullanılması, deprem tehlike analizlerinde daha güvenilir yerel büyütme tahminleri yapılmasını sağlar. Boyelece, yerel zemin koşullarına uygun yapı tasarım parametreleri belirlenebilir ve deprem riskinin azaltılması yönünde önemli bir adım atılmış olur (Stewart vd., 2014; Ktenidou vd., 2015).



## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmanın gerçekleştirildiği saha üzerinde uygulanan veri toplama süreçleri ile kullanılan analiz yöntemleri sistematik bir şekilde sunulmaktadır. Basen geometrisinin ve yerel zemin koşullarının sismik dalga yayılımı üzerindeki etkilerinin güvenilir biçimde belirlenebilmesi için yöntemler bütünleşik olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, yer altı stratigrafisinin karakterizasyonu için sondaj ve kuyu içi sismik ölçümler, yakın yüzeyden düşük frekanslara kadar elastik özelliklerin belirlenmesi için yüzey dalgası spektral analiz yöntemleri, saha hakim frekanslarının belirlenmesi için HVSR analizleri, ve zeminlerin sismik tepkisini modellemek amacıyla zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk adımında, jeolojik saha tanımı yapılmış ve bölgedeki litolojik birimlerin yayılım alanları ve sınır ilişkileri tanımlanmıştır. Jeolojik birimlerin litolojik özelliklerinin ortaya konulması amacıyla sondajlar gerçekleştirilmiş, bu sondajlardan alınan zemin örnekleri aracılığıyla mühendislik sınıflamaları yapılmıştır. Sondajlarla birlikte uygulanan PS Logging yöntemi ile, geçilen birimlerin Vs'leri derinlik boyunca doğrudan elde edilmiştir. Bu yöntem, yüzey dalgası temelli dolaylı yöntemlerle elde edilen hız profillerinin kalibrasyonu açısından önemli bir referans sağlamaktadır (Foti vd., 2014; Ktenidou vd., 2015).

Sismik büyütme etkilerinin ve rezonans frekanslarının belirlenmesinde kullanılmak üzere, çalışma sahasına yakın konumlara ivmeölçer istasyonları kurularak depremler sırasında yüzey hareketlerinin kaydedilmesi sağlanmıştır. Bu kayıtlar, daha sonra hem eHVSR analizleri hem de zemin tepki analizleri için temel veri setini oluşturmuştur.

Zeminlerin kayma dalgası hız profillerinin belirlenmesi amacıyla, farklı ölçüm düzenekleriyle çok kanallı yüzey dalgası analizi (MASW), kırılma mikrotremörü (ReMi) ve mekânsal özilişki (SPAC) yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemlerin her biri, farklı frekans aralıklarında duyarlılık gösterdiğinden, elde edilen Vs profilleri derinlik boyunca daha geniş bir çözünürlük sağlamaktadır (Xia vd., 1999; Asten, 2006; Okada, 2003). Yüzey dalgalarının

dispersiyon eğrileri ters çözümü ile, elastik parametrelerin derinlik ile değişimi modellenmiştir.

Yer altı yapıların hakim frekanslarını belirlemek amacıyla HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) yöntemi hem çevresel gürültü (mHVSR) hem de deprem kayıtları (eHVSR) üzerinden uygulanmıştır. Bu sayede hem düşük enerjili mikrotremor sinyallerinden hem de gerçek deprem kaynaklı yer hareketlerinden yararlanılarak, rezonans frekanslarının güvenilirliği artırılmıştır.

Son olarak, elde edilen Vs profillerine dayalı olarak 1-B visko elastik zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiş ve transfer fonksiyonları hesaplanmıştır. Analizlerde, kayma dalgası hızları, yoğunluk ve sönüm oranları gibi parametreler dikkate alınmış; deprem kayıtları zemin profili boyunca geçirgen kabul edilerek yüzey tepkileri modellenmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonları, HVSR analiz sonuçları ile karşılaştırılarak rezonans frekanslarının doğruluğu ve basen etkisinin büyütme üzerindeki katkısı değerlendirilmiştir (Kramer, 1996; Cadet vd., 2012).

Bu çok yöntemli yaklaşım, saha verilerinin çok boyutlu analizine ve farklı ölçekteki büyütme etkilerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Böylece, hem basen derinliğinin ve geometrisinin belirlenmesinde hem de yerel zemin koşullarına bağlı rezonans etkilerinin modellenmesinde güvenilir ve bütüncül sonuçlar elde edilmiştir

### **3.1. Çalışma Sahası ve Jeolojisi**

Çalışma alanı, Neojen yaşlı çökeller, volkanik kayalar ve güncel alüvyonların bir arada gözlendiği karmaşık bir jeolojik yapıya sahiptir. İnceleme alanında yüzeyleyen, bölgesel stratigrafide önemli yer tutan Gazhanedere, Kirazlı ve Alçıtepe Formasyonları ile birlikte Atikhisar Volkanitleri ve Şahinli Formasyonu çalışma alanının temel jeolojik yapısını oluşturmaktadır. Ayrıca, Sarıçay etkisiyle şekillenmiş ve geniş alanlara yayılmış tutturulmamış alüvyon birimleri de bu araldanmanın en genç çökellerini temsil etmekte (Şekil 1) ve basen yapısını oluşturmaktadır.

Çalışma alanında geniş yayılım gösteren güncel alüvyonlar, Sarıçay'ın taşıdığı tutturulmamış sedimanlardan oluşmaktadır. Alüvyon birimleri; kum–killi kum, siltli kum–kil mercekli sedimanlar ile blok–çakıl ve kum karışımlarından oluşan taşkın ovası birimlerini içermektedir. Bu genç birimler, özellikle Sarıçay'ın eski ve yeni yatakları boyunca birikmiş, zayıf mühendislik özelliklerine sahip heterojen tabakalanmalar sunmaktadır (Şentürk ve Karaköse, 1987).

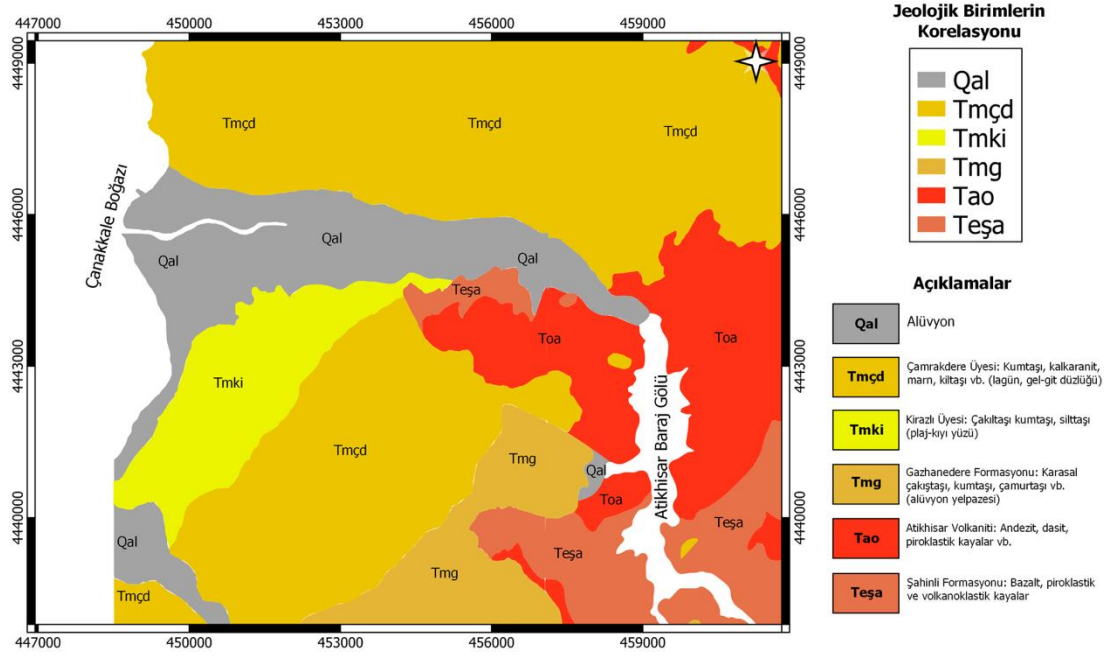
Gazhanedere Formasyonu, başlıca çamurtaşı, kumtaşı ve çamur destekli, gevşek çimentolanmış çakıltaşlarından meydana gelmektedir. Serpantinit, andezit, dasit, riyodasit gibi kayalardan türemiş polijenik çakıl bileşenleri içeren formasyon, alüvyon yelpazesi ortamında çökelmiş olup, çökme fasiyesleri ve tabakalanma özellikleri örgülü akarsu sistemlerine işaret etmektedir (Saltık, 1974; Sümengen vd., 1987; Atabey vd., 2004). Formasyon, yer yer heyelanlara duyarlılık gösteren kil ve silt açısından zengin ince taneli seviyeler de içermektedir.

Kirazlı Formasyonu, daha çok kumtaşı, çakıllı kumtaşı ve silttaşlarından oluşmakta olup, genellikle kıyı yakın ortamlarında çökelmiş, zayıf çimentolanmış sarımsı boz renkli kumtaşları ile karakterizedir. Paralel ve çapraz tabakalanmalar, ondülasyonlu tabaka yüzeyleri ve çakıl dolgu kanalları birimin yüksek enerjili kıyı sistemlerinde oluştuğuna işaret etmektedir. Birim, bölgedeki stratigrafik dizilimde Gazhanedere formasyonu üzerinde, Alçıtepe formasyonu altında konumlanır (Saltık, 1974; Şentürk ve Karaköse, 1987; Siyako, 2006).

Atikhisar Volkanitleri, andezit, dasit ve yer yer riyodasit bileşimli lav akıntıları ile birlikte tüf, aglomera ve lav breşleri gibi piroklastik kayalardan oluşur. Neojen yaşlı bu volkanitler, bölgesel yayılım göstermekte olup yüksek dayanımlı zemin davranışı sergiler. Geoteknik açıdan rijit, sismik dalga yayılımına elverişli birimlerdir (Atabey vd., 2004; Siyako, 2006).

Şahinli Formasyonu, bazalt lavları, piroklastik tüfler ve volkanoklastik konglomeralar gibi lav ve kırıntılı volkanik ürünleri içeren birimdir. Genellikle volkanik

aktiviteye bağılı olarak oluşmuş, ayrışma derecesi değişken, heterojen yapılı seviyelerden meydana gelir. bazalt seviyeleri yer yer yüksek dayanım gösterse de, alterasyon zonlarında mevcuttur.

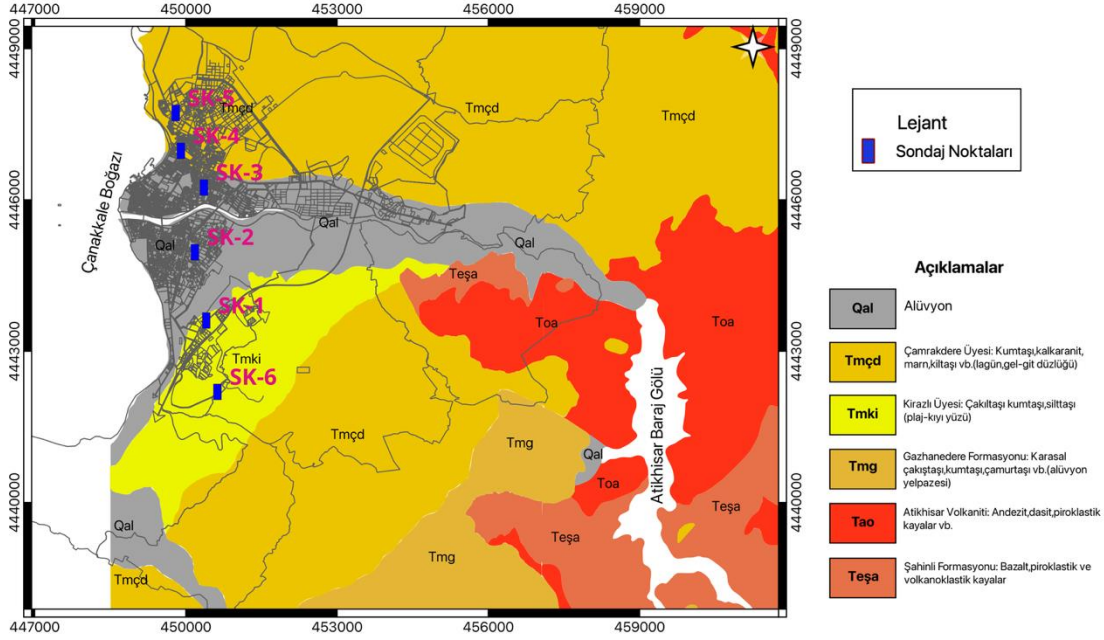


Şekil 1. Çalışma alanı jeolojisi

Kaynak: Ilgar vd., 2008'den değiştirilerek

### 3.2. Sondaj ve Kuyu İçi Deneyler

Çalışma alanındaki zemin yapısının belirlenmesi, stratigrafik araldanmanın ortaya konulması ve jeofizik verilerin kalibrasyonu amacıyla Şekil-2'de gösterilen lokasyonlarda 6 adet sondaj yapılmış, sondajlara ait bilgiler Tablo-2'de verilmiştir. Her sondaj kuyusu içerisinde ayrı ayrı PS Logging ölçümleri alınmış, bu yöntemlerle, hem litolojik sınıflamaların doğruluğunu sağlamak hem de zeminlerin dinamik davranış parametrelerinin doğrudan elde edilmesi amaçlanmıştır. Sondaj çalışmaları, zemin profilinin düşey yöndeki değişimini ayrıntılı olarak belirlemek ve laboratuvar deneylerine temel teşkil edecek karot numunelerinin elde edilmesini sağlamak amacıyla yürütülmüştür. Ayrıca, stratigrafik sınırların ve litolojik geçişlerin gözlemlenmesi sayesinde jeolojik model desteklenmiştir.



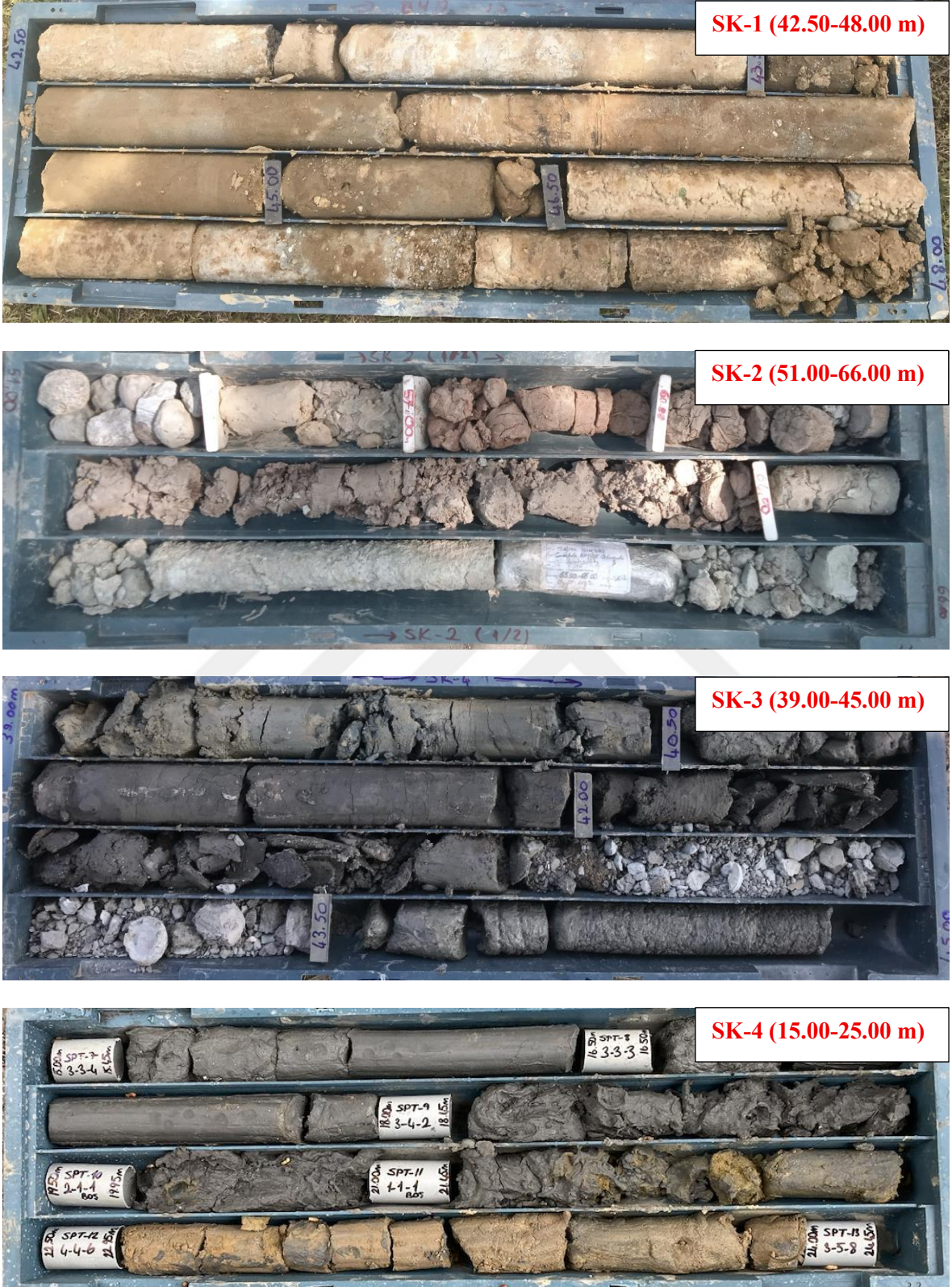
Şekil 2. Çalışma alanındaki test sahalarının konumları

Tablo 2.

Sondajlara ait bilgiler

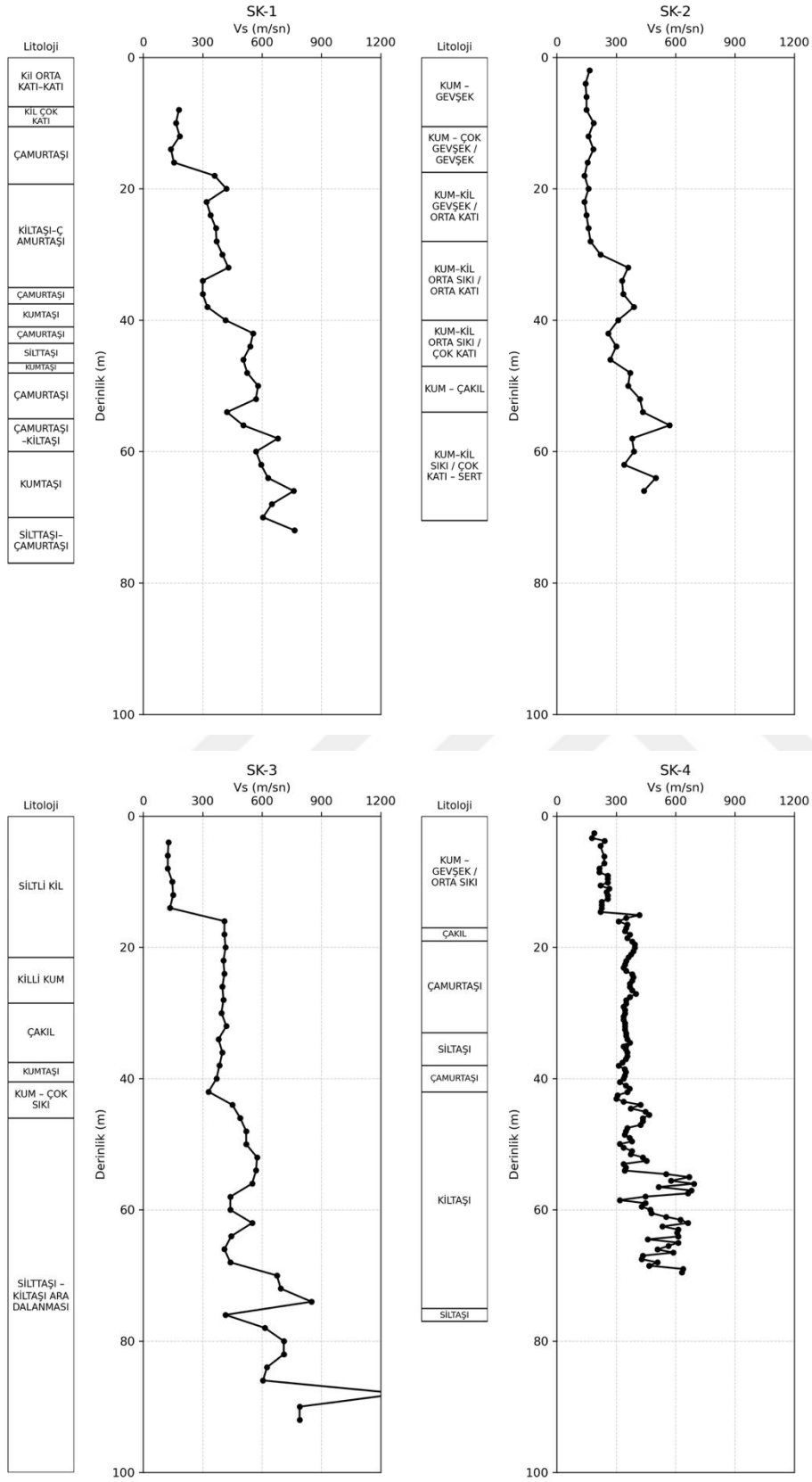
Sondaj No	Koordinat (x)	Koordinat (y)	Kot (m)	Derinlik (m)
SK-1	450482	4443609	15	77
SK-2	450256	4444962	9	70,5
SK-3	450439	4446242	9	103
SK-4	449980	4446972	12	77
SK-5	449876	4447722	128	50
SK-6	450704	4442193	53	65

Sondaj lokasyonları; baseni kuzey-güney yönde kesecek şekilde, basen ortasında, kenarlarında ve kapandığı bölgelerde olacak şekilde belirlenmiştir. Sondaj kuyularından alınmış olan zemin numeleri Şekil 3'te verilmiştir.

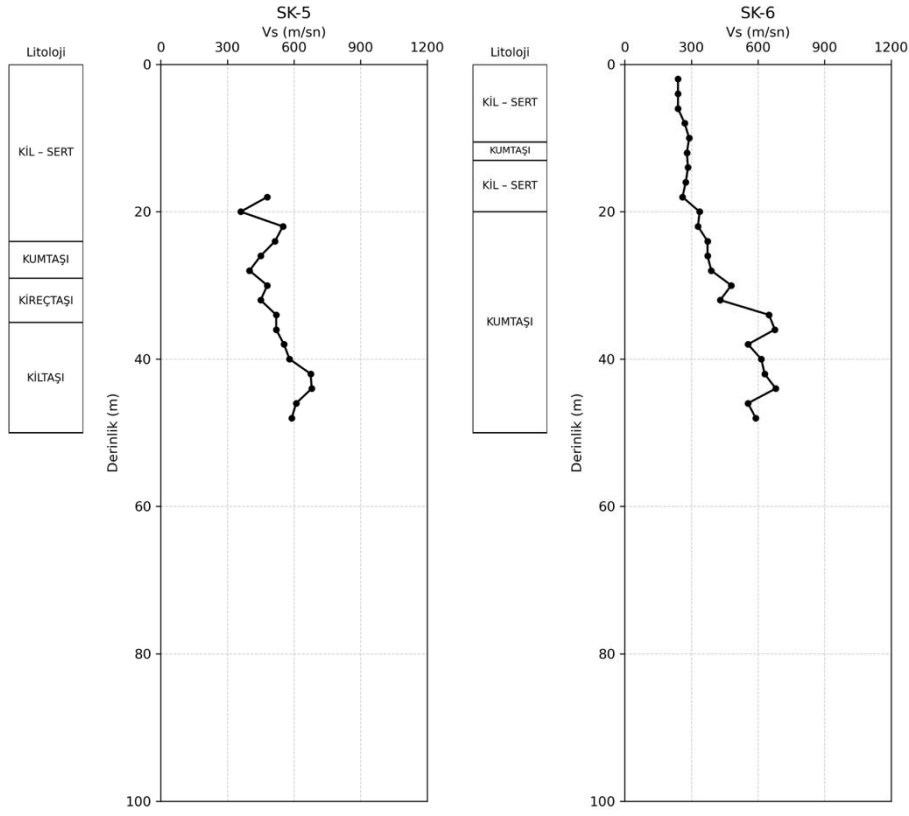


Şekil 3. Sondaj kuyularından elde edilen numuneler

Açılmış olan her sondaj kuyusunda PS-Logging ölçümleri gerçekleştirilmiştir. PS-Logging ölçümü ilk olarak 1970'lerde derin kuyularda Vs'nin ölçülebilmesi amacıyla aşağı kuyu (Downhole) ve yukarı kuyu (uphole) ölçümlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yöntem Japonyada OYO Corporation araştırmacıları tarafından kullanılmış ve 1980'ler de Japonyada kabul göremesiyle yaygınlaşmıştır (Kaneko vd., 1990). Yöntemde Vp ve Vs alıcıları ve kaynak aynı prob üzerinde yer almaktadır. Bu nedenle alıcı ve verisi arasındaki mesafenin sürekli olarak sabit kalması sağlanmaktadır. Prob üzerinde iki adet yakın, iki adet uzak yatay bileşenli ve bir adet düşey bileşenli hidrofona bulunur. Yakın ve uzak yatay bileşen çiftleri dalganın polarizasyonunun belirlenmesi için kullanılır ve Vs çiftli alıcılar arasındaki geliş zamanı farkı ile hesaplanır. PS Logging yönteminin uygulanabilmesi için tek kuyunun yeterli olması, kaynağın prob üzerinde olması sebebiyle derin kuyu ölçümlerinde kullanılabilmesi, aynı anda Vp ve Vs'in ölçülebilmesi, kuyu civadının muhafaza edilebilmesiyle hem zemin hemde kaya ortamlarında uygulanabilmesi avantajları arasındadır. Her kuyu için elde edilmiş olan Vs profilleri ise Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. PS Logging ölçüm sonuçları ve sondaj logları



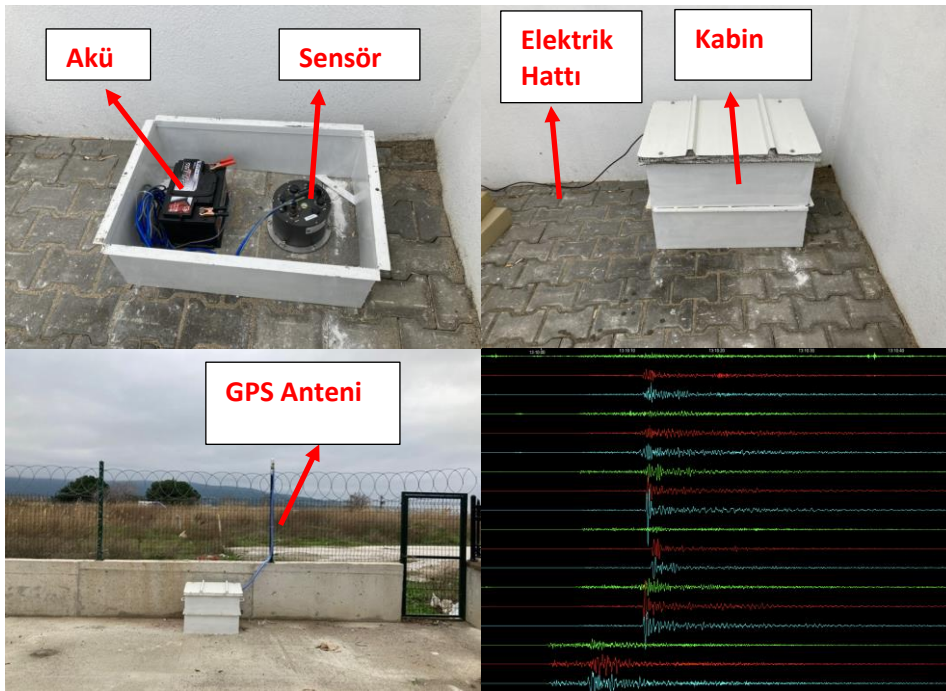
Şekil 4. Devamı

### 3.3. İvme Kayıt İstasyonlarının Kurulumu

Çalışma kapsamında, zeminlerin dinamik özelliklerinin ve yerel zemin etkilerinin belirlenmesi amacıyla ivmeölçerler kullanılarak deprem kayıt istasyonları kurulmuştur. Bu istasyonlar, özellikle eHVSAR analizlerinde ve zemin tepki analizlerinin doğrulanmasında kullanılacak deprem verilerinin elde edilmesini hedeflemiştir.

İstasyon konumları, çalışmanın jeolojik çeşitliliğini temsil edecek şekilde, farklı birimleri içeren alanlar üzerinde seçilmiştir. Yer seçiminde, jeolojik heterojenlik, yüzey jeomorfolojisi, yerleşimden uzaklık ve altyapı uygunluğu gibi faktörler dikkate alınmış; kayıt kalitesini bozabilecek titreşim ve gürültü kaynaklarından uzak, uygun zemin koşullarına sahip alanlar tercih edilmiştir. Nihai olarak her istasyonda zemin özelliklerinin belirlenmesine yönelik sondaj, kuyu içi ve jeofizik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kurulum çalışmaları ve istasyonlara ait görseller Şekil 5’de verilmiştir. Kurulan istasyonlarda, üç

bileşenli ivmeölçer sensörleri ile birlikte yüksek çözünürlüklü veri kayıt sistemleri kullanılmış; veri örnekleme hızı genellikle 100 Hz seçilmiştir. İstasyonlar aracılığıyla elde edilen yerel zemin hareketi kayıtları, hem eHVSR analizlerinin gerçekleştirilmesinde hem de transfer fonksiyonlarının gözlemsel olarak test edilmesinde kritik rol oynamıştır. Ayrıca, kaydedilen deprem verileri, ilgili zemin profillerinde meydana gelen gerçek saha tepkisinin modellenmesine olanak sağlayarak, teorik analizlerle karşılaştırmalı değerlendirme yapılmasına olanak tanımıştır (Nakamura, 1989; Cadet vd., 2012).



Şekil 5. İvme istasyonlarının kurulumu

### 3.4. Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi Yöntemleri

Zeminlerin kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) profillerinin belirlenmesi, mühendislik jeolojisi, mühendislik sismolojisi, geoteknik ve deprem mühendisliği uygulamalarında zemin sınıflandırması, zemin büyütmesi ve zemin davranışının modellenmesi açısından temel parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Yüzey dalgalarının dispersif doğasından yararlanan yöntemler, elastik ortamda farklı frekanslara sahip dalgaların farklı derinliklerde yayılması esasına dayanır. Bu nedenle, dispersiyon analizi yapılarak frekansa bağlı faz

hızlarının elde edilmesi ve bu verilerin ters çözüm teknikleriyle kayma dalgası hız profiline dönüştürülmesi mümkündür. Bu çalışmada, farklı derinlik aralıklarında ve ortam koşullarında uygulanabilen üç temel yüzey dalgası yöntemi tercih edilmiştir: (1) Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW), (2) Kırılma Mikrotremörü (ReMi) ve (3) Mekansal Özilişki (SPAC) yöntemi. Bu yöntemlerin her biri, farklı frekans ve derinlik aralıklarına duyarlıdır ve saha koşullarına göre birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılmıştır.

### 3.4.1. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) Yöntemi

MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), aktif kaynak kullanılarak oluşturulan Rayleigh tipi yüzey dalgalarının çoklu alıcılar üzerinden kaydedilmesiyle yüzey dalgası dispersiyon eğrilerinin elde edilmesine ve buradan Vs-z (derinlik) profilinin hesaplanmasına olanak sağlayan bir yöntemdir (Park vd., 1999). Yöntemde, bir dizi alıcı (genellikle 12–48 kanal arası) belirli aralık ile dizilerek, balyoz, ağırlık düşürme veya patlayıcı gibi sismik enerji kaynaklarıyla üretilen yüzey dalgaları kaydedilir.

Kaydedilen zaman serileri  $u(x, t)$ , iki boyutlu Fourier dönüşümü ile frekans–dalga sayısı ( $f - k$ ) alanına dönüştürülür:

$$U(f, k) = \iint_{-\infty}^{\infty} u(x, t) e^{-i(2\pi ft - kx)} dx dt \quad (x, x) \quad (3.1)$$

Burada  $k$  dalga sayısını (rad/m) ve  $f$  frekansı (Hz) temsil eder. Faz hızı  $c$ ;

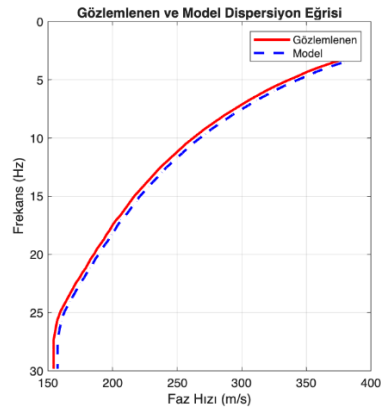
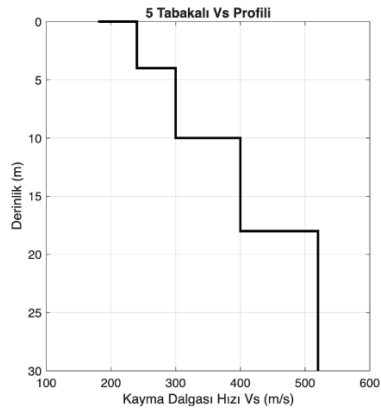
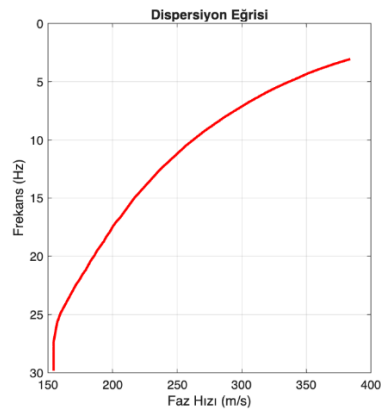
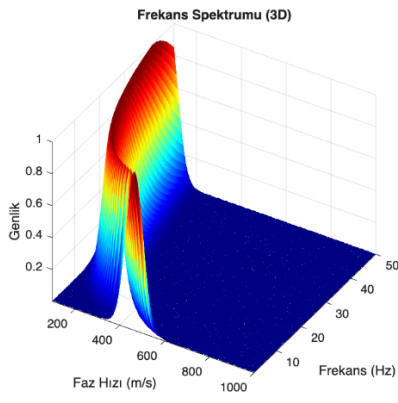
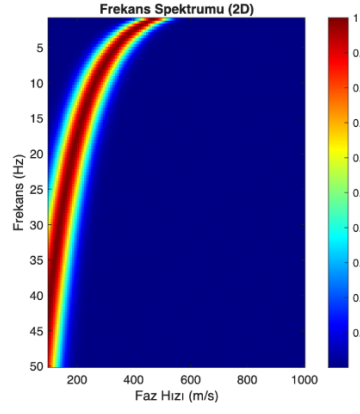
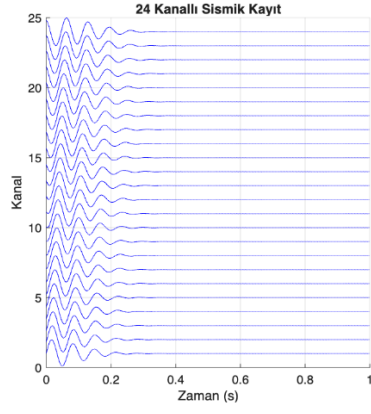
$$c = \frac{w}{k} = \frac{2\pi f}{k} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Böylece spektrumdan elde edilen enerji maksimumlarının oluşturduğu ( $f - c$ ) ilişkisi, dispersiyon eğrisini tanımlar.

Dispersiyon eğrileri, zemin tabakalarının düşey sürekliliğinin yorumlanmasına olanak tanır. Elde edilen temel mod ve varsa üst modlar, ters çözüm algoritmalarına (ör. en küçük kareler veya genetik algoritmalar) girdi olarak kullanılır. Ters çözüm süreci, gözlenen faz hızı değerleri  $c_{obs}(f_i)$  ile modelden hesaplanan faz hızı değerleri  $c_{mod}(f_i, m)$  arasındaki farkın minimizasyonuna dayanır:

$$\Phi(m) = \sum_{i=1}^N [c_{obs}(f_i) - c_{mod}(f_i, m)]^2 \quad (3.3)$$

Burada  $m$ ; tabaka kalınlıkları ve Vs model parametrelerini ifade eder. Fonksiyonun minimizasyonu ile en uygun Vs modeli elde edilir (Xia vd., 1999). MASW yönteminin işlem aşamaları yapay bir sismik kayıt üzerinde şematik olarak sırasıyla Şekil 6'de verilmiştir.



Şekil 6. MASW yönteminin veri işlem aşamaları

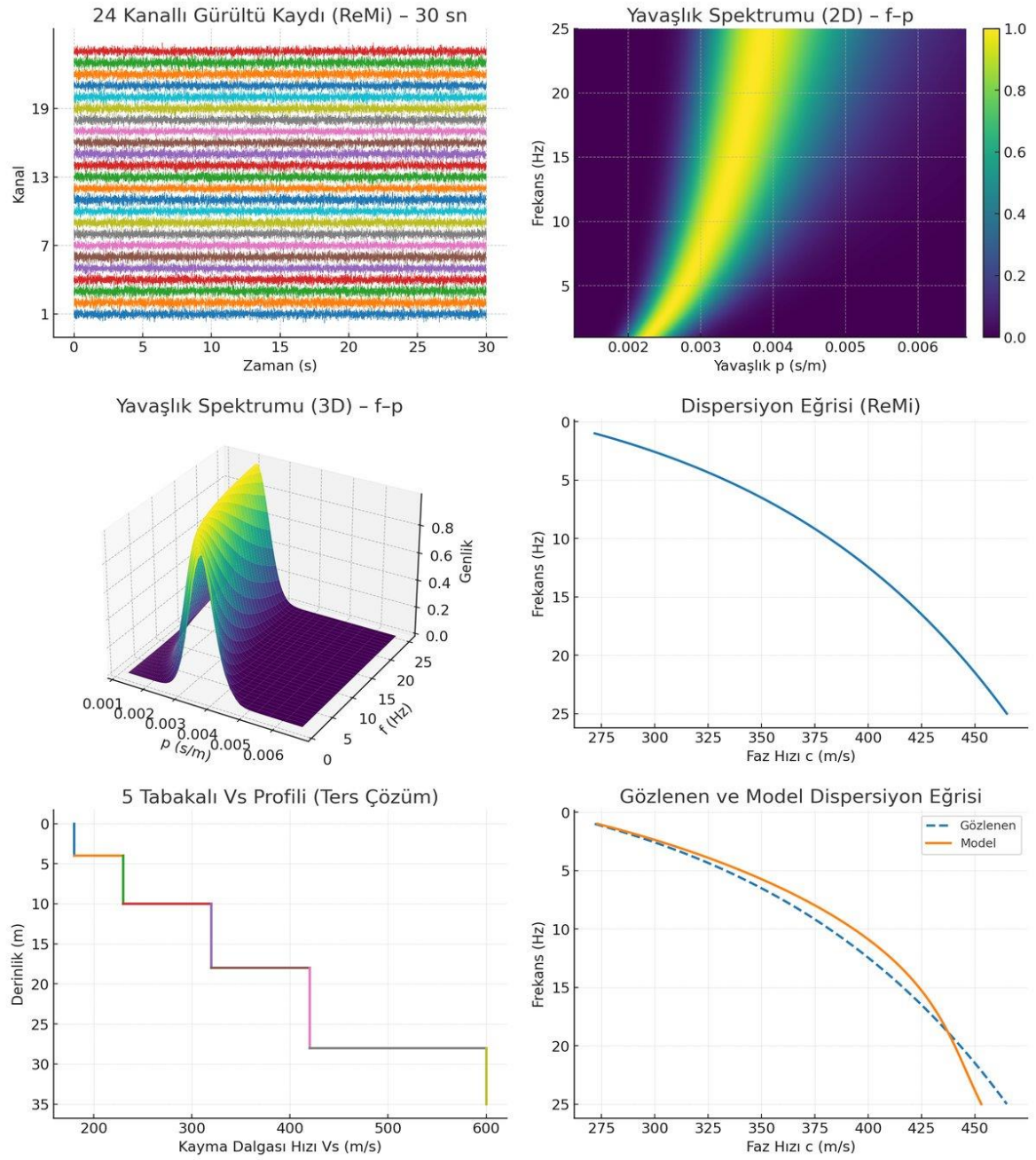
### 3.4.2. Kırılma Mikrotreörü (ReMi)

ReMi yöntemi, geleneksel dizilim kullanarak ve pasif çevresel gürültünün kaydedilmesiyle, yüzey dalgalarının ( $f - k$ ) spektrumunun elde edilmesine dayanır (Louie, 2001). Enerji yönlü olarak gelen rastlantısal gürültülerden yararlanır. Çevresel gürültü ve uzak kaynaklı dalga enerjisinden Rayleigh temel mod dispersiyonunun çıkarılmasına dayanır. Belirli bir dizilim ile kaydedilen sinyaller  $u(x, t)$ , frekans-yavaşlık ( $p - f$ ) parametresine dönüştürülür. Burada yavaşlık ( $p$ ), faz hızının ( $c$ ) tersidir. Her frekans için en yüksek enerji seviyesine sahip  $p_{max}(f)$  değerleri bulunur ve bu değer faz hızına dönüştürülerek gözlenen dispersiyon eğrisi elde edilir:

$$c_{obs}(f) = \frac{1}{p_{max}(f)} \quad (3.4)$$

Buradan elde edilen dispersiyon eğrisine ters çözüm işlemi uygulanır. Şematik olarak veri işleme adımları Şekil 7'de verilmiştir.

ReMi ölçümlerinde, çevresel gürültü kayıtları çoğunlukla rastgele fazlı ve farklı yönlerden gelen dalga alanlarından oluşur. Bu nedenle tek bir kısa kayıt penceresi ile yapılan analizlerde, hedeflenen Rayleigh dalgası enerjisi yönlü olmayan gürültü tarafından maskelenebilir ve ( $p - f$ ) spektrumunda dispersiyon eğrisi belirginleşmeyebilir. Bu etkiyi azaltmak için, ölçüm süresince elde edilen ardışık zaman pencerelerinin her biri için ( $p - f$ ) spektrumu hesaplanır ve daha sonra bu spektrumlar yığılma işlemi (ortalama alınarak) nihai hale getirilir.

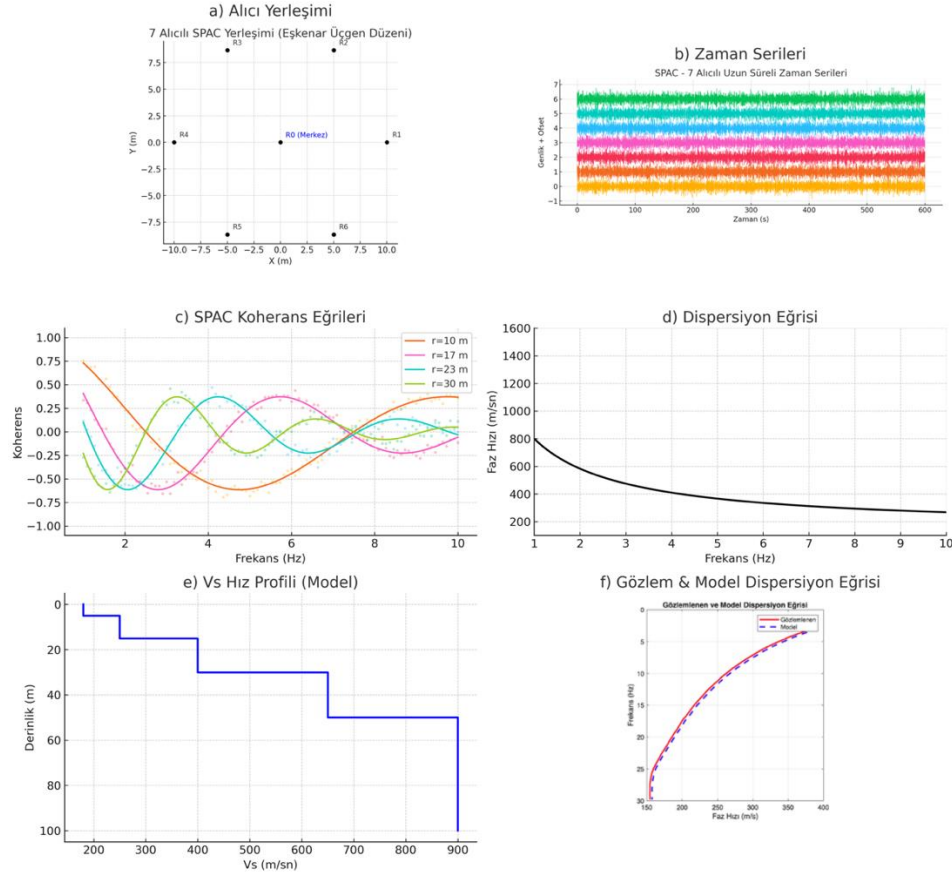


Şekil 7. ReMi yönteminin veri işlem aşamaları

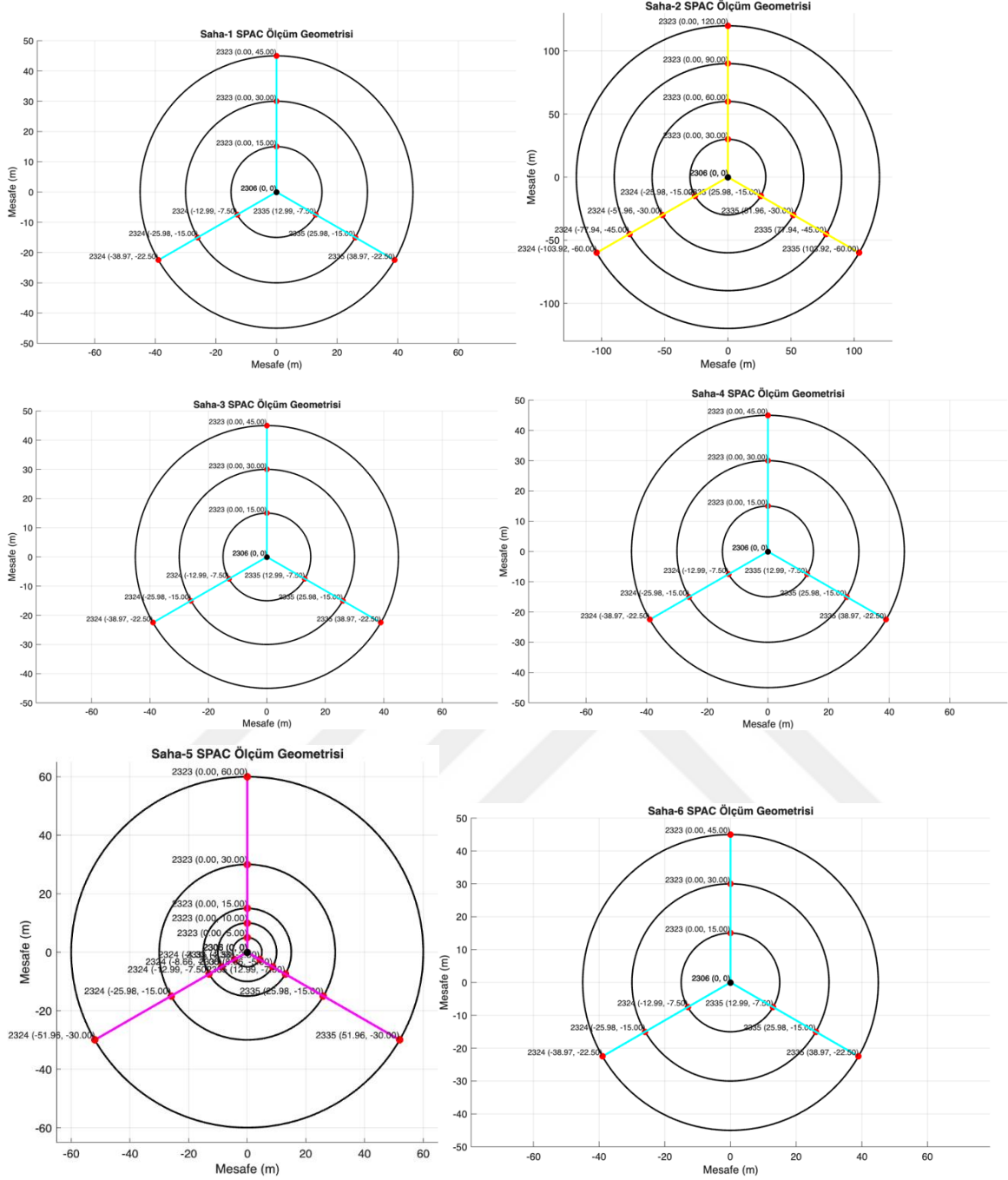
### 3.4.3 Mekansal Özilişki Yöntemi (SPAC)

SPAC yöntemi, Aki (1957) tarafından geliştirilen mekânsal otokorelasyon fonksiyonu ile çevresel gürültülerin spektral özelliklerini kullanarak dalga yayılımını analiz eder. Dairesel dizilimle yerleştirilen alıcılar yardımıyla, eşzamanlı sinyal kayıtlarının

otokorelasyonları kullanılarak dalga sayısı belirlenir. Yöntemin işlem adımları Şekil 8, sahada ölçüm geometrisine ilişkin bilgiler Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. SPAC yönteminin veri işlem aşamaları



Şekil 9. SPAC ölçümlerine ilişkin her saha için ölçüm geometrileri

### 3.5. Spektral Oran Yöntemleri

Zeminin sismik karakterizasyonu için kullanılan spektral oran yöntemleri, özellikle hakim frekansının belirlenmesi ve zemin-yapı etkileşiminin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, zeminin yatay ve dikey bileşenleri arasındaki spektral

ilişkiyi kullanarak, özellikle bu çalışmada basenin farklı noktalarındaki hakim frekansı ve sediman-kaya geçiş derinliği hakkında bilgi vermesi amacıyla iki temel spektral oran yöntemi kullanılmıştır. Bunlar; çevresel gürültü tabanlı yatay/düşey spektral oran (mHVSR) ve deprem kayıtlarına dayalı yatay/düşey spektral oran (eHVSR) yöntemleridir.

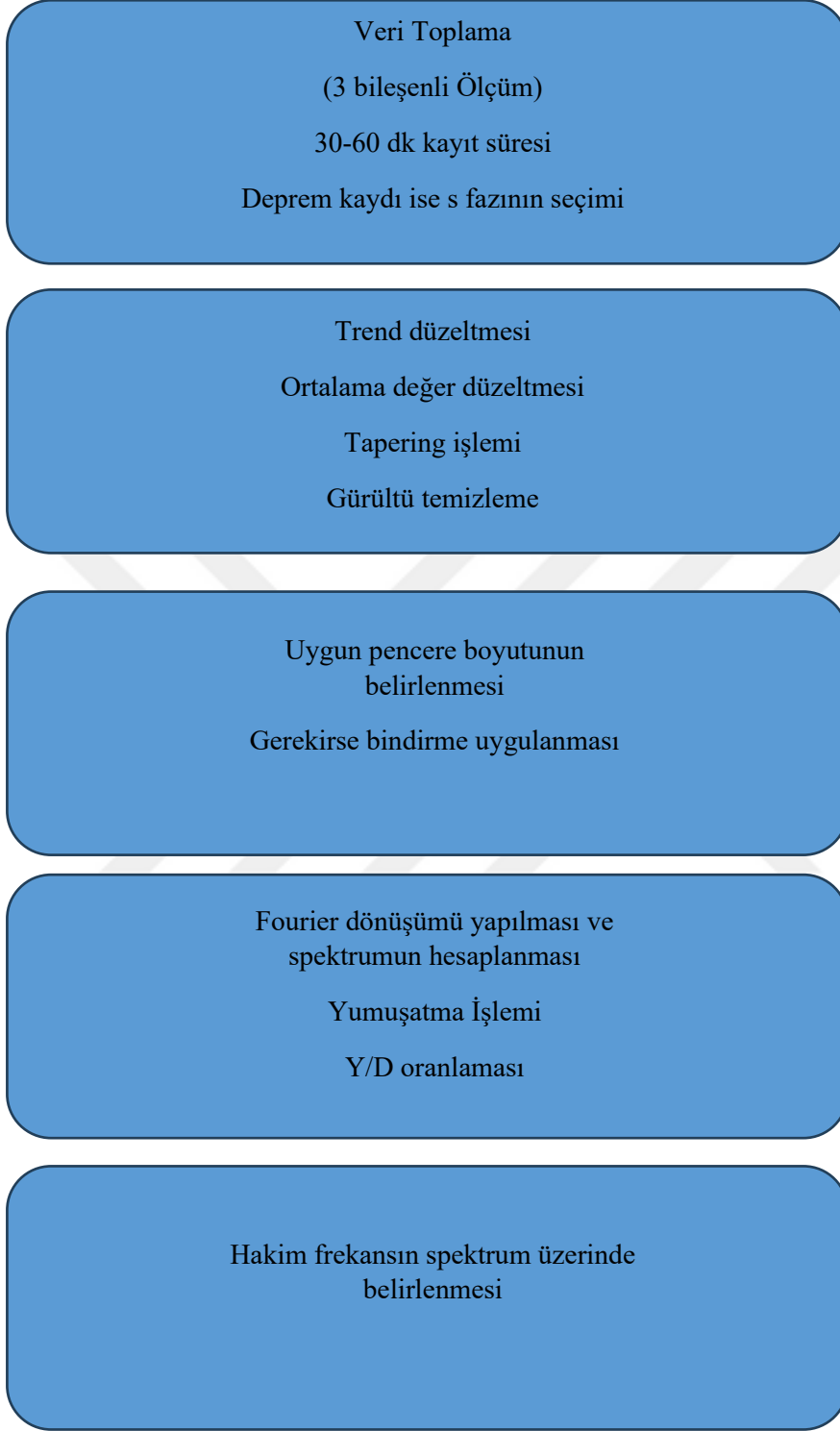
### 3.5.1. Çevresel Gürültü Tabanlı Yatay/Düşey Spektral Oran (mHVSR) Yöntemi

HVSR yöntemi, Nakamura (1989) tarafından önerilen ve çevresel mikrotremlerin üç bileşenli kayıtlarından yatay (H) ve düşey (V) bileşenlerin spektral oranını kullanarak hakim frekansı belirlemeye yarayan ampirik bir yaklaşımdır. HVSR eğrisi Denklem 3.1 ile tanımlanır;

$$HVSR(f) = \frac{\sqrt{|H_E(f)|^2 + |H_N(f)|^2}}{V(f)} \quad (3.5)$$

### 3.5.2. Deprem Kayıtlarına Dayalı Yatay/Düşey Spektral Oran (eHVSR) Yöntemi

Deprem sırasında kaydedilen üç bileşenli ivme verilerinin yatay ve düşey spektral oranının hesaplanması temeline dayanır. Bu yöntem, mHVSR ile benzer matematiksel yapıya sahip olsa da, dalga alanının doğrudan sismik kaynaklardan gelmesi nedeniyle büyütme oranlarını daha güvenilir biçimde temsil eder. İvme Kayıtlarına ait HVSR eğrileri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. HVSR veri işlem adımları

### 3.6. Zemin Tepki Analizleri

Zemin tepki analizleri, yerel zemin koşullarının sismik dalgalar üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve mühendislik kayasından etkilenen ivme kaydını zemin yüzeyinde elde edebilmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, elde edilen kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) profillerine dayalı olarak, lineer elastik zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, yerel zeminin elastik özellikleri sabit kabul edilmiş, dinamik analizler doğrusal viskoelastik davranış modeli üzerinden yürütülmüştür. Zemin tepki analizleri, her istasyon lokasyonunda elde edilen  $V_s$  profiline karşılık gelen transfer fonksiyonlarının hesaplanmasını içermiştir. Bu hesaplamalar, Denklem 3.2 ile tanımlanan frekans-faz spektrumuna dayalı transfer fonksiyonu (TF) üzerinden yapılmıştır:

$$TF(f) = \left| \frac{U_s(f)}{U_b(f)} \right| \quad (3.6)$$

Burada  $U_s(f)$  yüzeydeki yer hareketi spektrumu,  $U_b(f)$  ise tabandaki (kaya birim) yer hareketi spektrumudur. 1B analizler DEEPSOIL 7, 2B analizler Plaxis 2D yazılımları ile gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, transfer fonksiyonlarının rezonans frekansları belirlenmiş; bu değerler, hem mHVSR hem de eHVSR yöntemlerinden elde edilen gözlemsel spektral oran eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, saha ölçümleri ile teorik analizlerin tutarlılığını test etmek açısından kritik öneme sahiptir. Uyumlu sonuçlar,  $V_s$  profillerinin güvenilirliğini desteklerken; uyumsuzluklar, yerel zemin davranışında dikkate alınması gereken doğrusal olmayan etkiler veya 2B/3B geometri kaynaklı farklılıklar hakkında bilgi sunmuştur. Bu yaklaşımla, çalışma alanındaki zeminlerin sismik davranış özellikleri, rezonans frekansları nicel olarak belirlenmiş ve bölgesel mühendislik jeolojisi değerlendirmelerine katkı sağlanmıştır.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen veriler analiz edilerek araştırmanın temel bulguları ortaya konulmuştur. Yüzey dalgası yöntemleriyle belirlenen Vs profilleri, HVSR analizleri ve zemin tepki analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

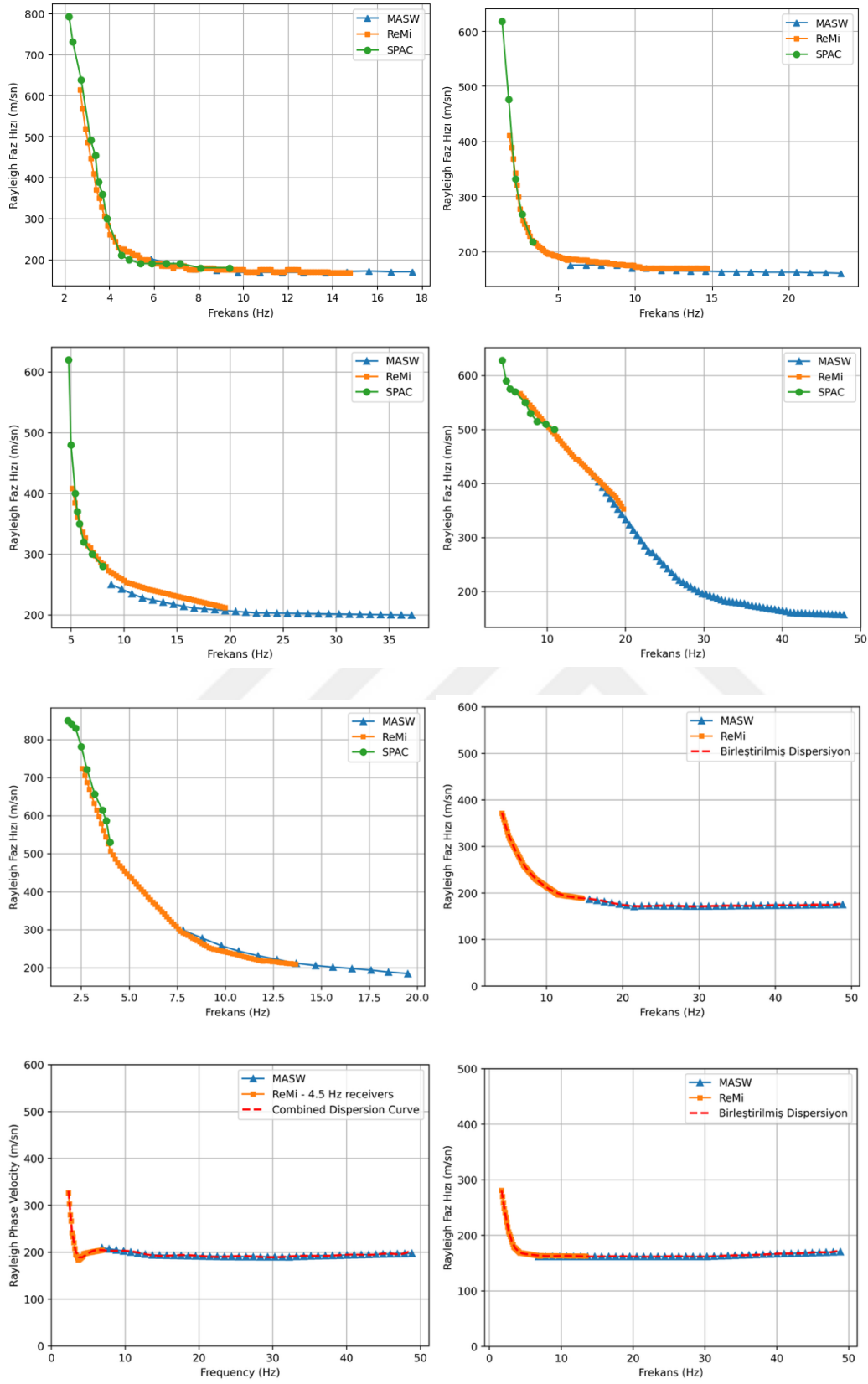
#### 4.1. Vs Profillerinin Elde Edilmesi ve Kalibrasyonu

Çalışma sahasındaki yeraltı yapısının karakterizasyonu amacıyla kayma dalgası hızı (Vs) profilleri, hem aktif hem de pasif yüzey dalgası yöntemlerinin bütüncül kullanımıyla elde edilmiştir. Bu kapsamda, Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW), Kırılma Mikrotremörü (ReMi) ve Mekansal Özilişki (SPAC) yöntemleri bir arada değerlendirilerek daha geniş bir frekans spektrumu ve buna karşılık gelen daha yüksek çözünürlüklü Vs profilleri elde edilmiştir.

MASW yöntemi, kısa süreli aktif kaynak verilerine dayanarak yüzeye yakın katmanlardaki yüksek çözünürlüklü Vs dağılımını belirlemekte etkili olmuştur. Tipik olarak 5–30 m derinliğe kadar güvenilir veri sağlamış ve üst tabakaların heterojenliğinin modellenmesinde kritik rol oynamıştır. MASW verileri, daha çok yumuşak zeminli ve sık tabakalı alanlarda ayrıntılı çözümleme sunmuştur. ReMi yöntemi, çevresel mikrotremörleri kullanarak daha düşük frekanslı Rayleigh dalgalarının analizine olanak tanımış ve 30–60 m derinliğe kadar uzanan profil elde edilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle açık alanlarda ve düşük trafik yükü olan bölgelerde etkin veri sağlamıştır. MASW ile üst tabakalarda elde edilen hız yapıları, ReMi ile orta derinlikteki hız geçişleriyle desteklenmiştir. SPAC yöntemi ise geniş aralıkta dizilimli üçgen konfigürasyonlu pasif alıcı düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve daha uzun periyotlu (düşük frekanslı) yüzey dalgalarının analizine olanak tanımıştır. Bu yöntemle elde edilen dispersiyon eğrileri, özellikle 100 m ve daha derin yapılar için önemli bilgiler sunmuş ve temel kaya derinliğinin tahmininde kullanılmıştır.

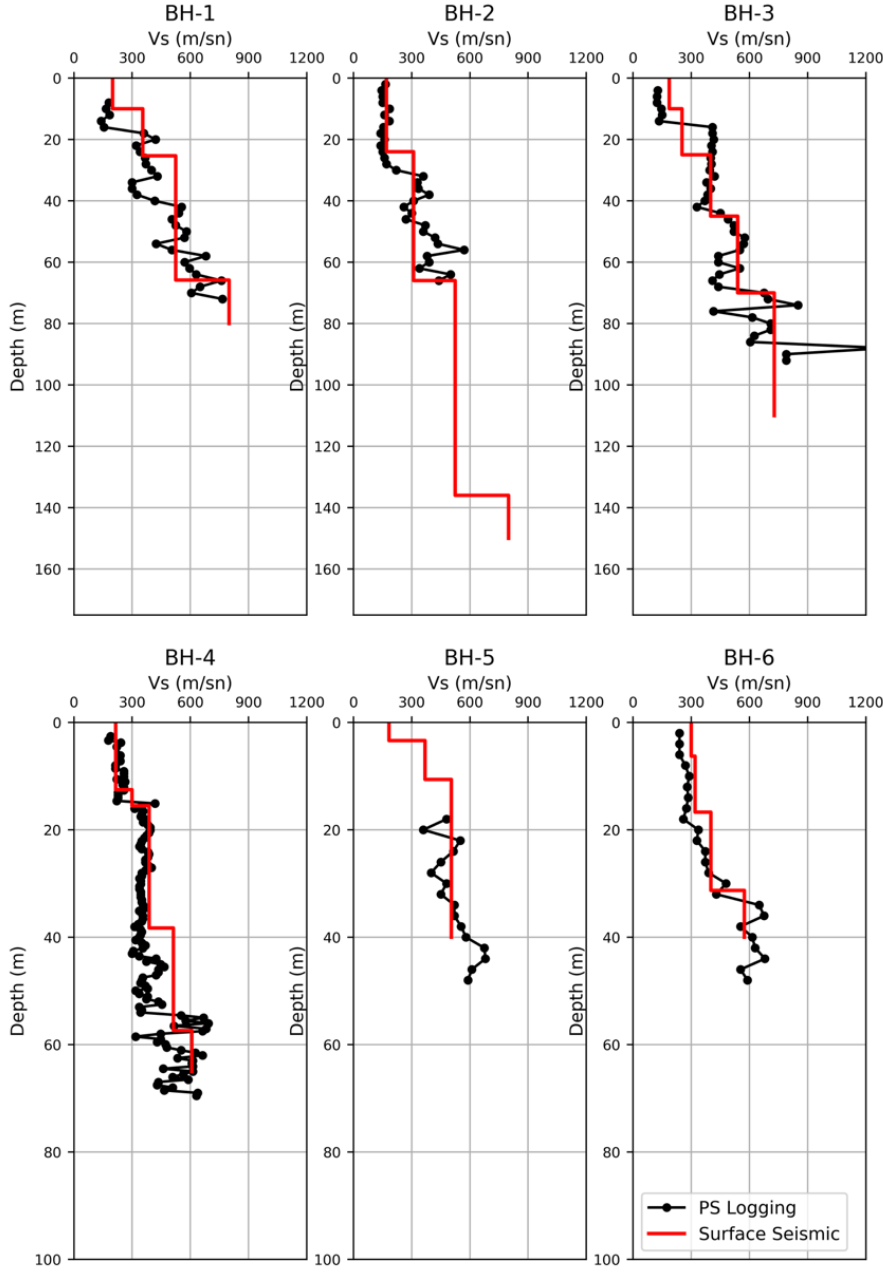
Her üç yöntemle elde edilen dispersiyon eğrileri, frekans-faz hızı ilişkisi açısından birleştirilmiş ve ortak ters çözüm işlemiyle bütüncül Vs profilleri oluşturulmuştur. Dispersiyon eğrilerinin birleşimi sırasında, yüksek frekanslı (MASW), orta frekanslı (ReMi) ve düşük frekanslı (SPAC) verilerin uyum içinde bir araya getirilmesine özen gösterilmiştir. Ters çözüm işlemi, genetik algoritma tabanlı çok katmanlı elastik modellemelerle gerçekleştirilmiş ve iteratif iyileştirmeyle kalibre edilmiştir. MASW, Remi ve SPAC ölçümlerine ait dispersiyon eğrileri Şekil 11’de verilmiştir.

Farklı sahalarda MASW, ReMi ve SPAC yöntemleri kullanılarak elde edilen Rayleigh faz hızı–frekans ilişkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. MASW yöntemi (mavi çizgi) genellikle yüksek frekans aralığında (>8–10 Hz) güvenilir veri sağlamış, sığ tabaka hızlarının belirlenmesinde etkin olmuştur. ReMi yöntemi (turuncu çizgi) ise daha düşük frekans aralığına inerek MASW verisinin ulaşamadığı derinliklere ilişkin faz hızı bilgilerini tamamlamıştır. SPAC yöntemi (yeşil çizgi), özellikle 2–5 Hz aralığında veriyi uzatarak derin tabaka hızlarının belirlenmesine katkıda bulunmuş ve düşük frekanstaki değerleri ile ReMi–MASW geçiş bölgesinde uyumlu sonuçlar vermiştir. Farklı yöntemlerden gelen verilerin ortak frekans aralıklarında iyi bir uyum sergilediğini ve kesintisiz bir eğri oluşturulabildiğini göstermektedir. Bu sayede hem düşük hem yüksek frekans verileri tek bir sürekli dispersiyon eğrisi üzerinde toplanarak ters çözüm için daha geniş ve güvenilir bir veri seti elde edilmiştir. Saha bazında incelendiğinde, bazı lokasyonlarda MASW verileri yüksek frekanslarda belirgin şekilde uzamakta ve ReMi ile düşük frekanslarda sorunsuz şekilde birleşmektedir. SPAC verilerinin mevcut olduğu sahalarda, düşük frekanstaki hız değerlerinin diğer yöntemlerle tutarlı olması, derin yapının güvenilirliğini artırmıştır. Bu sonuçlar, çok yöntemli yaklaşımın sahaya özgü Vs profillerinin belirlenmesinde önemli bir avantaj sunduğunu, özellikle farklı yöntemlerin birbirinin eksik kaldığı frekans aralıklarını tamamlayarak hem sığ hem derin tabaka modellemesini güçlendirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 11. MASW, ReMi ve SPAC yöntemlerinden her saha için elde edilen dispersiyon eğrileri

Şekil 12’de SK-1 ile SK-6 arasındaki sondaj kuyuları için PS logging (siyah) ve yüzey sismik yöntemlerin birleşik dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile (kırmızı) kullanılarak elde edilen Vs karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Genel olarak, iki yöntem arasında özellikle ilk 20–30 metre içinde dikkat çekici bir uyum gözlenmektedir. Bu derinlik aralığında tabaka geçişleri, her iki yöntemde de benzer hız değerleri ile tanımlanmış ve yüzey sismik sonuçlar PS logging verilerini büyük ölçüde desteklemiştir. Daha derin seviyelerde de genel eğilimlerin uyumlu olduğu, tabaka geçişlerinin benzer derinliklerde yakalandığı görülmektedir. Bazı kuyularda belirli seviyelerde hız farklılıklarının olması, yüzey dalgasını esas alan yöntemlerin daha geniş bir hacmi örneklemesinden ve derin tabakaların ortalama özelliklerine duyarlılığından kaynaklanabilir. Buna karşın SK-3 ve SK-6 gibi kuyularda derinlik boyunca hız değerleri oldukça yakın seyretmekte, bu da yöntemler arası güçlü bir korelasyona işaret etmektedir. SK-5 gibi daha sığ kuyularda ise iki yöntem de sınırlı derinlik aralığında uyumlu sonuçlar üretmiş, yüzey sismik profillerin tabaka hız trendlerini başarılı bir şekilde yansıttığı görülmüştür. Bu durum, sınırlı kuyu verisinin bulunduğu sahalarda yüzey sismik yöntemlerin güvenilir bir alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, çalışma alanındaki kuyulardan elde edilen karşılaştırmalar, yüzey sismik yöntemlerin PS logging verilerini büyük ölçüde doğruladığını ve özellikle sığ derinliklerde yüksek uyum sağladığını ortaya koymaktadır. Yöntemler arasındaki küçük farklılıklar, ölçüm tekniklerinin doğasından ve örneklenen hacim farklarından kaynaklanmakta olup, birlikte değerlendirildiklerinde zemin profillerinin daha güvenilir ve ayrıntılı olarak tanımlanmasına katkı sağlamaktadır.

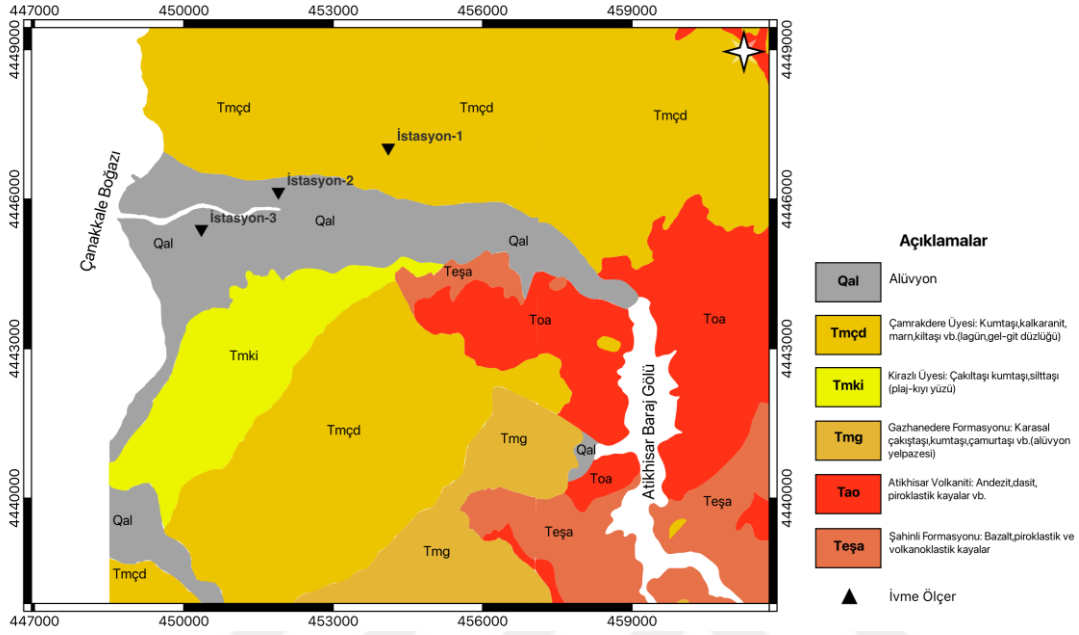


Şekil 12. PS Logging ve yüzey dalgası spektral analiz ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

#### 4.2. HVSR Eğrilerinin Yorumu

Bu çalışmada, zeminin hakim frekasının belirlenmesi amacıyla hem çevresel gürültü (mHVSR) hem de deprem kayıtlarına (eHVSR) dayalı HVSR analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen spektral oran eğrileri, yerel zemin koşullarının rezonans karakteristiklerini ortaya koymada önemli bulgular sunmuştur. Öncelikle sahada geçici olarak kurulmuş olan konumları Şekil 13'de gösterilen ivme istasyonlarındaki kaydedilen depremler ile aynı

sahadalarda alınmış ölçümlere ait verilerden HVSR analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır (Şekil 14). Analizde kullanılan deprem kayıtlarına ilişkin bilgiler ise Tablo 3’de verilmiştir.



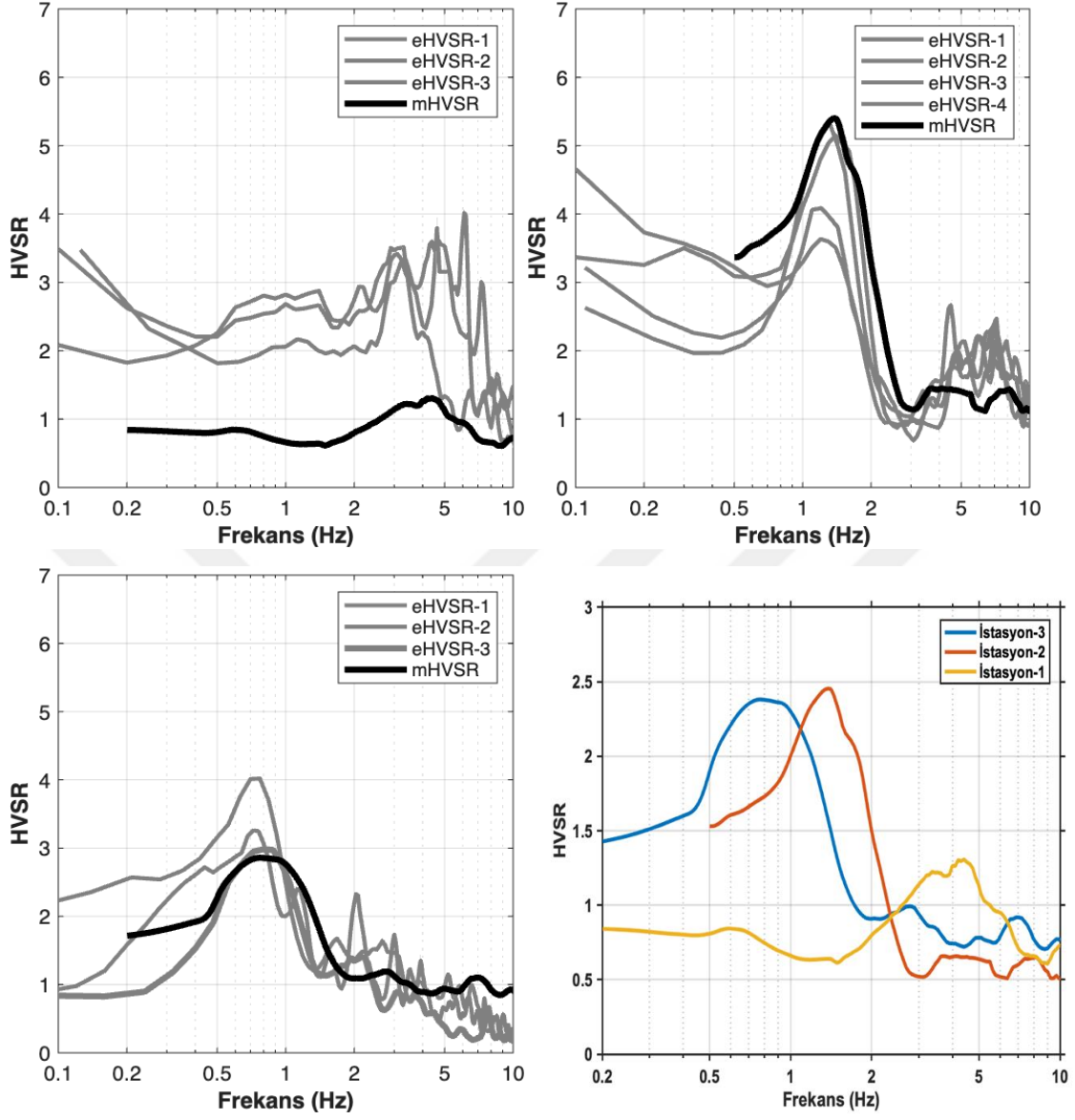
Şekil 13. Geçici süreli kurulan ivme istasyonlarının konumları

İstasyon 1 ve 2’de elde edilen mHVSR eğrileri sırasıyla 0.8–1.2 Hz bandında belirgin bir tepe frekansı verirken, aynı istasyondaki farklı depremlerden elde edilen eHVSR eğrileri düşük frekanslarda başlayıp benzer frekansta bir tepe göstermektedir. Bu örtüşme, istasyon çevresinde baskın rezonansın kararlı biçimde gerçekleştiğini ve 1B tabakalanmanın etkili olabileceğini düşündürmektedir. İstasyonlar 3’te ise eHVSR analizlerinde çoklu pik görülmekle beraber mHVSR eğrisi düze yakındır. Bu durum, tabakalar arası empedans farkının düşük olması diğer bir ifadeyle belirgin bir hız geçişinin var olmamasından kaynaklandığını düşündürmektedir. Bu değerlendirmenin daha iyi anlaşılabilmesi için çalışma sahasında test sahalarında kurulmuş olan ivme istasyonlarında benzer analizler gerçekleştirilmiştir. Test sahalarında sondaj ve Vs profillerinin bulunması değerlendirmelerin daha nicel değerlendirmenin yapılabilesine ve HVSR eğrilerinin saha verilerinden elde edilen transfer fonksiyonları ile karşılaştırma imkanı da sunmuştur.

Tablo 3.

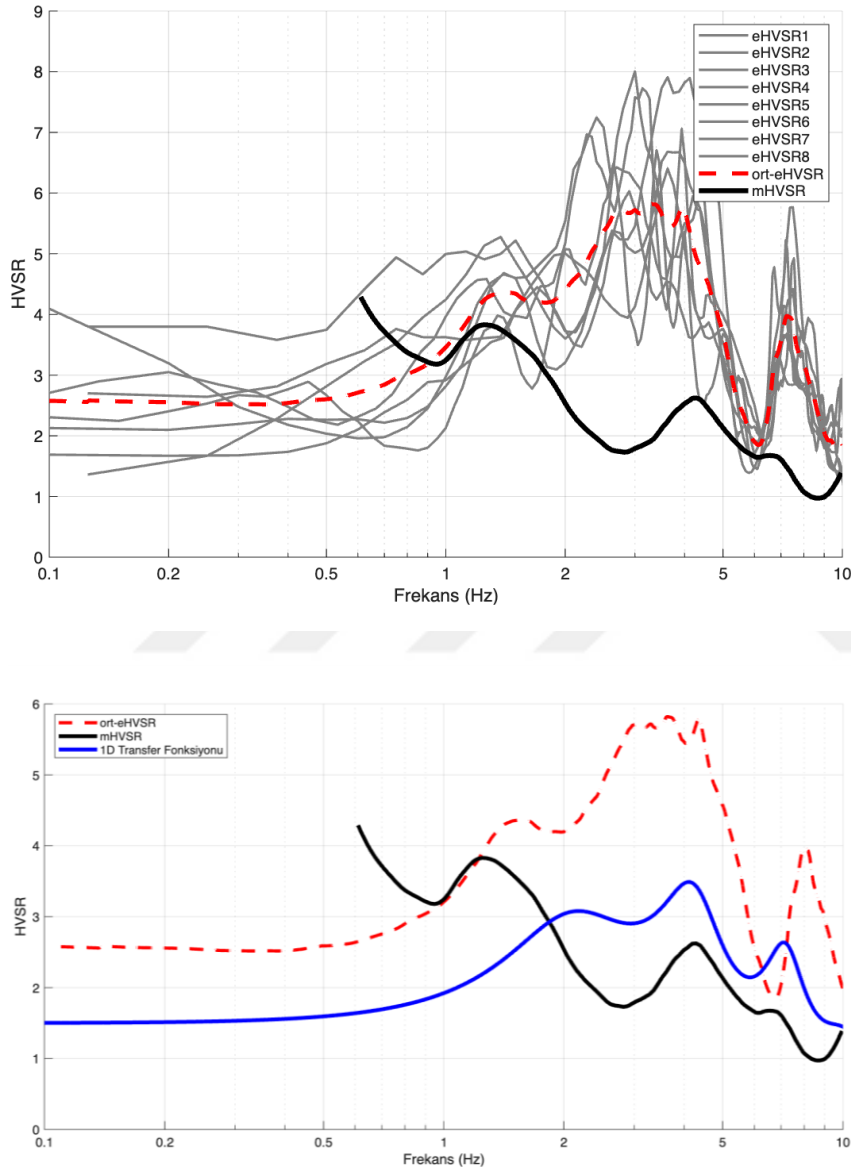
HVSR analizinde kullanılan deprem kayıtlarına ilişkin bilgiler

No	Oluş Tarihi	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	Mw	Konum	İstasyon Adı
EQ1	2022.12.13	03:21:17	40.3690	27.1058	4.2	ESKIBALIKLI-BIGA	İstasyon-1, 2 ve 3
EQ2	2022.06.03	22:58:57	39.8198	27.9482	4.6	CAYPINAR-	İstasyon-1, 2 ve 3
EQ3	2022.01.16	12:26:18	40.0422	24.3702	4.5	YUNANISTAN	İstasyon-1, 2 ve 3
EQ4	2022.01.16	11:48:05	40.0257	24.3597	5.4	YUNANISTAN	İstasyon-2
EQ5	2023.11.07	20:05:47	40.4887	275442	4.3	AVSA ADASI	Saha-1,2,3 ve 4
EQ6	2023.12.04	07:42:00	40.4269	28.8319	5.1	GEMLIK KORFEZI	Saha-1,2,3 ve 4
EQ7	2024.02.27	16:09:53	40.3033	27.0072	4.3	BEYPINAR LAPSEKI	Saha-1,2,3 ve 4
EQ8	2024.03.04	18:38:55	39.9770	27.4432	4.9	KARASU YENICE	Saha-1,2,3 ve 4
EQ9	2024.07.22	17:39:00	39.6772	26.3887	4.9	BAHCELI - EZINE	Saha-1,2,3 ve 4
EQ10	2024.11.19	07:46:15	40.3033	27.0072		GURGENDERE-BIGA	Saha-1,2,3 ve 4
EQ11	2025.01.21	20:3848	39.4218	26.2978	5.0	EDREMIT KORFEZI	Saha-1,2,3 ve 4



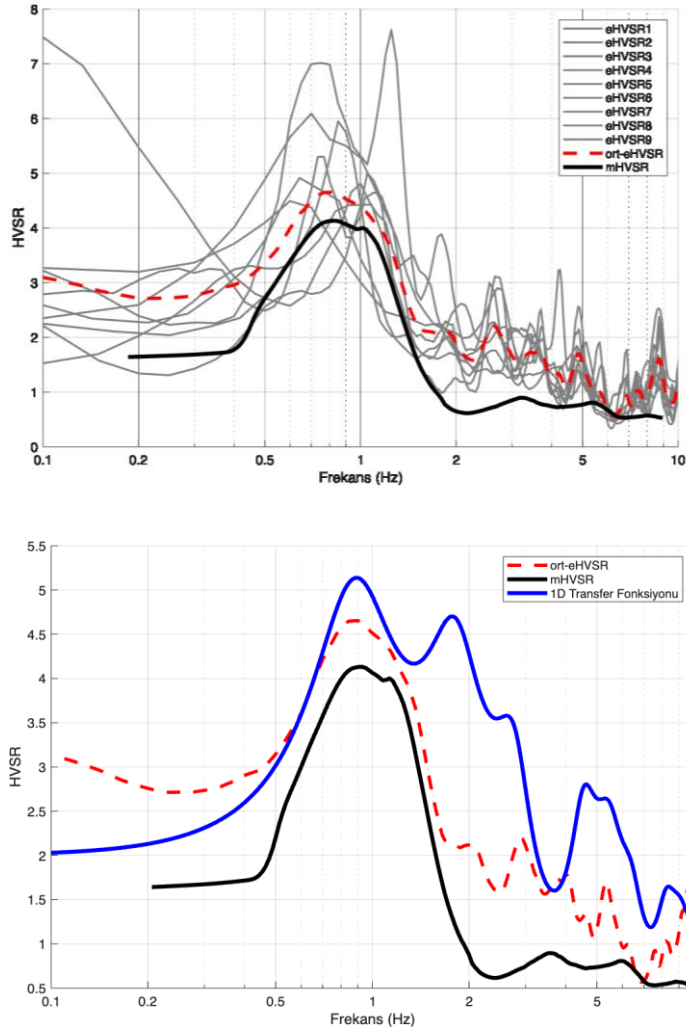
Şekil 14. Sırasıyla istasyon 1, istasyon 2 ve istasyon 3'te hesaplanan HVSR eğrileri ve tüm eğrilerin birlikte gösterimi

Test sahası 1’te eHVSR ve mHVSR eğrileri 1.5 Hz’de pik uyumlu gözükmeyle birlikte daha yüksek frekanslarda bir uyum gözlenmemiştir (Şekil 15). Ancak 1D analizde transfer fonksiyonu ile eHVSR eğrisi benzer frekanslarda pik görülmektedir.

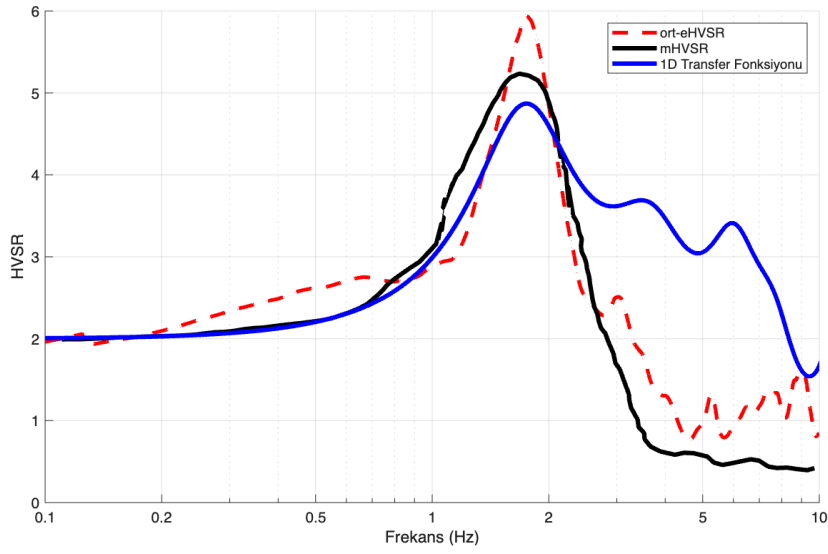
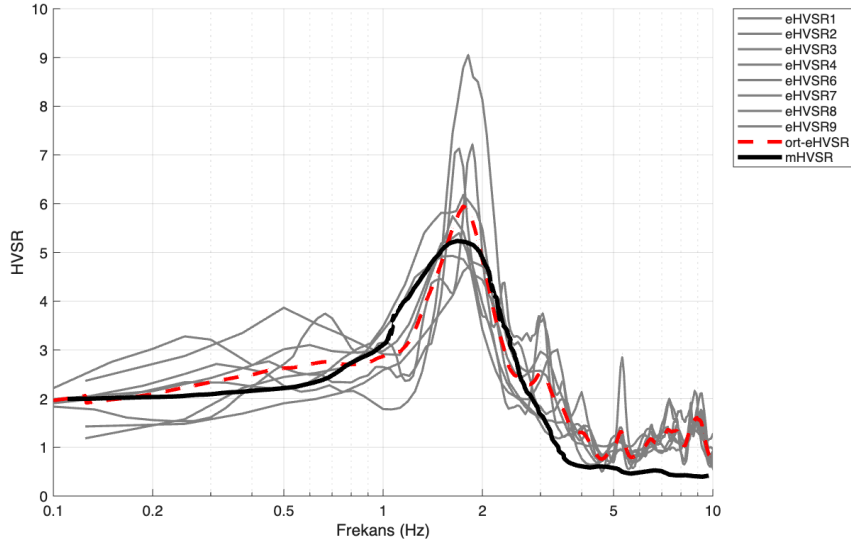


Şekil 15 . Test sahası 1’de hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması

Test sahası-2' ve 3'de (Şekil 16 ve Şekil 17) eHVSR ile mHVSR eğrisinin benzer frekanslarda iyi düzeyde örtüştüğü görülmektedir. Deprem kayıtlarından elde edilen eHVSR eğrilerinde bir miktar saçılma görülsede, tepe konumları ve ortalaması yaklaşık 0.8–1.0 Hz'de, mHVSR eğrisi ile benzer frekansta belirgin bir pik vermektedir. Ortalama eHVSR, mHVSR ve hesaplanan 1D transfer fonksiyonu karşılaştırıldığında tüm eğrilerin ~0.8–1.0 Hz'de uyumludur. Bu uyum, deneysel verilerle sayısal 1B modelin temel rezonans açısından aynı tabakalanmayı işaret ettiğini göstermektedir. Temel mod haricinde özellikle 1D analizde ve kısmen eHVSR eğrisinde gözlenen piklerin sığ birimlerin hız farklılıklarına ve bu farklılığa mHVSR'in duyarlı olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

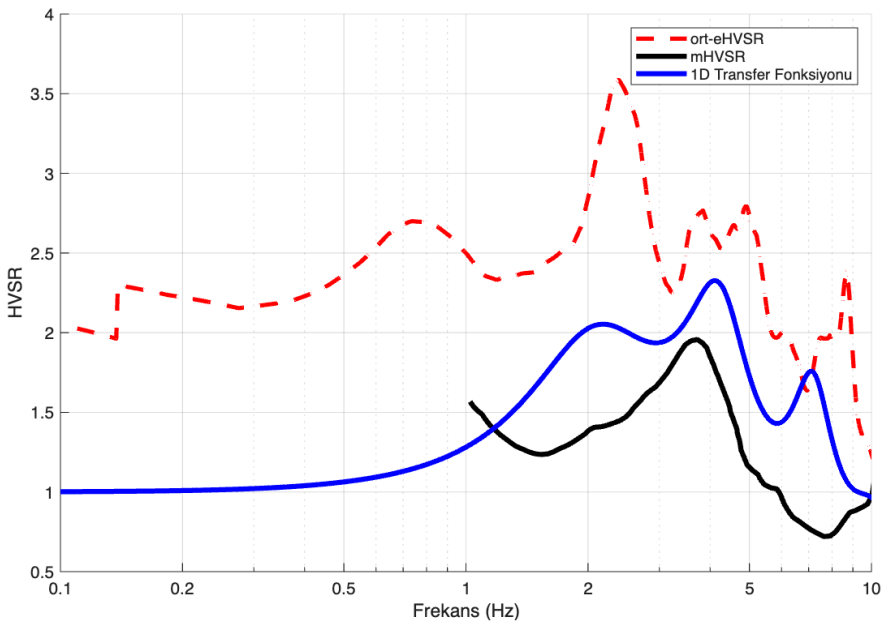
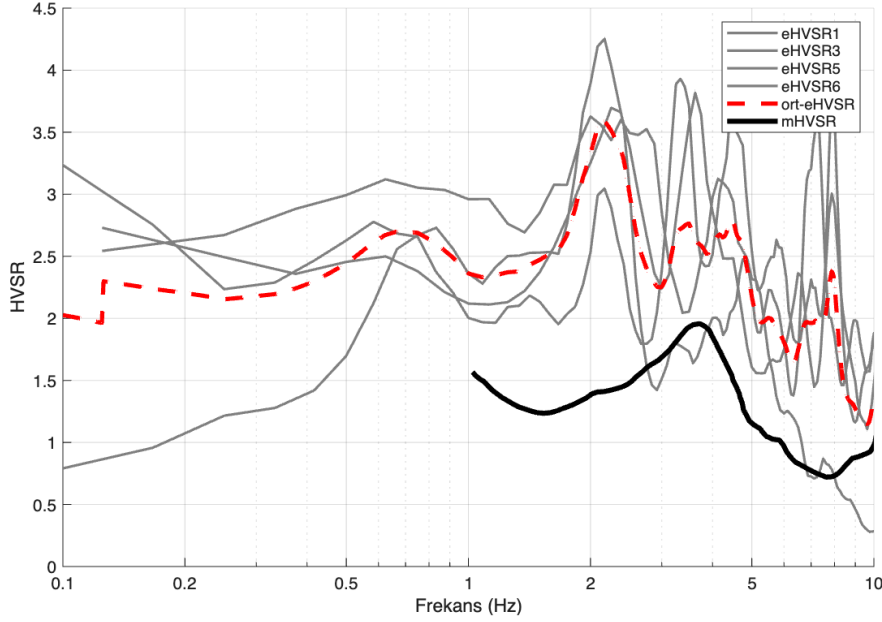


Şekil 16 . Test sahası 2'de hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması



Şekil 17 . Test sahası 3’de hesaplanan eHVSR-mHVSR eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması

Test sahası 4'te eHVSr ve mHVSr eğrileri arasında doğrudan bir uyum gözlenmemiştir (Şekil 18). Ancak istasyondaki deprem verilerinin analizinde kendi içerisinde saçılmış olduğu görülmektedir. Yapılmış olan 1D analizde transfer fonksiyonu ile mHVSr eğrisi benzer frekanslarda pik görülmektedir. Bu durum, deprem verisi sayısının azlığı ve ortam gürültüsü ile ilişki olabileceğini düşündürmektedir.

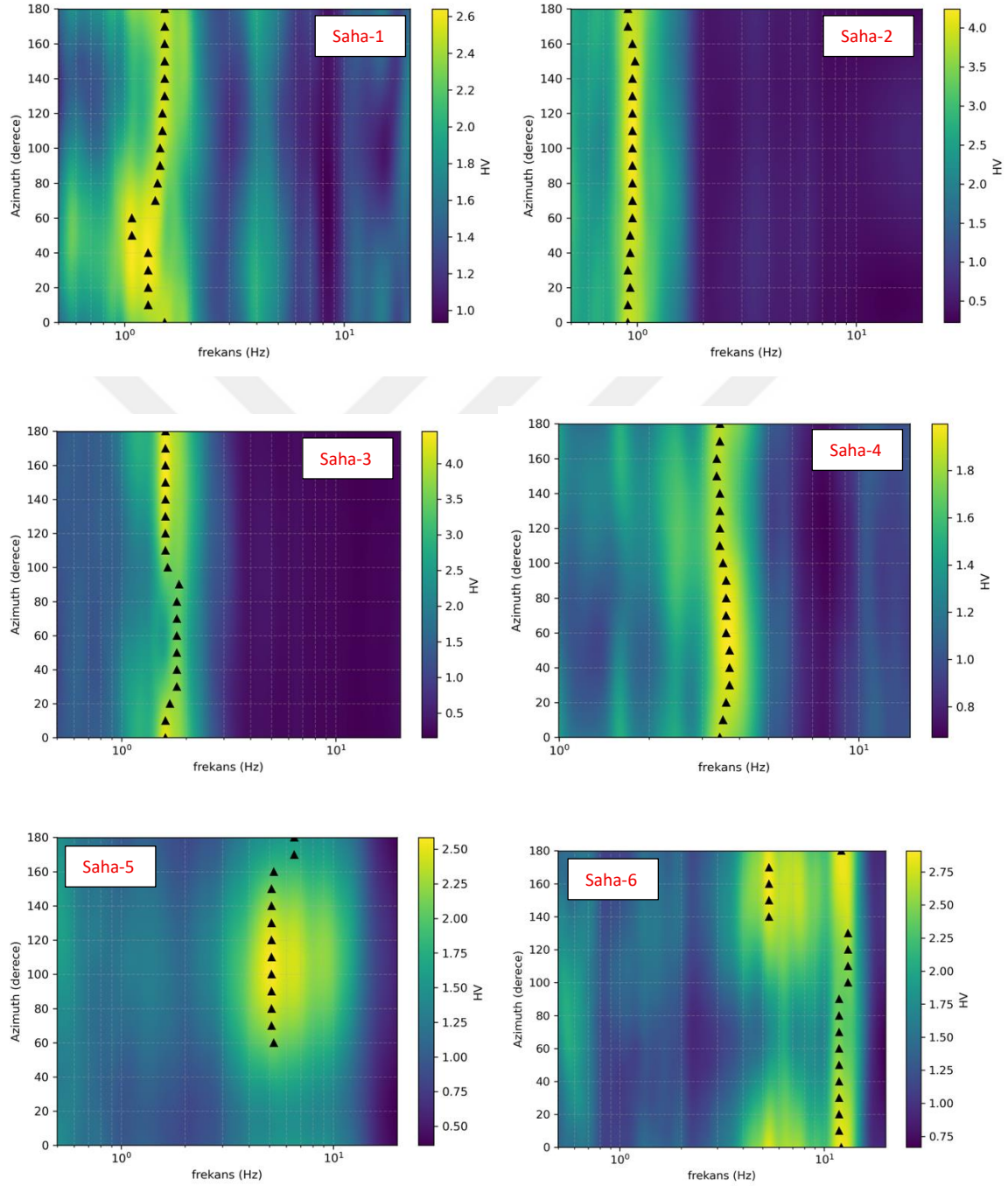


Şekil 18 . Test sahası 4'te hesaplanan eHVSr-mHVSr eğrileri ve eğrilerin 1B transfer fonksiyonu ile karşılaştırması

Arazi çalışmaları sonucunda elde edilen mHVSZ eğrilerinin basen ortasında tek frekansta yoğunlaşan belirgin rezonans tepeleri gözlenmiş, bu durum zeminlerin 1B yapıda olduğunu ve belirgin bir sert tabaka ile sınırlandığını ortaya koymuştur. Ancak bazı istasyonlarda geniş tabanlı veya çok tepeli eğriler tespit edilmiş bu durum yanıl heterojenitelerin, basen kenar etkilerinin ya da topoğrafik özelliklerin varlığına işaret ettiğini düşündürmektedir. Bazı lokasyonlar ise mHVSZ eğrilerinin genlikleri 2'nin altında kalmış ve düze yakın (flat) eğriler gözlenmiştir. Bu durum tabakalar arası empedans farkının düşük olması ve belirgin bir hız geçişinin var olmamasından kaynaklanmaktadır. eHVSZ ve mHVSZ sonuçlarının karşılaştırmalı analizinde, rezonans frekanslarının çoğunlukla birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu uyum, HVSZ yönteminin hem mikrotremelere hem de gerçek sismik olaylara dayalı olarak güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak bazı noktalarda eHVSZ eğrileri mHVSZ'ye göre daha yüksek genlikli tepe değerleri sergilemiş, bu da deprem kaynaklı dalga alanının daha güçlü olduğu durumlarda rezonans etkisinin daha belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, mHVSZ ve eHVSZ yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, benzer frekanslarda pik oluştuğunun gözlenmesi mHVSZ'in deprem istasyonlarının bulunmadığı bölgelerde kullanılabilirliğinde ortaya koymaktadır.

Klasik HVSZ analizleri genellikle tüm kayıtların belirli bir süre boyunca yön bileşenlerinden bağımsız olarak değerlendirilmesine dayanırken, azimut bağımlı HVSZ analizi, sismik dalga alanındaki yönsel değişimlerin incelenmesine olanak tanır (Kawase vd., 2011; Hobiger vd., 2010). Azimut analizlerinde kayıtlar, belirli açısıl aralıklarla döndürülerek (genellikle 10°–20° aralıklarla) her bir yöndeki H/V spektral oranları hesaplanır. Bu yaklaşım, yerel topografya, tabaka eğimi veya 2D/3D jeolojik yapıların neden olduğu yönsel farklılıklarının ortaya çıkarılmasına imkan verir (Roten vd., 2006). Özellikle basen kenarlarında veya eğimli tabaka yapılarına sahip alanlarda, azimut analizleri hakim frekansta yön bağımlı genlik değişimlerini net biçimde gösterebilir (Bonney-Claudet vd., 2006; Fäh vd., 2001). Bu çalışmada, test sahalarına ait HVSZ verileri farklı azimut yönleri için her 10°'de bir ayrı ayrı hesaplanarak frekans–azimut spektrumları elde edilmiştir (Şekil 19). Analizler sonucunda bazı istasyonlarda hakim frekansta azimut bağımlılığının düşük olduğu ve rezonansın büyük ölçüde tabaka kalınlığı–Vs kontrastı kontrolünde gerçekleştiği belirlenirken, diğer istasyonlarda belirgin yönsel genlik değişimleri gözlenmiştir. Bu durum,

söz konusu istasyonların olası 2D/3D geometrik etkilerine maruz kaldığını düşündürmektedir.



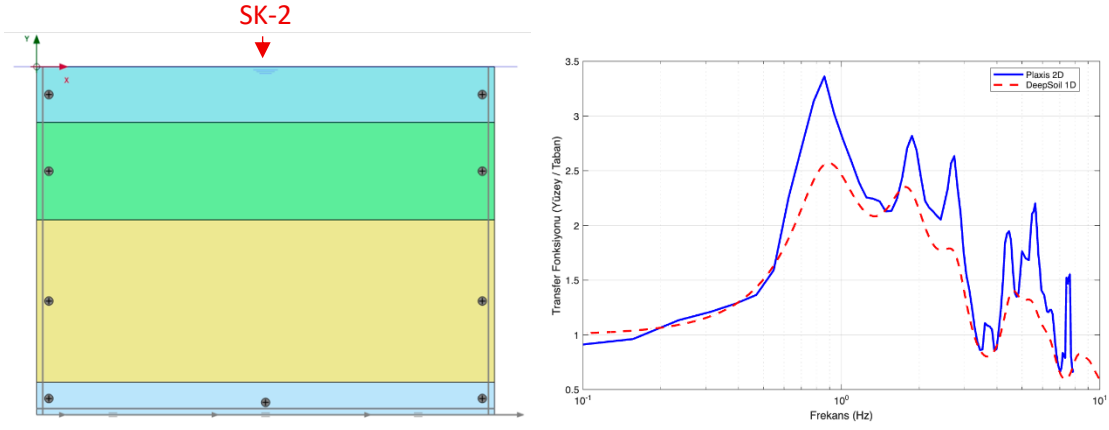
Şekil 19. Test sahaları için sırasıyla HVSR azimuth analizleri

### 4.3. Zemin Tepki Analizlerinden Elde Edilen Transfer Fonksiyonlarının Saha Verileri ile Karşılaştırılması

Çalışmada, yüzey dalgası analizlerinden elde edilen Vs profillerine dayanarak gerçekleştirilen 1B lineer zemin tepki analizleri, hem mHVSZ hem de eHVSZ yöntemleri ile elde edilen gözlemsel spektral oran eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, hesaplamalı analizlerin doğruluğunu değerlendirmek ve saha verileri ile modelleme sonuçları arasındaki uyumu test etmek açısından önem taşımaktadır. Zemin tepki analizlerinde kullanılan Vs profilleri, MASW, ReMi ve SPAC gibi farklı yüzey dalgası yöntemlerinin birleşik değerlendirilmesiyle elde edilmiş; her ölçüm noktasına özgü stratigrafi ve dinamik özellikler dikkate alınarak 1B zemin modelleri oluşturulmuştur. Bu modellere dayalı olarak, DEEPSOIL yazılımı aracılığıyla 1B lineer analizler gerçekleştirilmiş ve transfer fonksiyonları hesaplanmıştır. Hesaplanan teorik transfer fonksiyonları, zeminlerin sismik dalgalar karşısındaki frekans bağımlı genlik tepkisini yansıtmaktadır.

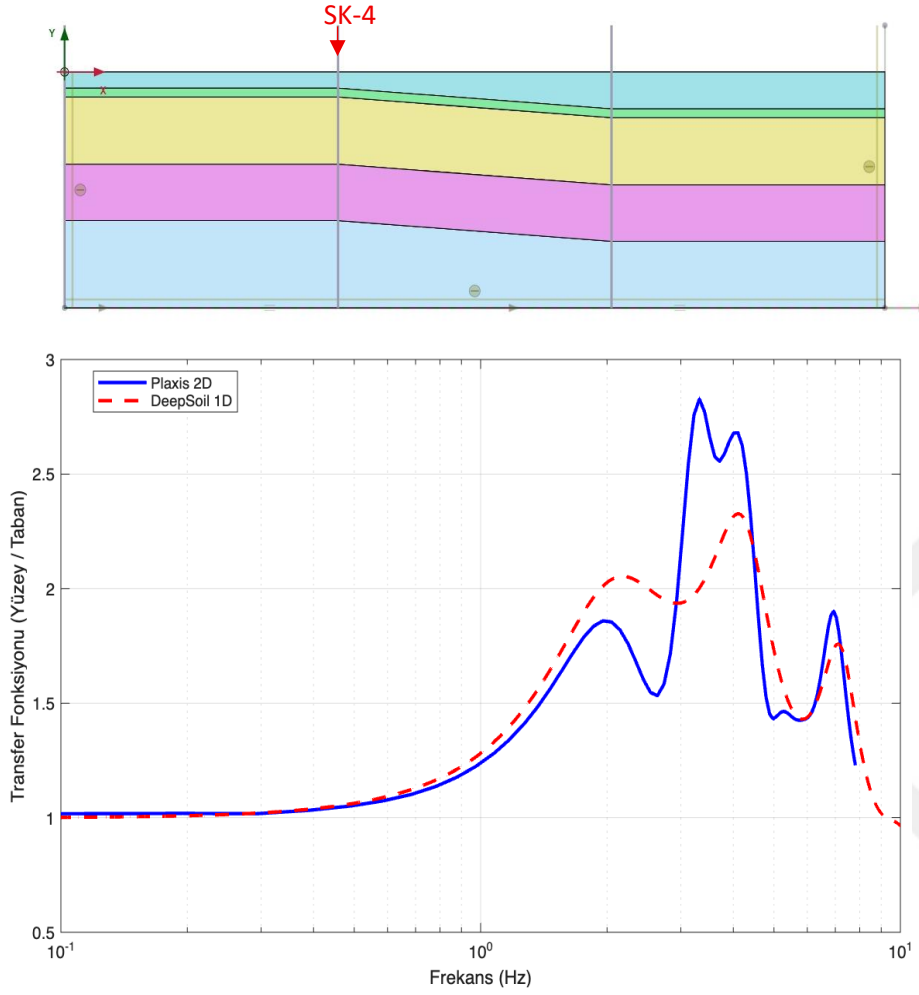
Yapılan karşılaştırmalarda, teorik 1B analiz sonucu hesaplanan transfer fonksiyonları ile hem mHVSZ hem de eHVSZ eğrileri arasında özellikle basen ortasında rezonans frekansı açısından iyi bir uyum gözlenmiştir. Bu uyum, özellikle stratigrafik olarak homojen ve belirgin empedans kontrastı içeren alanlarda daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Ancak diğer ölçüm noktalarında teorik ve gözlemsel eğriler arasında hakim frekansta sapmalar tespit edilmiştir. Bu durumun değerlendirilmesi amacıyla 2B analizler ile 1B analiz sonuçları sonuçları karşılaştırılmıştır. Öncelikle basen ortasında yeralan test sahası 2 analizinin kalibrasyonu amacıyla Şekil 20’de sunulmuştur.

Yapılan analizde zemin tepkisi temel ve yüksek modlarda benzer frekanslarda uyuşmaktadır. Bu durum yatay tabakalı, ağırlıklı olarak düşey tabakalanma ve 1B varsayımın yeterli temsile sahip olduğunu göstermektedir. Bu sahada HVSZ eğrilerinde uyumlu olması bu davranışı desteklemektedir.



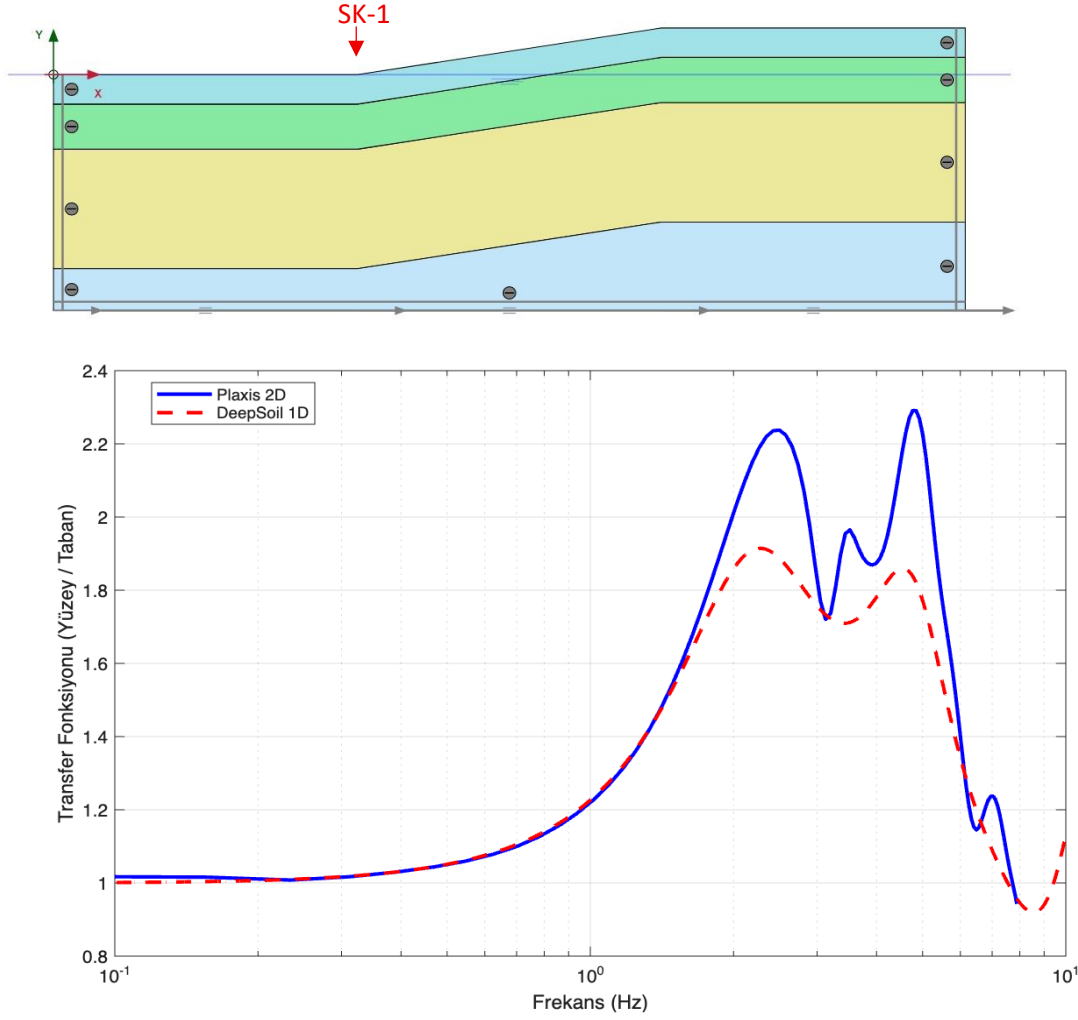
Şekil 20. . Zemin modeli (solda), 1 ve 2B zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması (sağda)

Test sahası 4'te kısmen yatay tabakalanmanın mevcut olmasının 2B analiz sonuçlarına etkisi değerlendirilmiştir. 1B ve 2B sonuçları Şekil 21'de görüldüğü üzere benzer frekansta pik değerini vermektedir. 2B analizdeki çoklu pikler 1B analizde görülmüyor olması dalga alanının yalnızca düşey tabakalanma ile temsil edilemediğini gösterdiği düşünülse de bu etkisinin sınırlı olduğu görülmektedir. mHVSr eğrisinde 1B ve 2B analiz sonuçları ile uyumlu olması bunu desteklemektedir.



Şekil 21. Test sahası 4 için zemin modeli (üstte), 1 ve 2B zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması (altta)

Test sahası 1’de de saha 4’e benzer bir durum görülmektedir (Şekil 22). Transfer fonksiyonları benzer frekanslar pik oluşturmakta 2B etkisinin sınırlı olduğunu düşünülmektedir. Ancak mHVSr ve eHVSr eğrisinde transfer fonksiyonlarında görülmeyen yaklaşık 1.5 Hz pik frekansının topografya etkisinden kaynaklanıyor olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 22. Test sahası 1 için zemin modeli (üstte), 1 ve 2B zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması (altta)

#### 4.4. Derinlik-Frekans İlişkisinin Değerlendirilmesi

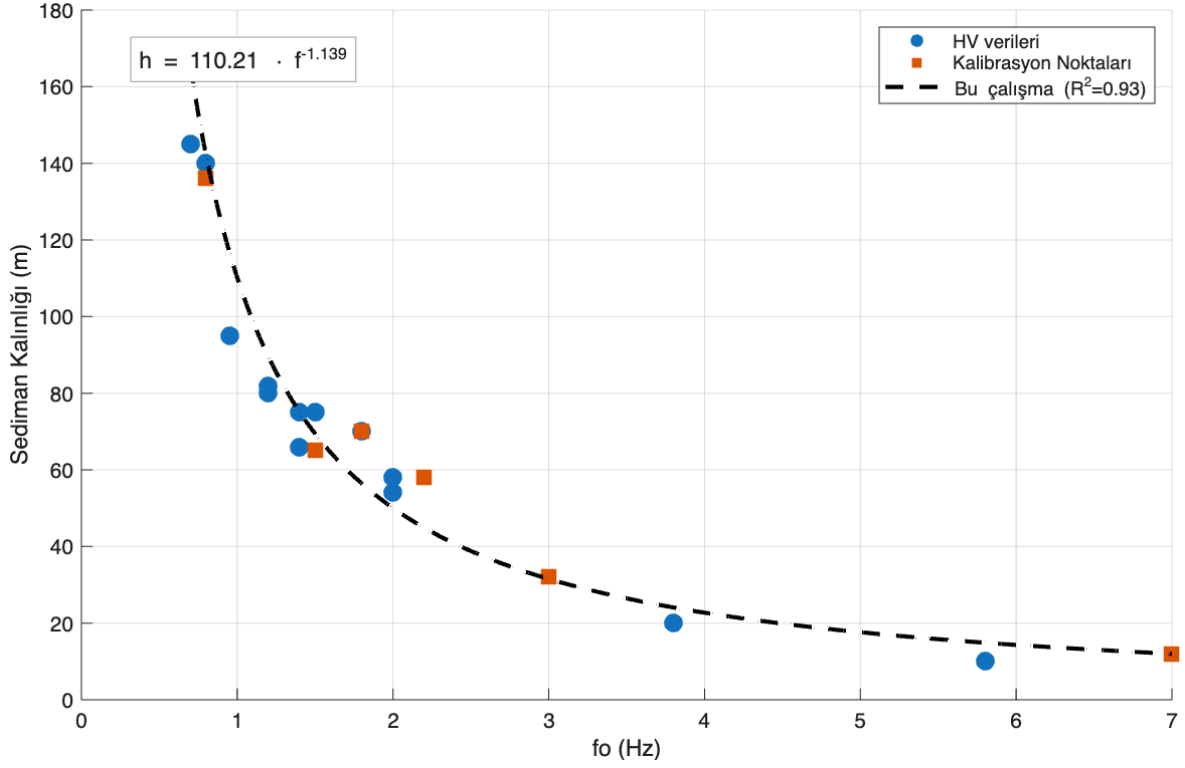
Zeminlerin sismik dalgalar karşısındaki rezonans davranışı, temel olarak kayma dalgası hızının ( $V_s$ ) ve tabaka kalınlıklarının kontrol ettiği doğal frekanslarla ilişkilidir. HVSR yöntemi ile belirlenen rezonans frekansı ( $f_0$ ), çoğu zaman yerel zemin tabakasının derinliği ( $H$ ) ile ters orantılı bir ilişki göstermektedir. Bu çalışmada, farklı ölçüm noktalarında elde edilen  $f_0$  değerleri ile yüzey dalgası analizlerinden türetilen  $V_s$  profilleri kullanılarak belirlenen zemin tabakası kalınlıkları arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

Çalışma sahasında yapılan analizlerde, rezonans frekanslarının özellikle 0.7–5 Hz aralığında yoğunlaştığı ve bu değerlerin, 15 ila 150 metre aralığında değişen zemin kalınlıkları ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Derinlik arttıkça rezonans frekansında belirgin bir azalma eğilimi izlenmiş, bu da teorik bağıntı ile genel uyum göstermiştir. Ayrıca, farklı jeolojik birimlerde aynı derinliklerde bile farklı  $f_0$  değerlerinin elde edilmesi, yalnızca kalınlık değil, aynı zamanda  $V_s$  değerlerinin de rezonans davranışını belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Bazı ölçüm noktalarında ise beklenenin dışında kalan frekans-derinlik ilişkileri tespit edilmiştir. Bu durumlar, çoğunlukla lateral heterojenite, basen kenar etkileri veya 2B dalga alanı etkilerinden kaynaklanmakta olup, rezonansın sadece dikey yapıya değil, aynı zamanda yatay varyasyonlara da bağlı olduğunu göstermektedir. Rezonans frekansı ile zemin kalınlığı arasında kurulan ilişki, mikro bölgeleme ve yerel zemin sınıflaması açısından pratik bir değerlendirme aracı sunmaktadır. Ancak bu ilişkinin doğruluğu,  $V_s$  dağılımının homojenliğine ve yapının 1B karakterine bağlıdır. Dolayısıyla, frekans-derinlik ilişkisi, sadece empirik formüllerle değil, çoklu jeofizik veri ve detaylı zemin profili analizleriyle desteklenmelidir.

Bu çalışmada, sediman kalınlığı ( $h$ ) ile zemin hakim frekansı ( $f_0$ ) arasındaki ilişkinin modellenmesinde Ağırlıklı En Küçük Kareler (Weighted Least Squares – WLS) yöntemi kullanılmıştır. Klasik En Küçük Kareler (Ordinary Least Squares – OLS) yaklaşımında tüm veri noktaları eşit ağırlıkla modele dahil edilirken, WLS yöntemi her veri noktasına güvenilirlik veya ölçüm kalitesi gibi kriterlere göre farklı ağırlıklar atayarak regresyon katsayılarını tahmin eder. Bu çalışmada, kalibrasyon amaçlı kullanılan veriler için ağırlık katsayısı 1.0, diğer ölçümler için ise 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu sayede, modelin katsayı tahminleri üzerinde güvenilir verilerin etkisi artırılmış, olası ölçüm belirsizliği yüksek verilerin ise etkisi azaltılmıştır.

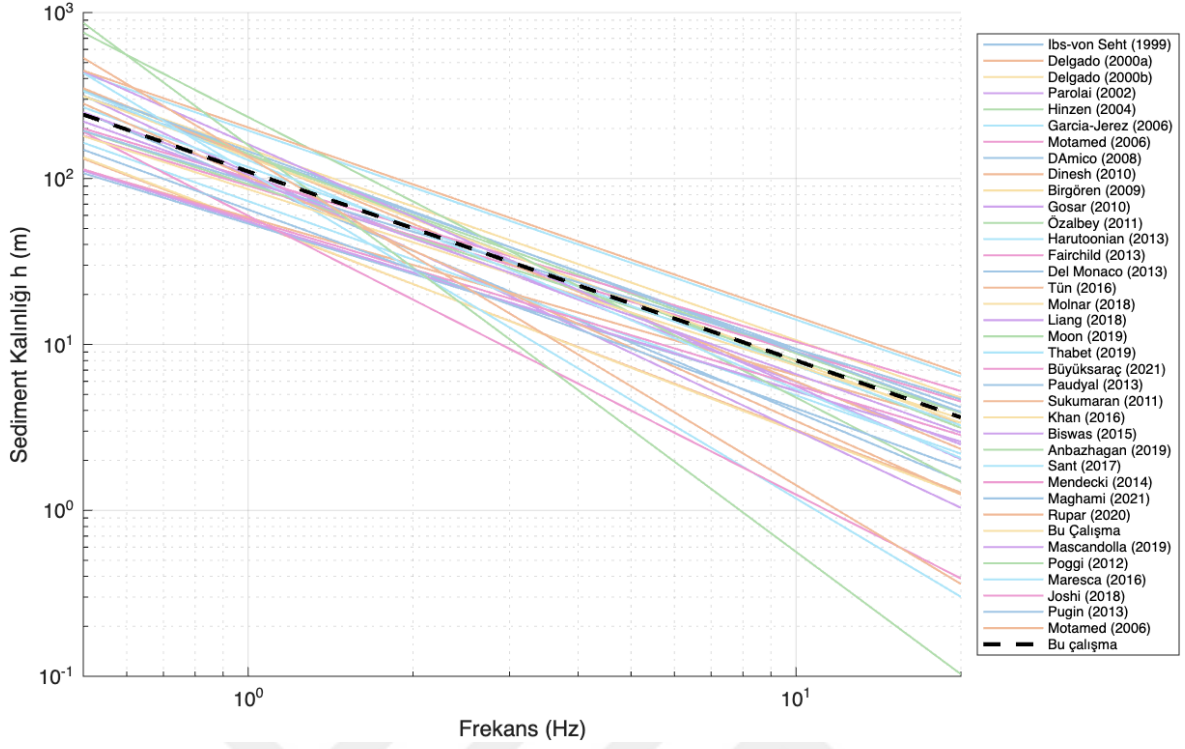
WLS yöntemi, hata terimlerinin varyansının değişken olması durumlarında daha tutarlı tahminler elde etmeye imkan tanır (Montgomery vd., 2012). Zemin hakim frekansı–kalınlık ilişkilerinde, farklı veri gruplarının ölçüm hassasiyeti ve belirsizlik düzeyleri değişebildiğinden, WLS yaklaşımı bu farklılıkları istatistiksel olarak dikkate alarak daha güvenilir bir regresyon modeli oluşturur. Modelin uyum performansı  $R^2$  katsayısı ile

değerlendirilmiş ve klasik OLS yöntemi ile karşılaştırıldığında, güvenilir veri noktaları ile daha tutarlı bir ilişki sağladığı gözlemlenmiştir. Analize ilişkin veri noktaları ve hesaplanan eğri Şekil 23'te ve Denklem 4.1'de verilmiştir.



Şekil 23.  $f_o$ - $h$  eğrisi

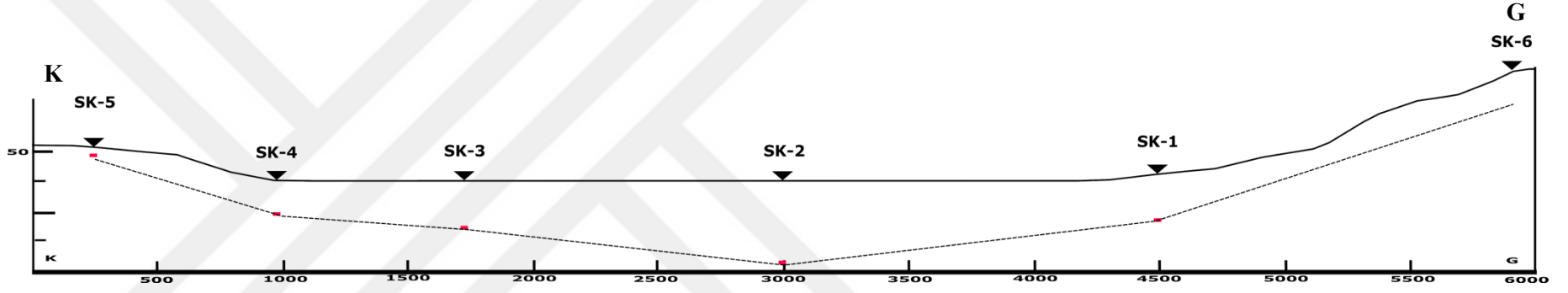
$$h = 110.21 f_o^{-1.139} \quad (4.1)$$



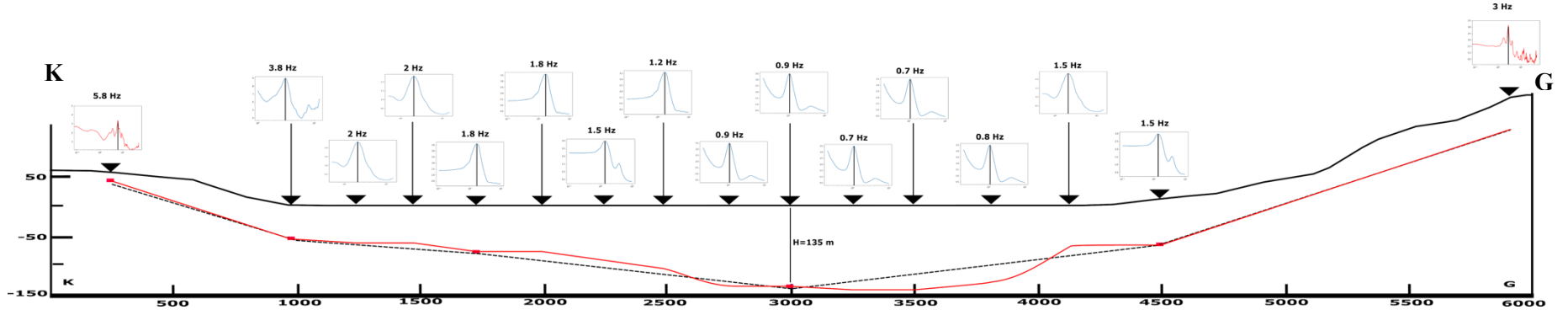
Şekil 24. Farklı çalışmalarda elde edilen frekans – sediman kalınlığı ( $f_o-h$ ) ilişkileri ile bu çalışmanın modelinin karşılaştırılması

#### 4.5. $f_o-h$ İlişkisinin Çanakkale Baseni Üzerine Uygulanması

Çanakkale Havzası, kalın alüvyon tabakaları ve karmaşık jeolojik yapısı ile bu tür bir ilişkinin uygulanmasına elverişli bir ortam sunmaktadır. Havza boyunca gerçekleştirilen HVSR ölçümleri ile elde edilen  $f_o$  değerleri, yüzey dalgası analizleri ve sondaj verilerinden belirlenen sediman kalınlıkları ile eşleştirilerek üretilen bağıntıya göre türetilmiştir. Bu sayede, çalışma alanında doğrudan derinlik verisinin bulunmadığı noktalarda yalnızca  $f_o$  değerleri ile sediman kalınlığı tahmin edilmiştir (Şekil 25 ve 26). Ayrıca bağıntısının bölgesel ölçekte geçerliliği test edilerek, farklı zemin türlerinin ve tabaka kalınlıklarının bu ilişki üzerindeki etkisi değerlendirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 25. Sondajların korelasyonu ile elde edilen basen modeli



Şekil 26. Üretilen ilişkisi ile elde edilen basen modeli

## BEŞİNCİ BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yerel zemin koşullarının dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve sedimanter basenlerin geometrisinin modellenmesi amacıyla yüzey dalgası analiz yöntemleri ile spektral oran yöntemleri birlikte değerlendirilmiştir. Çalışma alanında aktif (MASW) ve pasif (ReMi, SPAC) yüzey dalgası yöntemleri kullanılarak dispersiyon eğrileri elde edilerek frekans aralığını genişletmek amacıyla birleştirilmiş, ters çözüm ile kayma Vs profilleri oluşturulmuştur. Elde edilen Vs profilleri kuyu içi PS Logging ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan kalibrasyonlardan sonra test sahaları için zemin profilleri belirlenmiş ve bu zemin profillerinden 1B ve 2B zemin tepki analizlerine dayalı transfer fonksiyonları oluşturulmuştur. Ayrıca sahalar için ivme kayıtlarından ve çevresel gürültülerden HVSR eğrileri hesaplanmış ve sonuçları hem kendi içerisinde hemde transfer fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır. Tüm bu veri ve analizler dikkate alınarak basen geometrisi belirlenmiş ve saha genelinde uygulanabilir sediman kalınlığı-kaya derinliği bağıntısı üretilmiştir.

#### 5.1. Sonuçlar

Yüzey dalgası analiz yöntemleri, özellikle sismik mikrobölgeleme ve yerel zemin sınıflaması çalışmalarında, sedimanter yapıların düşey ve yatay sınırlarının belirlenmesinde temel araçlardan biri haline gelmiştir. Bu çalışmada MASW, ReMi ve SPAC yöntemlerinin entegre biçimde uygulanması sayesinde farklı derinliklerdeki zemin özellikleri ayrıntılı biçimde modellenmiştir. MASW yöntemi ile yüzeyden itibaren ilk 20–30 metrelik sığ tabakalar yüksek çözünürlükle görüntülenirken, ReMi ve SPAC yöntemleri daha düşük frekans bileşenlerine duyarlılıkları sayesinde >100 metre derinliğe kadar ulaşan yeraltı yapısının karakterizasyonunu mümkün kılmıştır. Üç yöntemde uygulanmasında ortak frekans aralıklarında yüksek uyum gözlenmiştir. Özellikle zemin tepki analizleri, derin jeolojik yapıların araştırılmasında pasif kaynaklı sismik yöntemler uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve aktif kaynaklı yöntemler ile denetlenebilirliği ile kuvvetli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Elde edilen dispersiyon eğrileri üzerinden gerçekleştirilen ters çözüm işlemleri ile her istasyon noktasında kayma dalgası hızı profilleri elde edilmiştir. Bu profiller, özellikle zemin/anakaya geçiş zonlarının tanımlanmasında kritik rol oynamış ve alüvyon kalınlığının mekansal dağılımı çıkarılmıştır. Zemin profil kesitlerinden oluşturulan haritalar, çalışma alanında doğu-batı doğrultusunda derinliği artan bir basen yapısının varlığını ortaya koymuştur. Basenin merkezinde 150 metreye ulaşan alüvyon kalınlıkları, kenar bölgelerde 10–20 metreye kadar azalmaktadır. Bu derinlik değişimleri, rezonans frekanslarında gözlemlenen mekansal farklılıkları da açıklamaktadır. Özellikle basen kenarlarında hızlı değişen tabaka kalınlıkları, yanal empedans kontrastlarının olduğunu ortaya koyabilmektedir.

Yüzey dalgası analizleri ile ortaya konan sonuçlar, sahadaki kuyu içi ölçümler ve HVSR verileriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Böylece, yüzey dalgası yöntemleri aracılığıyla sadece yeraltının hız yapısı değil, aynı zamanda basenin geometrisinin belirlenebilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

HVSR yöntemi, mHVSR hem de eHVSR kullanılarak, zeminin rezonans özelliklerini belirlemede yaygın ve pratik bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada iki veri türüyle yapılan HVSR analizleri, zeminin frekans bağımlı dinamik davranışını ortaya koymak açısından birbirini tamamlayıcı nitelikte değerlendirilmiştir. mHVSR eğrileri, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olmaları sayesinde geniş alanlarda yoğun ölçüm yapılmasına olanak tanımış; özellikle yüzey dalgalarının baskın olduğu ortamda rezonans frekansları açıkça tanımlanmıştır. eHVSR analizleri ise, sahaya özgü deprem kayıtları kullanılarak rezonans davranışının doğrudan sismik dalga alanı altında nasıl şekillendiğini göstermesi bakımından önemli katkılar sunmuştur. Ayrıca HVSR eğrisinin transfer fonksiyonları ile karşılaştırılabilmesi model doğruluğunu arttırabilmek açısından değerli olduğunu göstermektedir.

Analizler sonucunda mHVSR yönteminin özellikle empedans farkının olduğu zemin-kaya arayüzlerinde net sonuçlar verdiği, ancak basen kenarı veya sert zeminler üzerinde yapılan ölçümler düz eğri hesaplandığı görülmüştür. Ayrıca mHVSR yönteminde

genlik değerlerinin ortam bağımlı olduğu bu yüzden büyütme değerlendirmesinde anlamlı sonuçlar vermediği bir kez daha anlaşılmıştır. Deprem kayıtlarından elde edilen eHVSR eğrilerinin de kendi içinde değerlendirilmesinde veri sayısı, veri kalitesi ve istasyonun bulunduğu ortamın sinyal/gürültü seviyesinin analizlere etkisi olduğu görülmüştür.

Vs profillerine dayalı olarak gerçekleştirilen 1B lineer zemin tepki analizleriyle elde edilen teorik transfer fonksiyonları, spektral oran eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Gözlemsel ve teorik eğriler arasında rezonans frekansları açısından büyük ölçüde uyum sağlanmıştır. Bu da yüzey dalgası verilerine dayalı olarak elde edilen Vs profillerinin, saha koşullarını temsil etme düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak bazı noktalarda frekans kaymaları veya genlik farkları gözlenmiş; bu durumlar lateral heterojenite, 2B geometri etkileri veya yeraltı yapıdaki ani geçişlerin varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Genel olarak, zemin tepki analizlerinin saha verileri ile desteklenmesi, modelleme sonuçlarının geçerliliğini artırmakta ve rezonans davranışlarının daha güvenilir biçimde yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada 1B ve 2B lineer elastik model ile gerçekleştirilen zemin tepki analizlerinden elde edilen transfer fonksiyonları saha verileri ile karşılaştırılmıştır. Lineer elastik modelin transfer fonksiyonunun hesaplanmasındaki temel girdi parametresi zemin rijitliği saha sismik ölçümlerinden belirlenmiştir. Bu sayede mHVSR ve eHVSR ölçümleri bu analizlerden bağımsız karşılaştırma imkanı sunmuştur. Bu sayede zemin hız modelinin doğrulanması imkanıda sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar HVSR ölçümlerinin tepki analizlerinde oluşturulan modelin transfer fonksiyonu ile karşılaştırılmasının yapılacak farklı zemin davranış analizlerinde model doğruluğunu arttırmakta kullanılabileceğini göstermektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu çalışmada ulaşılan sonuçlar, yüzey dalgası yöntemleri, HVSR ve zemin tepki analizlerinin birlikte kullanımının zemin karakterizasyonu açısından güvenilir ve etkin bir

yaklaşım olduğunu göstermiştir. Ancak bu yöntemlerin sunduğu verilerin doğruluğunu ve etkinliğini artırmak için bazı ek önerilerde bulunulabilir.

İlk olarak, yüzey dalgası spektral analiz ve mHVSR yöntemlerinin; mikrobölgeleme çalışmaları, sahaya özel zemin araştırmaları ve jeolojik yapıların belirlenmesinde daha geniş alanda ve yoğun ölçüm aralıkları ile uygulanması önerilmektedir. Ölçümlerin yalnızca sondajlar arası tamamlayıcı olarak değil, sahada veri kalibrasyonunu sağlamak için mutlaka sondaj noktalarında da uygulanması önemli görülmektedir. Özellikle SPAC yöntemi düşük frekans bileşenlerinin daha net ölçülmesini sağlayarak derin tabaka yapılarının çözünürlüğünü artıracaktır. MASW ve ReMi ölçümlerinin farklı hat doğrultularında tekrarlanması, yanal heterojenitelerin ve basen kenar etkilerinin daha güvenilir bir şekilde belirlenmesine katkı sunacaktır.

HVSR analizlerinde sadece yatay/düşey değil, azimuth analizlerinde sahasının boyut karakteristiği açısından önemli bilgiler taşıdığı görülmektedir. Bu nedenle mHVSR verilerinin özellikle mikrobölgeleme çalışmalarında azimuth analizlerinde dahil edilmesi sahadaki ileri araştırmalar açısından avantaj sağlayacaktır.

Deprem istasyonları özellikle sert zemin ve kaya ortamlarda oluşturularak frekans haritalarının çıkarılması, basen geometrisinin iki boyutlu karakteristiklerinin daha net anlaşılmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, mHVSR ve eHVSR yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, deprem kayıtlarının zeminin rezonans davranışı üzerindeki etkisini daha gerçekçi şekilde yansıtmaktadır. Bu nedenle, ilerleyen çalışmalarda sahaya özgü deprem senaryolarına dayalı daha fazla eHVSR analizi yapılması önerilir.

Zemin tepki analizleri açısından, yalnızca 1B modellerin değil, 2B ve 3B sonlu fark veya sonlu eleman yöntemlerinin kullanılması, basen kenar etkilerinin ve karmaşık dalga yayılımının daha iyi anlaşılmasına olanak tanır. Özellikle bu çalışmada belirlenen kenar bölgelerin geometrik etkilerin olup olmadığının ortaya çıkarılması 2B analizlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın bulguları ışığında, kentsel alanlarda uzun dönemli mikrotremör ölçümlerinin periyodik olarak tekrarlanması ve deprem sonrası zemin davranışının izlenmesi de önerilmektedir. Bu tür izleme çalışmaları, zemin özelliklerinde olası değişimleri tespit etmeye yardımcı olur ve deprem sonrası hasar dağılımlarının açıklanmasında önemli bilgiler sağlar.

Son olarak, bu çalışmada önerilen çok yöntemli yaklaşımın mikrobölgeleme ve sismik risk haritalama projelerine entegre edilmesi faydalı olacaktır. Böylece elde edilen bilimsel veriler, yerleşim planlaması, afet yönetimi ve mühendislik tasarımlarına doğrudan katkı sağlayacak, bölgesel sismik tehlikenin daha güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır.

Özellikle eHVSR eğrilerinde gözlenen daha yüksek genlikli rezonans tepeleri, deprem kaynaklı dalga alanının zeminde oluşturduğu daha güçlü hareketlerin bir yansıması olarak değerlendirilmektedir. Bu gözlem, zemin tepki analizlerinde kaynak özelliklerinin ve giriş hareketlerinin doğru temsil edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Diğer yandan, mHVSR eğrileri ile teorik transfer fonksiyonları arasındaki benzerlik, çevresel gürültü ölçümlerinin düşük maliyetli ve etkili bir ön değerlendirme aracı olduğunu desteklemektedir. Saha verileri ile sayısal zemin tepki analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, modelleme doğruluğunu artırmakta ve yerel zemin koşullarının sismik dalga yayılımı üzerindeki etkilerini daha güvenilir biçimde ortaya koymaktadır.

## KAYNAKÇA

- Bard, P. Y. ve Bouchon, F. (1985). “The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (2), 519–541.
- Chávez-García, F. J. ve Faccioli, E. (2000). “Complex site effects and building codes: Making the leap”. *Journal of Seismology*, 4(1), 23–40.
- Ktenidou, O. J., Darragh, R. B., Stewart, J. P. ve Seyhan, E. (2015). “Site response in NGA-West2: Comparison of site amplification factors from ground motion data and response simulations”. *Earthquake Spectra*, 31(1), 1–26.
- Fäh, D., Kind, F. ve Giardini, D. (2001). “A theoretical investigation of average H/V ratios”. *Geophysical Journal International*, 145(2), 535–549.
- Cadet, H., Bard, P. Y., Duval, A. M. ve Bertrand, E. (2012). “Use of microtremor recordings for site effects assessment: The case of the Grenoble basin”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 115–137.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.003>
- Molnar, S., Cassidy, J. F. ve Dosso, S. E. (2018). “Application of the H/V spectral ratio method to assess site effects in the Georgia Basin, British Columbia”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109, 143–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.021>
- Socco, L. V., Foti, S. ve Boiero, D. (2010). “Surface-wave analysis for building near-surface velocity models—Established approaches and new perspectives”. *Geophysics*, 75(5), 75A83–75A102. <https://doi.org/10.1190/1.3479491>
- Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J. ve Strobbia, C. (2014). “Surface wave methods for near-surface site characterization”. CRC Press, Boca Raton, FL. <https://doi.org/10.1201/b16610>
- SESAME (2004). “Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations – Measurements, processing and interpretation”. SESAME European Research Project, Report D23.12, 62 pp.  
[https://www.geopsy.org/documentation/SESAME/HV\\_User\\_Guidelines.pdf](https://www.geopsy.org/documentation/SESAME/HV_User_Guidelines.pdf)

- Hobiger, M., Bard, P. Y., Cornou, C. ve Le Bihan, N. (2012). “Single-station horizontal-to-vertical spectral ratio processing on a large set of ambient vibration recordings”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6), 2436–2451. <https://doi.org/10.1785/0120110247>
- Mucciarelli, M. ve Gallipoli, M. R. (2001). “A critical review of HVSR method: Promises and limitations”. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42(3-4), 245–266.
- Hallal, M. M. ve Cox, B. R. (2021a). “Simulated microtremor array and H/V analyses using finite-difference wave propagation”. *Earthquake Spectra*, 37(1), 356–379. <https://doi.org/10.1177/8755293020952122>
- Chatzis, K., Pitilakis, K. ve Manakou, M. (2022). “Evaluation of HVSR and ellipticity curves from ambient noise in complex site conditions”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 4135–4166. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01383-w>
- Maghami, M., Cox, B. R. ve Hallal, M. M. (2021). “Using HVSR to quantify the variability of site period estimates and the corresponding uncertainty in site classification”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140, 106408. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106408>
- Cheng, W., Liu, H., Wu, J. ve Li, Z. (2020). “Evaluation of site effects using microtremor measurements in Nanjing City, China”. *Journal of Applied Geophysics*, 179, 104108. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104108>
- Wang, Y., Xie, J., Wang, Y. ve Zhou, H. (2023). “Investigation of shallow subsurface structure using the joint inversion of H/V and dispersion curves in Xi’an, China”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 168, 107424. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107424>
- Saadi, H., Mehani, Y., Slimani, S. ve Boumekik, T. (2023). “Characterization of site effects using microtremor records: Case of the urban area of Constantine, Algeria”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 1981–2012. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01630-1>
- Park, C. B., Miller, R. D. ve Xia, J. (1999). “Multichannel analysis of surface waves”. *Geophysics*, 64(3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>

- Borges, J., Assumpção, M. ve Pino Neto, F. (2016). “Comparison of HVSR, SSR and S-wave velocity profile in NE Brazil”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.06.015>
- Comina, C., Foti, S., Boiero, D., Socco, L. V. ve Cavallaro, D. (2023). “Joint inversion of Rayleigh wave dispersion and HVSR curve: Review of issues and applications”. *Near Surface Geophysics*, 21(2), 177–195. <https://doi.org/10.1002/nsg.12279>
- Nakamura, Y. (1989). “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), 30(1), 25–33.
- Ibs-von Seht, M. ve Wohlenberg, J. (1999). “Microtremor measurements used to map thickness of soft soil sediments”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 250–259.
- Delgado, J., Casado, C. L., Estevez, A., Giner, J., Cuenca, A. ve Molina, S. (2000a). “Mapping soft soils in the Segura River Valley (SE Spain): A case study of microtremors as an exploration tool”. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 19–32.
- Delgado, J., Casado, C. L., Giner, J., Estevez, A., Cuenca, A. ve Molina, S. (2000b). “Microtremors as a geophysical exploration tool: Applications and limitations”. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 1445–1462.
- Parolai, S., Bormann, P. ve Milkereit, C. (2002). “New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany)”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2521–2527.
- Hinzen, L.-G., Weber, B. ve Scherbaum, F. (2004). “On the resolution of H/V measurements to determine sediment thickness: A case study across a normal fault in the Lower Rhine Embayment, Germany”. *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 909–926. <https://doi.org/10.1080/13632460409350514>
- García-Jerez, A., Luzón, F., Navarro, M. ve Pérez-Ruiz, J. A. (2006). “Characterization of the sedimentary cover of the Zafarraya Basin, southern Spain, by means of ambient

- noise”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 957–967.  
<https://doi.org/10.1785/0120050061>
- Motamed, R., Ghalandarzadeh, A., Tawhata, I. ve Tabatabaei, S. H. (2007). “Seismic microzonation and damage assessment of Bam City, south-eastern Iran”. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(1), 110–132.  
<https://doi.org/10.1080/13632460601123164>
- D’Amico, V., Picozzi, M., Baliva, F. ve Albarello, D. (2008). “Ambient noise measurements for preliminary site-effects characterization in the urban area of Florence, Italy”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(3), 1373–1388.  
<https://doi.org/10.1785/0120070231>
- Birgören, G., Özel, O. ve Siyahi, B. (2009). “Bedrock depth mapping of the coast south of Istanbul: Comparison of analytical and experimental analyses”. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 18, 315–329. <https://doi.org/10.3906/yer-0712-3>
- Dinesh, B. V., Nair, G. J., Prasad, A. G. V., Nakkeeran, P. V. ve Radhakrishna, M. C. (2010). “Estimation of sedimentary layers shear-wave velocity using microtremor H/V ratio measurements for Bangalore City”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 1377–1382. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.012>
- Gosar, A. ve Lenart, A. (2010). “Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor Basin (Slovenia) using microtremors”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 501–518. <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9115-8>
- Özalaybey, S., Zor, E., Ergintav, S. ve Tapırdamaz, M. C. (2011). “Investigation of 3-D basin structures in the Izmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods”. *Geophysical Journal International*, 186, 883–894.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05085.x>
- Sukumaran, P., Parvez, I. A., Sant, D. A., Rangarajan, G. ve Krishnan, K. (2011). “Profiling of late Tertiary–early Quaternary surface in the lower reaches of Narmada Valley using microtremors”. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 325–334.
- Poggi, V., Fäh, D., Burjanek, J. ve Giardini, D. (2012). “The use of Rayleigh-wave ellipticity for site-specific hazard assessment and microzonation: Application to the city of

- Lucerne, Switzerland”. *Geophysical Journal International*, 188(3), 1154–1172.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05305.x>
- Del Monaco, F., Tallini, M., De Rose, C. ve Durante, F. (2013). “HVNSR survey in historical downtown L’Aquila (central Italy): Site resonance properties vs. subsoil model”. *Engineering Geology*, 158, 34–47.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.008>
- Fairchild, G. M., Lane, J. W., Voytek, E. B. ve LeBlanc, D. R. (2013). Bedrock topography of western Cape Cod, Massachusetts, based on bedrock altitudes from geologic borings and analysis of ambient seismic noise by the horizontal-to-vertical spectral-ratio method. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3233, 1 sheet, maps variously scaled, 17 s.
- Harutoonian, P., Leo, C. J., Tokeshi, K., Doanh, T., Castellaro, S., Zou, J. J., Liyanapathirana, D. S. ve Wong, H. (2013). “Investigation of dynamically compacted ground by HVSr-based approach”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.12.004>
- Paudyal, Y. R., Yatabe, R., Bhandary, N. P. ve Dahal, R. K. (2013). “Basement topography of the Kathmandu Basin using microtremor observation”. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 627–637. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.011>
- Pugin, J.-M. A., Pullan, S. E. ve Hunter, J. A. (2013). “Shear-wave high-resolution seismic reflection in Ottawa and Quebec City, Canada”. *The Leading Edge*, 32(3), 250–255.  
<https://doi.org/10.1190/tle32030250.1>
- Mendecki, M. J., Bieta, B. ve Mycka, M. (2014). “Determination of the resonance frequency–thickness relation based on the ambient seismic noise records from Upper Silesia Coal Basin”. *Contemporary Trends in Geoscience*, 3, 41–51.  
<https://doi.org/10.2478/ctg-2014-0021>
- Biswas, R., Baruah, S. ve Bora, D. K. (2015). “Mapping sediment thickness in Shillong City of Northeast India through empirical relationship”. *Journal of Earthquakes*, 2015, 572619. <https://doi.org/10.1155/2015/572619>

- Khan, S. ve Khan, M. A. (2016). “Mapping sediment thickness of the Islamabad City using empirical relationships: Implications for seismic hazards assessment”. *Journal of Earth System Science*, 125(3), 623–644.
- Maresca, R. ve Berrino, G. (2016). “Investigation of the buried structure of the Volturara Irpina Basin (southern Italy) by microtremor and gravimetric data”. *Journal of Applied Geophysics*, 128, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.010>
- Tün, M., Pekkan, E., Özel, O. ve Güney, Y. (2016). “An investigation into the bedrock depth in the Eskişehir Quaternary Basin (Turkey) using the microtremor method”. *Geophysical Journal International*, 207(1), 589–607. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw294>
- Sant, D. A., Parvez, I. A., Rangarajan, G., Patel, S. J., Bhatt, M. N. ve Salam, T. A. S. (2017). “Subsurface profiling along Banni Plains and bounding faults, Kachchh, Western India using microtremors method”. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.06.002>
- Joshi, A., Sant, D., Parvez, I., Rangarajan, G., Limaye, M., Mukherjee, S., Charola, M., Bhatt, M. ve Mistry, S. (2018). “Subsurface profiling of granite pluton using microtremor method: Southern Aravalli, Gujarat, India”. *International Journal of Earth Sciences*, 107(1), 191–201. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1482-9>
- Liang, D., Gan, F., Zhang, W. ve Jia, L. (2018). “The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China”. *Environmental Earth Sciences*, 77, 259. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7439-x>
- Anbazhagan, P., Janarthana Boobalan, A. ve Shaivan, H. S. (2019). “Establishing empirical correlation between sediment thickness and resonant frequency using HVSR for the Indo-Gangetic Plain”. *Current Science*, 117(9), 1482–1491. <https://doi.org/10.18520/cs/v117/i9/1482-1491>
- Mascandola, C., Massa, M., Barani, S., Albarello, D., Lovati, S., Martelli, L. ve Poggi, V. (2019). “Mapping the seismic bedrock of the Po Plain (Italy) through ambient-vibration monitoring”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 164–177. <https://doi.org/10.1785/0120180193>

- Moon, S. W., Subramaniam, P., Zhang, Y., Vinoth, G. ve Ku, T. (2019). “Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: Empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore”. *Journal of Applied Geophysics*, 171, 103866.
- Thabet, M. (2019). “Site-specific relationships between bedrock depth and HVSr fundamental resonance frequency using KiK-NET data from Japan”. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 4809–4831. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02256-7>
- Rupar, L. ve Gosar, A. (2020). “Mapping the thickness of Quaternary sediments in the Iška alluvial fan (central Slovenia) using microtremor method”. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(2 (198)), 177–190. <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0013>
- Büyüksaraç, A., Bekler, T., Demirci, A. ve **Eyisüren O.** (2021). “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*, 14, 2086. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08430-3>
- Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., Işık, E., Över, S. ve Kaçın, S. (2023). “Investigation of site characterization and vulnerability in Antakya (Turkey) under basin effect”. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (Erzincan University Journal of Science and Technology)*, 16(2), 548–570. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1087462>
- Hallal, M. M., Maghami, M. ve Cox, B. R. (2023). “A data-driven approach to evaluate site period estimation uncertainty from ambient noise HVSr analyses”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 169, 107446. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107446>
- Cipta, A., Asano, T. ve Kiyota, T. (2018). “Microtremor array exploration and HVSr method for site response evaluation in Jakarta”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 111, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.018>
- Badreldin, N., Abo El Ezz, A., El-Hady, M. A. ve El-Hussain, I. (2023). “Shear-wave velocity profiling and site characterization using the HVSr technique: A case study from the United Arab Emirates”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 167, 107414. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107414>

- Agostini, C., Foti, S., Parolai, S. ve Picozzi, M. (2015). “Characterization of the shallow structure of Catania (Italy) through joint inversion of Rayleigh wave dispersion and HVSR curves”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(8), 2323–2344. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9722-6>
- Hallal, M. M. ve Cox, B. R. (2021b). “A data-driven framework for evaluating the accuracy and uncertainty of site period estimations from H/V spectral ratio analyses”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140, 106489. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106489>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Stewart, J. P., Afshari, K. ve Hashash, Y. M. A. (2014). Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analyses for ground motion prediction. PEER Report 2014/16, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Xia, J., Miller, R. D. ve Park, C. B. (1999). “Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves”. *Geophysics*, 64(3), 691–700. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- Louie, J. N. (2001). “Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
- Aki, K. (1957). “Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors”. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415–457.
- Asten, M. W. (2006). “On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods”. *Geophysics*, 71(6), V153–V162. <https://doi.org/10.1190/1.2356114>
- Okada, H. (2003). *The microtremor survey method*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801740>

- Şentürk, K. ve Karaköse, C. (1987). “Çanakkale yöresi jeolojisi ve Kuvaterner birimlerinin mühendislik özellikleri”. *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 11, 107–120.
- Saltık, M. A. (1974). “Biga yarımadası ve dolayının jeolojisi”. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 83, 1–44.
- Sümengen, M., Erkal, T. ve Tekirli, M. E. (1987). “Biga yarımadasının jeolojisi ve tektonik evrimi”. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 30(1), 29–38.
- Atabey, E., Arpat, E., Emre, Ö., Barka, A., Karahan, S., Sarıkaya, H. ve Yiğitbaş, E. (2004). “Türkiye diri fay haritası açıklama raporu (1. Baskı)”. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını*, Ankara.
- Siyako, M. (2006). “Çanakkale–Biga–Bozcaada dolayının stratigrafisi ve tektonik evrimi”. *Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) Raporu*, 6189, Ankara.
- İlgar, A., Demirci, E. S., Duru, M., Pehlivan, Ş., Dönmez, M. ve Akçay, A. E. (2008). H15–H16 Paftası Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Ankara.
- Kaneko, F., Yamanaka, H. ve Ishihara, K. (1990). “Effects of irregular subsoil layers on surface ground motions”. *Soils and Foundations*, 30(3), 73–83. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.30.3\\_73](https://doi.org/10.3208/sandf1972.30.3_73)
- Roten, D., Fäh, D., Cornou, C. ve Giardini, D. (2006). “Two-dimensional resonances in Alpine valleys identified from ambient vibration wavefields”. *Geophysical Journal International*, 165(3), 889–905. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02935.x>
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. ve Bard, P. Y. (2006). “The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review”. *Earth-Science Reviews*, 79(3–4), 205–227. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.07.004>