

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI TRENLERİN ÜRETTİĞİ TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI
İÇİN ÖNERİLEN BİR DALGA BARIYER MODELİNİN YERİNDE
ÖLÇÜMLERLE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Berna İSTEGÜN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

TEMMUZ 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI TRENLERİN ÜRETTİĞİ TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI
İÇİN ÖNERİLEN BİR DALGA BARIYER MODELİNİN YERİNDE
ÖLÇÜMLERLE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Berna İSTEGÜN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

TEMMUZ 2024

Berna İSTEGÜN tarafından hazırlanan “Yüksek Hızlı Trenlerin Ürettiği Titreşimlerin Azaltılması İçin Önerilen Bir Dalga Bariyer Modelinin Yerinde Ölçümlerle Etkinliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 22.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Yapı** Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof.Dr.Erkan ÇELEBİ (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr.Abdullah Can ZÜLFİKAR İstanbul Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr.Osman KIRTEL Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç.Dr.Aydın DEMİR Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr.Öğr.Üyesi Zeki ÖZCAN Sakarya Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Yüksek Hızlı Trenlerin Ürettiği Titreşimlerin Azaltılması İçin Önerilen Bir Dalga Bariyer Modelinin Yerinde Ölçümlerle Etkinliğinin Araştırılması” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(22/07/2024)

Berna İSTEGÜN





Yaşı(ya)madan ölenlere...



TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı bilgeliği ve rehberliği ile mümkün kılan, güçlü karakterinden ve olaylara bakış açısından ilham aldığım kıymetli danışmanım Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye minnettarım. Kendisinden akademik ve insani boyutta öğrendiklerimin hayatımdaki katma değeri yadsınamaz bir ölçektir.

Doktora araştırmamın geliştirilmesine katkıda bulunan ve dahil olduğumuz proje kapsamında iş birliği içerisinde olduğumuz başta Doç. Dr. Osman KIRTEL olmak üzere Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR ve Doç. Dr. Fatih GÖKTEPE'ye; tez izleme komitemde olma nezaketini göstererek kıymetli vaktini ve fikirlerini benimle paylaşan Doç. Dr. Aydın DEMİR'e ve tez savunma jürimde bulunan Dr. Öğr. Üyesi Zeki ÖZCAN'a teşekkür ederim. Akademik çalışmalarımın her aşamasında ve sosyal hayatımda birlikte vakit geçirmekten büyük mutluluk duyduğum yol arkadaşlarım Arş.Gör. Muhammet Burhan NAVDAR'a ve İnşaat Yüksek Mühendisi Ayşenur SUBAŞI'ya bu zorlu yolculuğu daha katlanılabilir kıldıkları ve tezimin her bir sayfasının oluşmasında emekleri olduğu için şükranlarımı ifade ediyorum. Çalışmamın nümerik modelleme bölümünde desteğini esirgemeyen, sorularımı sabır ve içtenlikle yanıtlayan değerli arkadaşım Dr. Abdul Ahad FAIZAN'a teşekkürlerimi iletiyorum. Ayrıca bu süreç boyunca kıymetli arkadaşlığı ve desteğiyle yanımda olan Dr. Özge ŞAHİN ÇETİN'e, aramıza giren fiziksel mesafelere karşın dostluğunu kalbimde taşıdığım İnşaat Yüksek Mühendisi Derya SADAK'a ve Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Doktora serüvenim boyunca ne zaman yolumu kaybettiğimi düşünsem pusulam, tez savunmamı başarıyla tamamlayıp ailemle kucaklaştığım duygusal ama gururlu bir anı zihnimde canlandırmaktı. Hayal dünyamda bile bana bu kadar iyi gelen sevgili babam ve anneme kalpten teşekkür ederim. Çocukluk yıllarında aynı odayı paylaşırken -o yılların telaşlarda hızla geçeceğini- ve ayrı şehirlere taşınan hayatlarımızdan ötürü kendilerini bu denli özleyebileceğimi hesap edemediğim kardeşlerime biraz hasret barındıran bir teşekkürü borç bilirim. Pozitif ve uygulamalı bilimlerle uğraşan ancak bu rasyonalist sürecin kaskatılığını edebiyat ile seyreltmeye çalışan birisi olarak sabrımın tükendiği zamanlarda okuduğum tüm şiirlerin şairlerine sonsuz teşekkürler.

Dört tarafı çöllerle çevrili bir kara parçası gibi hissettiğim anlarda, içimde akan duru bir nehir -yeğenim Selim'e- en büyük teşekkürlerimi sunmazsam gülüşüyle hayatımda antidepresan görevi gördüğü onlarca ana haksızlık olurdu.

Son olarak bu tez çalışmasının 217M427 numaralı 1001 projesi kapsamında desteklendiğini belirtir, bu vesile ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkürlerimi sunarım.

Berna İSTEGÜN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. İlgili Çalışmalar	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	17
2. ZEMİNDE TİTREŞİM DALGALARININ YAYILIMI VE DALGA GENLİKLERİNİN AZALTILMASINA İLİŞKİN YÖNTEMLERE GENEL BİR BAKIŞ	21
2.1. Zemin Ortamında Dalga Yayılımı	21
2.1.1. Rayleigh Dalgalarının Yansıması ve İletimi	25
2.2. Titreşimlerin Ölçülmesi ve Azaltılmasına İlişkin Yöntemler	34
3. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİNİN YAKIN ÇEVREDE OLUŞTURDUĞU TİTREŞİMLERİN ARAŞTIRILMASI VE AZALTILMASINA İLİŞKİN SAHA ÇALIŞMALARI	39
3.1. Yüksek Hızlı Tren Setinin ve Demiryolu Alt Yapısının Genel Özellikleri	39
3.2. Deney Sahası Jeofizik ve Geoteknik Özelliklerine Genel Bir Bakış	40
3.3. Titreşim Ölçüm Setinin Karakteristikleri ve Veri Alım Süreci	46
3.4. Ölçüm Cihazlarının Yerleşim Düzeni	51
3.5. Deney Sahasında Gerçekleştirilen Ölçümler	54
3.5.1. Serbest zemin yüzey titreşimlerinin ölçülmesi	54
3.5.1.1. Yalıtım bariyersiz test sahasında serbest zemin yüzey titreşimlerinin analizi	55
3.5.1.2. Yalıtım bariyerli test sahasında serbest zemin yüzey titreşimlerinin analizi	59
3.5.2. Bina titreşimlerinin ölçülmesi	86
3.5.2.1. Yalıtım bariyersiz test sahasında bina titreşimlerinin analizi	87
3.5.2.2. Yalıtım bariyerli test sahasında bina titreşimlerinin analizi	88
4. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİ KAYNAKLI ÇEVRESEL TİTREŞİM PROBLEMİNİN PLAXIS 3D SONLU ELEMANLAR YAZILIMI İLE MODELLENMESİ	109

4.1. Zemin Ortamı ve Demiryolu Üstyapısının Sayısal Modeli ve Etkili Parametreler	110
4.2. Hızlı Tren Yükünün Modele Uyarlanması ve Simülasyonu	114
4.3. Zemin-Demiryolu-Hızlı Tren Modelinin Analizi.....	119
4.3.1. Zemin modelinin doğrulanması	121
4.3.2. Gaz beton hendekli sonlu eleman modelinin doğrulanması.....	127
4.3.3. Yönetici parametrelere bağlı uygulamalar	131
4.3.3.1. Bariyer derinliğinin çevre titreşimleri üzerindeki etkisinin incelenmesi	131
4.3.3.2. Bariyer yoğunluğunun çevre titreşimleri üzerindeki etkisinin incelenmesi.....	135
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	139
KAYNAKLAR.....	145
ÖZGEÇMİŞ.....	155



KISALTMALAR

D-B	: Doğu-Batı yönü
EW	: Hatta paralel (East-West)
EPS	: Genleştirilmiş polistiren (Expanded Polystyren Foam)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
FDD	: Frekans alanı ayrıklaştırma metodu
K-G	: Kuzey-Güney yönü
MASW	: Çok kanallı yüzey dalgası (Multichannel Analysis of Surface Waves)
M150_1018	: Saat 10.18 tren geçişi için M150 cihazından elde edilen kayıt
NEHRP	: National Earthquake Hazards Reduction Program
NS	: Hatta dik (North-South)
PGA	: Pik ivme genlik değeri (Peak Ground Acceleration)
PGD	: Pik yerdeğiştirme değeri (Peak Ground Displacement)
PGV	: Pik yer hızı değeri (Peak Ground Velocity)
PPA	: Maksimum parçacık ivmesi (Peak Particular Acceleration)
PPV	: Maksimum parçacık hızı (Peak Particular Velocity)
SPT-N	: Standart Penetrasyon Deneyi darbe sayısı
SZ	: Serbest zemin
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
U-D	: Düşey doğrultu (Up-Down)
YHT	: Yüksek hızlı tren
RMS	: Karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Square)
3D	: Üç boyutlu (three-dimensional)



SİMGELER

A	: Zemin büyütmesi ($(V_s)_{30}$)
B	: Giriş matrisi
c_b	: Viskoz sönüm katsayısı
d	: Yoğunluk
D	: Sönüm oranı
E	: Elastisite modülü
E_n	: Enerji iletimi
f	: Titreşim kaynağının baskın frekans değeri
F_z	: Dingil yükü
G	: Kayma modülü
h	: Derinlik/tabaka kalınlığı
H	: Bariyer derinliği
k_b	: Rijitlik katsayısı
k_s	: Zemin yatak katsayısı
K	: Bulk modülü
L	: Bariyer uzunluğu
L_v	: Desibel cinsinden hız seviyesi
n	: Geometrik sönümleme katsayısı
q_a	: Emniyetli taşıma gücü
q_s	: Zemin emniyet gerilmesi
q_u	: Zemin taşıma gücü
r_{1,2}	: Ölçüm noktalarının titreşim kaynağına olan uzaklığı
T₀	: Hâkim titreşim periyodu
T_{a-b}	: Zemin hâkim titreşim periyodu aralığı
V	: Hareket hızları
V_{dB}	: İnsan algısı bakımından titreşim hız seviyeleri
V_P	: P dalgası hızı
V_R	: Rayleigh dalgalarının yayılma hızı
V_{ref}	: Referans hız değeri (1×10^{-8} m/s)
V_{RMS}	: Hızın kuadratik ortalaması

V_s	: S dalgası hızı
V_{s30}	: 30 m derinlikteki ortalama kayma dalgası hızı
W	: Bariyer genişliği
w_2/w_1	: Titreşim genliklerinin azalım oranı
x	: Dinamik yük kaynağına olan mesafe
y	: x 'e bağlı pik ivme genlik değeri
Z_1	: Zemin empedansı
ZC	: Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları
ZD	: Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	: Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları
α	: Malzeme sönümleme katsayısı
α_0	: Zemin tipine göre değişen frekanstan bağımsız sönümleme katsayısı
γ	: Birim hacim ağırlık
λ	: Yer hareketi etki vektörü
μ	: Poisson oranı
Δt	: Zaman aralığı

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Titreşimlerin ölçülmesi ve azaltılmasına ilişkin önceki çalışmalar.	35
Tablo 2.2. Mevcut çalışmalarda dikkate alınan titreşim kaynakları.	36
Tablo 3.1. Demiryolu taşıtı ve hattının mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).	40
Tablo 3.2. Zemin tabakalarının dinamik ve elastik parametreleri.	43
Tablo 3.3. Zemin tabakalarının SPT değerleri.	45
Tablo 3.4. Deney setine ait teknik özellikler.	48
Tablo 3.5. Arazi çalışmalarında dikkate alınan tüm YHT seferlerinin tarih ve saatleri.	56
Tablo 3.6. Bariyersiz durumda serbest zemindeki ivmeölçerlerden elde edilen ivme, hız, yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.	59
Tablo 3.7. Bariyerli durum için dikkate alınan YHT seferlerinin tarih ve saatleri. ..	61
Tablo 3.8. Gaz beton panellerin malzeme özellikleri.	63
Tablo 3.9. Cam kürecik malzeme özellikleri.	75
Tablo 3.10. Bariyersiz durumda binadaki ölçüm noktalarından elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.	88
Tablo 3.11. Tüm bariyer tipleri için M153 kodlu ivmeölçerden elde edilen V_{RMS} ve L_v değerleri.	97
Tablo 3.12. Tüm bariyer tipleri için M155 kodlu ivmeölçerden elde edilen V_{RMS} ve L_v değerleri.	99
Tablo 4.1. Zemin malzeme özellikleri.	110
Tablo 4.2. Sayısal modelde demiryolu platformu için malzeme özellikleri.	111
Tablo 4.3. Sayısal modelde kullanılan ray mekanik özellikleri	111
Tablo 4.4. HT65000 yüksek hızlı trenin özellikleri (Faizan, 2023).	115
Tablo 4.5. Hesaplanan deneysel ve nümerik pik partikül ivme değerleri.	127
Tablo 4.6. 3D modelde bariyerin arkasındaki bir nokta için elde edilen PPA değerleri.	130
Tablo 4.7. Farklı bariyer derinlikleri için hesaplanan genlik azaltma oranları.	133
Tablo 4.8. Farklı bariyer yoğunlukları için hesaplanan genlik azaltma oranları.	137



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Problemin şematik gösterimi.	2
Şekil 1.2. Açık hendeklerin izolasyon etkisinin normalize edilmiş bariyer derinliğine göre teorik olarak karşılaştırılması (Haupt,1981).	3
Şekil 1.3. Visko-elastik yarı uzayda dikdörtgen açık hendek ile pasif izolasyon uygulaması (Ahmad ve Al Hussaini, 1990).	6
Şekil 1.4. Problemin şematik gösterimi (Yang ve Hung, 1997).	14
Şekil 1.5. 1962 yılından bu yana dalga bariyerlerinin ele alındığı çalışmalar (Majumder ve Venkatraman, 2023).	17
Şekil 1.6. Tez çalışmasına dair içerik diyagramı	19
Şekil 2.1. Rayleigh ve Love dalgalarının yayılma biçimi (Kramer, 1996).	22
Şekil 2.2. Rayleigh dalgasının yayılımı (Toygur, 2023).	23
Şekil 2.3. Rayleigh dalgası ve cisim dalgası yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi (Kramer, 1996).	23
Şekil 2.4. Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey hareketi (Azar, 2008).	24
Şekil 2.5. Ortam sınırında basınç dalgasının yansıması.	26
Şekil 2.6. Ortam sınırında kayma dalgasının yansıması.	27
Şekil 2.7. İki malzemenin ara yüzeyine gelen bir basınç dalgasının yansıması ve kırılması.	27
Şekil 2.8. Yansıyan (a) ve kırılan (b) basınç dalgası genliklerinin gelen dalga genliğine oranının Poisson katsayısına göre değişimi (Azar, 2008).	29
Şekil 2.9. Empedans oranlarının bir fonksiyonu olarak iki malzemenin arayüzeyine normal gelen bir P dalgası için enerji ve genlik oranı (Azar, 2008).	30
Şekil 2.10. İki malzemenin arayüzeyine gelen bir kayma dalgasının yansıması ve kırılması.	31
Şekil 2.11. Empedans oranlarının bir fonksiyonu olarak iki malzemenin arayüzeyine normal gelen bir S dalgası için enerji ve genlik oranı (Azar, 2008).	32
Şekil 2.12. Rayleigh dalgası ile çatlaklar arasındaki etkileşim (Li ve ark, 2020).	33
Şekil 3.1. Çalışmaya konu olan HT65000 yüksek hızlı tren seti ve boyutları.	39
Şekil 3.2. Arazinin iki dik doğrultusunda sismik (MASW) testlerin uygulanması. ..	41
Şekil 3.3. Demiryolu hattına dik ve paralel doğrultuları için elde edilmiş S dalgası hız kesiti.	42
Şekil 3.4. Test sahasında yapılan sondaj çalışması ve araziden alınan UD örnekleri.	44
Şekil 3.5. Saha ölçümlerinde kullanılan deney seti.	47
Şekil 3.6. Veri ayrıklaştırılması ve örnek ivme kaydı.	49
Şekil 3.7. Titreşim kayıtlarının işlenmesi ve ivme verilerinin filtrelenmesi.	50
Şekil 3.8. Maksimum parçacık hız ve örnek VRMS karşılığı.	51
Şekil 3.9. Bariyersiz ve bariyerli durumda test sahasının görünümü ve ivmeölçer yerleşimi.	53
Şekil 3.10. Bariyerli durumda test sahasının görünümü.	54
Şekil 3.11. Bariyersiz durumda ivmeölçerlerin arazideki konumu.	56

Şekil 3.12. Bariyersiz sahada M129 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	57
Şekil 3.13. Bariyersiz sahada M150 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	58
Şekil 3.14. Bariyersiz sahada M157 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	58
Şekil 3.15. Bariyerli durumda test sahasının görünümü.	60
Şekil 3.16. Bariyer malzemesinin titreşim enerjisi iletkenliği üzerinde etkisi (Massarsch, 2005).	62
Şekil 3.17. Gaz beton cidarlı açık hendek tipi dalga bariyerinin inşaatı.	63
Şekil 3.18. Gaz beton cidarlı açık hendek tipi dalga bariyerinin inşaatı.	64
Şekil 3.19. Strafor dolgulu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	65
Şekil 3.20. Strafor dolgulu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	66
Şekil 3.21. Strafor dolgulu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	67
Şekil 3.22. Odun talaşlı bariyer modeli.	68
Şekil 3.23. Odun talaş dolgulu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	69
Şekil 3.24. Odun talaş dolgulu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	70
Şekil 3.25. Odun talaş dolgulu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	70
Şekil 3.26. Su dolu bariyer.	71
Şekil 3.27. Su dolu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	72
Şekil 3.28. Su dolu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	73
Şekil 3.29. Su dolu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	73
Şekil 3.30. Geri dönüştürülmüş malzemeden üretilmiş genleştirilmiş cam kürecik.	74
Şekil 3.31. Cam kürecikli bariyer uygulaması.	74
Şekil 3.32. Cam kürecik dolgulu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	75
Şekil 3.33. Cam kürecik dolgulu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	76
Şekil 3.34. Cam kürecik dolgulu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.	77
Şekil 3.35. M129 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.	78
Şekil 3.36. M157 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.	80
Şekil 3.37. M150 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.	83
Şekil 3.38. Serbest zemindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için maks V_{RMS} değerlerinin (%) değişimi.	85
Şekil 3.39. Serbest zemindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için L_v (dB) değerlerinin (%) değişimi.	85
Şekil 3.40. Bina yapım süreci.	86

Şekil 3.41. Bariyersiz durumda M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	87
Şekil 3.42. Bariyersiz durumda M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	88
Şekil 3.43. Bariyerli durumda bina titreşim ölçümleri için test edilen farklı dolgu malzemeli dalga bariyerleri.....	89
Şekil 3.44. Strafor dolgulu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	90
Şekil 3.45. Strafor dolgulu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	91
Şekil 3.46. Odun talaş dolgulu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	92
Şekil 3.47. Odun talaş dolgulu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	92
Şekil 3.48. Su dolu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	93
Şekil 3.49. Su dolu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	94
Şekil 3.50. Cam kürecik dolgulu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	95
Şekil 3.51. Cam kürecik dolgulu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.....	95
Şekil 3.52. M153 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.....	96
Şekil 3.53. M155 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.....	99
Şekil 3.54. Bina üzerindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için $\max V_{RMS}$ değerlerinin (%) değişimi.....	101
Şekil 3.55. Bina üzerindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için L_v (dB) değerlerinin (%) değişimi.....	102
Şekil 3.56. M129 ivmeölçeri için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	103
Şekil 3.57. M129 ivmeölçeri için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	103
Şekil 3.58. M157 ivmeölçeri için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	104
Şekil 3.59. M157 ivmeölçeri için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	104
Şekil 3.60. M150 ivmeölçeri (bariyer arkası serbest zemin) için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 3.61. M150 ivmeölçeri (bariyer arkası serbest zemin) için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 3.62. M153 ivmeölçeri (bina zemin katı) için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	106
Şekil 3.63. M153 ivmeölçeri (bina zemin katı) için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	106
Şekil 3.64. M155 ivmeölçeri (bina üst katı) için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	107
Şekil 3.65. M155 ivmeölçeri (bina üst katı) için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması.....	107

Şekil 4.1. PLAXIS yazılımında zemin kontürünün oluşturulması.....	113
Şekil 4.2. PLAXIS yazılımında model malzeme özelliklerinin tanımlanması.	114
Şekil 4.3. HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları ve hareketli tren yükünün şematik gösterimi (Faizan, 2023).	115
Şekil 4.4. Tren hattı boyunca noktasal statik yüklerin tanımlanması (Wolffersdorff, 2010).....	116
Şekil 4.5. Dinamik yük çarpanları ve kiriş kesme kuvvetlerinin gösterimi.	117
Şekil 4.6. Hareketli tren yükünün modele tanımlanması.	118
Şekil 4.7. Hareketli yükü simüle etmek için geliştirilmiş üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	118
Şekil 4.8. PLAXIS 3D’de kullanılan 10 düğümlü (tetrahedral) sonlu elemanlar. ...	119
Şekil 4.9. 3D Model için oluşturulan sonlu eleman ağı.	120
Şekil 4.10. PLAXIS 3D’de hesaplama aşamalarının tanımlanması.	121
Şekil 4.11. Çalışma sahasının kuşbakışı görünümü	122
Şekil 4.12. Üç doğrultuda farklı tren geçişleri için beş ölçüm noktasından elde edilen ivme-zaman ilişkileri.....	123
Şekil 4.13. Üç doğrultuda farklı tren geçişleri için beş ölçüm noktasından elde edilen ivme-zaman ilişkileri.....	124
Şekil 4.14. Üç doğrultuda farklı tren geçişleri için beş ölçüm noktasından elde edilen ivme-zaman ilişkileri.....	125
Şekil 4.15. Geliştirilen 3D modele ait ivme-zaman ilişkileri.....	126
Şekil 4.16. Zemin modelinin doğrulanması.	127
Şekil 4.17. Dalga yalıtım bariyerli sonlu eleman modeli.....	128
Şekil 4.18. Modellemede dikkate alınan bariyer boyutları ve doğrulamaya esas ölçüm noktaları.....	128
Şekil 4.19. Sayısal modelden elde edilen hız-zaman ilişkileri.....	129
Şekil 4.20. Deney ve sayısal model sonuçlarının PPV bakımından karşılaştırılması.	130
Şekil 4.21. Tüm ölçüm noktalarında deneysel çalışmalardan elde edilen maksimum parçacık hız değerlerinin değişimi.	131
Şekil 4.22. Farklı hendek derinlikleri için üç doğrultuda hız-zaman ilişkileri.	132
Şekil 4.23. Nümerik analiz sonucu elde edilen genlik azaltma oranlarının mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması.	134
Şekil 4.24. 8 m derinliğindeki hendek 3D modelinin yanal zemin itkisiyle göçmesi.	134
Şekil 4.25. Farklı bariyer yoğunlukları için üç doğrultuda hız-zaman ilişkileri.	136

YÜKSEK HIZLI TRENLERİN ÜRETTİĞİ TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI İÇİN ÖNERİLEN BİR DALGA BARIYER MODELİNİN YERİNDE ÖLÇÜMLERLE ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Demiryolu trafiğinin oluşturduğu titreşimleri etkili ve ekonomik bir biçimde azaltmak için kullanılan açık hendek yaklaşımı ilgili literatürde kendisine hatırı sayılır bir yer bulmuş olmasına karşın, derin ve desteksiz hendek uygulamaları özellikle yerleşim bölgelerinde mühendislik pratiği açısından uygun değildir. Öte yandan katı dalga bariyerlerinin kullanımı ise titreşimleri etkin bir şekilde azaltma beklentisini karşılayamamaktadır. Açık hendeklerin araştırma konusu edildiği çalışmalarda, gerçekleştirilen saha ölçümleri gerek zayıf zemin koşulları gerekse dinamik yük kaynağı bakımından değerlendirildiğinde dar bir kapsama sahiptir. Bu tez çalışması, Türkiye'nin en yüksek hızda seyreden İstanbul-Ankara tren güzergahı yakınında ve oldukça zayıf bir zemin üzerine inşa edilmiş özel bir test binasının demiryolu trafiği kaynaklı titreşimlerden pasif izolasyon yöntemi ile korunmasına odaklanmaktadır. Bu bağlamda, dinamik yük kaynağı ve korunacak yapı arasına konuşlandırılan ve özel olarak üretilmiş düşük empedanslı prefabrike paneller ile desteklenen ince cidarlı dikdörtgen bir açık hendek uygulamasının çevresel titreşimleri yalıtım performansı tam ölçekli saha çalışmalarıyla incelenmiştir. Alüvyon zemin koşulları dikkate alındığında zemini bir istinat duvarı gibi destekleme fikri özellikle derin hendek uygulamalarında bir zorunluluk olarak öne çıkmaktadır. Ancak bununla birlikte dalga mekaniği göz önünde bulundurulduğunda ilerleyen ve zemin dışında bir ortam ile karşılaşan dalga genliklerinin büyümemesi de bir başka önemli konudur. Bu sebeple çalışma kapsamında kullanılan gaz beton panellerin gerek zeminde stabilite problemini ortadan kaldırması gerekse düşük yoğunluklu olmalarından ötürü titreşimin karakteristiğini büyük ölçüde değiştirmemesi ince cidarlı açık hendek uygulamasının titreşim yalıtım performansı konusunda beklentileri karşılamasını sağlamıştır. Bariyerin tasarımında kullanılan yenilikçi malzemenin yanı sıra içerisinde kullanılan odun talaşı, genleştirilmiş cam kürecik ve strafor köpük gibi farklı özelliklerdeki geri dönüştürebilir atık dolgu malzemelerin titreşim yalıtımına katkısını araştırmak çalışmanın katma değerini artırmıştır. Bu doktora tezi kapsamında, tam ölçekli olarak inşa edilen farklı bariyer tiplerinin gerçek dinamik yük kaynağının yakınında test edilmesine ek olarak PLAXIS 3D yazılımı aracılığıyla deney sahasının sayısal modeli oluşturulmuş ve yalıtım performansı saha verileriyle örtüşecek, gaz beton cidarlı açık hendek tipi bariyeri temsil eden bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Doğrulanmış nümerik modelin geometrik özelliklerinin dalga enerjisinin soğurulma kapasitesine etkisini sayısal bir model aracılığıyla inceleyebilmek için birtakım parametrik araştırmalar yapılarak ince cidarlı gaz beton panellerle desteklenmiş hendek tipi ideal bir dalga bariyer modeli önerilmiştir.



INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF A PROPOSED WAVE BARRIER MODEL FOR REDUCING VIBRATIONS GENERATED BY HIGH-SPEED TRAINS THROUGH IN-SITU MEASUREMENTS

SUMMARY

High-speed transportation systems integrated with railway lines offer comfortable and safe travel and have the advantage of being less affected by traffic density and climatic conditions in residential areas than highways. Economic growth, urban expansion and the need for passenger and freight transfer links between different regions make high-speed trains an important part of modern transportation systems. Significant investments have been made in Turkey in railway infrastructure suitable for high-speed trains, which provide considerable time savings compared to traditional rail transportation and are a more environmentally friendly alternative to road transportation when environmental sustainability impacts are taken into consideration. In Turkey, high-speed trains, which can travel at a speed of 250 km/h, not only create vitality in sectors such as trade and tourism, but also have a strategic importance in terms of reducing road traffic and increasing road safety. However, vibrations from rail traffic have been a growing concern, particularly in densely populated and industrially developed modern urban communities. This concern is based on issues such as the disturbance of comfort, failure of sensitive electronic equipment used in industrial areas, and shortened operational life of structural elements.

In today's world of transportation-geotechnical-structural engineering, the planning of transportation systems and the reduction of these vibrations is critical, as continuous train movements bring potential problems especially in residential and industrial areas built on weak ground deposits. The dynamic effects caused by the continuous increase in traffic loads and travel speeds of railway transportation systems with the developing technology are propagated to the environment through Rayleigh-Love surface waves and body waves. The ability of body waves to penetrate deep into the ground can damage the structural integrity of building foundations, but Rayleigh surface waves generally carry a significant portion of the vibration energy from rail traffic. Surface waves traveling through the Earth's outer layer are more pronounced in soft ground, but their amplitude and frequency are modulated by ground properties.

Considering the alluvial soil conditions where the shear wave propagation velocity is quite low, the vibrations generated by trains that repeatedly pass through these regions have disturbing and uncomfortable effects for the residents of the region, but also pose a risk to the functionality and longevity of equipment such as medical devices and production machines sensitive to dynamic forces, so successful mitigation of these effects is an important research topic in modern and developing societies. In this context, investigation of railroad induced vibration problems in terms of wave propagation in alluvial soil under full-scale field conditions and development of effective vibration mitigation strategies constitute the main backbone of this study.

Although the open trench approach to effectively and economically attenuate vibrations generated by rail traffic has found a considerable place in the relevant

literature, deep and unsupported trench applications, especially in residential areas, are not suitable for engineering practice. On the other hand, the use of solid wave barriers does not fulfill the expectation of successfully reducing vibrations. In studies where open trenches have been investigated, the field measurements carried out have a relatively narrow scope in terms of both poor soil conditions and dynamic load source.

The goal of this study is to investigate in detail the impact of high-speed trains on regions characterized by soft ground and the structures built in these regions, and to investigate the vibration energy absorption capacity of various types of wave barriers designed to reduce these environmental vibrations with full-scale experimental studies.

The research aims to answer questions such as what the characteristics and magnitude of vibrations caused by high-speed trains in soft ground areas are, how these vibrations affect the comfort level of building occupants located close to railway lines, and whether low-budget and environmentally friendly strategies can be developed to reduce the negative effects of environmental vibrations on sensitive equipment and human welfare. Pamukova district, which is an industrial and residential area characterized by very weak ground near the Istanbul-Ankara train line, one of the highest speed train routes in Turkey, was selected as the test site. In this region, a series of train passages were recorded using five accelerometers for three different trips on seven different dates. Considering that each vibration record was analyzed in three axes, a total of 945 acceleration, velocity and displacement records were evaluated within the scope of this study. In addition, a single-storey reinforced concrete structure was built in the area and the effects of environmental vibrations on the structure were also investigated. In order to protect this structure from dynamic forces that pose social and economic risks, the effectiveness of the passive isolation method was examined by using an innovatively-designed wave barrier, which was placed near the structure. Although it is known from the literature that open trench type wave isolation systems generally perform at the highest level, the difficulty of deep trench applications, especially in weak soils, is also an issue to be considered. This concern has led to the search for a material that does not greatly reduce the vibration energy absorption capacity of the open trench while also eliminating the stability problem in deep excavations, and the idea of using low density aerated concrete panels for this purpose was born.

In addition to the rectangular open trench application where the aerated concrete panels are designed to act as an inner wall, the research also investigated whether the use of recyclable waste materials inside the barrier can make an additional contribution to vibration isolation. In two of the seven field measurements, measurements were taken in natural field conditions representing the barrier-free condition, and in the remaining five measurements, hollow barrier, Styrofoam foam barrier, wood chip barrier, water-filled barrier and glass bead barrier were tested respectively. The surface vibration motions recorded from accelerometers placed on the free ground in front of and behind the barrier were evaluated with two different evaluation criteria, V_{RMS} and L_v , in order to reveal the effectiveness of the filling material used in the trench-type passive wave barrier model placed in front of a test building near the high-speed railroad route. These criteria were utilized in order to compare the barriers in a more understandable way in terms of their effect on human perception and the operation of sensitive devices, as well as their ability to absorb vibration energy.

Furthermore, based on the field data, a ground model of the measured Pamukova region was constructed using PLAXIS 3D software and then a series of numerical and parametric analyses were performed by including an open trench type wave barrier with aerated concrete panels in the model. In summary, this thesis is a comprehensive research that combines experimental, numerical and parametric approaches to determine the amplitude and frequency characteristics of the dynamic effects of railway traffic on the free ground surface and structurally and to propose an effective vibration mitigation method. By evaluating the measurement results obtained from full-scale field experiments, different types of trench-type passive wave barrier models have been developed that stand out for their high vibration isolation performance, aerated concrete walls and recyclable waste material used in the internal filling. The aim is for these models to be utilized for the first time in engineering practice, especially for structures facing significant ground vibrations near railways.

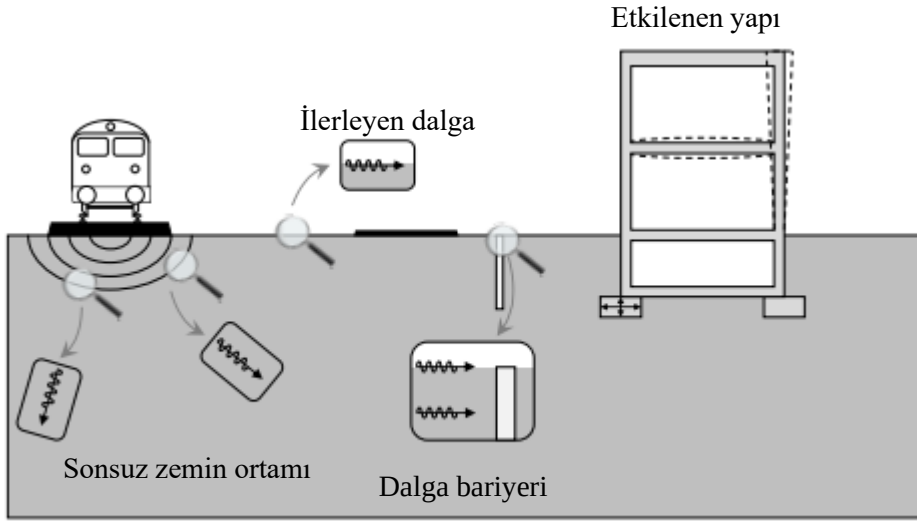




1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Demiryolu hatlarına entegre edilmiş hızlı ulaşım sistemleri, konforlu ve güvenli bir seyahat imkânı sunmalarının yanı sıra yerleşim alanlarındaki trafik yoğunluğundan ve iklim koşullarından karayollarının aksine daha az etkilenme avantajına sahiptir. Ekonomik büyüme ve kentsel genişleme ile farklı bölgeler arasındaki yolcu ve yük transferi bağlantılarına duyulan ihtiyaç yüksek hızlı trenleri modern ulaşım sistemlerinin önemli bir parçası haline getirmektedir. Geleneksel demiryolu taşımacılığına kıyasla zaman tasarrufu sağlayan ve sürdürülebilirlik etkileri göz önünde bulundurulduğunda karayolu taşımacılığına nazaran daha çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilen yüksek hızlı trenlere uygun demiryolu alt yapısına Türkiye’de de önemli yatırımlar yapılmıştır. Ülkemizde, 250 km/s hızda seyahat edebilme kapasitesine ulaşan yüksek hızlı trenler, sadece ticaret ve turizm gibi sektörlerde canlılık yaratmakla kalmayıp aynı zamanda karayolu trafiğinin azaltılması ve yol güvenliğinin artırılması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Ancak, demiryolu trafiği kaynaklı titreşimler, özellikle yoğun nüfuslu ve endüstriyel olarak gelişmiş modern kent topluluklarında giderek artan bir endişe kaynağı olmuştur. Bu endişenin temelinde söz konusu titreşimlerin konfor bozucu etkileri, endüstriyel alanlarda kullanılan hassas elektronik ekipmanların arızalanması, yapısal elemanların işletme ömrünün kısalması gibi konular yer almaktadır. Sürekli tren geçişlerinin bilhassa zayıf zemin birikintileri üzerine kurulu yerleşim ve sanayi bölgelerinde potansiyel problemleri beraberinde getirmesi günümüz ulaştırma-geoteknik-yapı mühendisliği dünyasında ulaşım sistemlerinin planlanması ve bahsi geçen titreşimlerin azaltılması açısından kritik bir önem arz etmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte demiryolu ulaşım sistemlerinin trafik yüklerini ve seyir hızlarını devamlı artırması kaynaklı oluşan dinamik etkiler, çevreye Rayleigh-Love yüzey dalgaları ve cisim dalgaları aracılığıyla yayılmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Problemin şematik gösterimi.

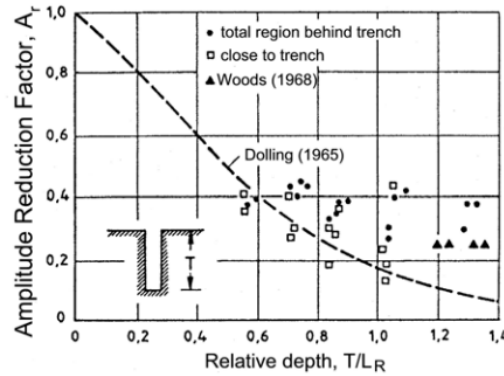
Cisim dalgalarının zemine derinlemesine nüfuz etme kabiliyetleri bina temellerinin yapısal bütünlüğüne zarar verebilir. Ancak demiryolu trafiği kaynaklı titreşim enerjisinin önemli bir bölümünü genellikle Rayleigh yüzey dalgaları taşımaktadır. Dünya'nın dış katmanı boyunca hareket eden yüzey dalgaları yumuşak zeminlerde daha belirgin hale gelmekle birlikte genlikleri ve frekansları zemin özelliklerine göre modüle edilir. Kayma dalgası yayılma hızının oldukça düşük olduğu alüvyon zemin koşulları göz önünde bulundurulduğunda bu bölgelerden tekrarlı geçiş yapan tren setlerinin oluşturduğu titreşimler bölge sakinleri için rahatsız edici ve konfor bozucu etkilere sahip olmakla birlikte, dinamik kuvvetlere duyarlı tıbbi cihazlar, üretim makinaları gibi ekipmanların işlevselliği ve uzun ömürlülüğü açısından da risk oluşturacağından söz konusu etkilerin efektif bir biçimde azaltılması modern ve gelişmekte olan toplumlarda önemli bir araştırma konusudur. Ayrıca bu hızlı taşıma araçlarının civardaki tarihi yapılara zarar verebilme potansiyelinin azaltılması veya operasyon hızlarını düşürmeye ihtiyaç duymaksızın şehir merkezlerinden geçebilmelerine olanak sağlanması problemi ele alma noktasında farklı perspektifler sunmaktadır. Bu bağlamda demiryolu kaynaklı titreşim problemlerinin alüvyon zeminde dalga yayılımı açısından tam ölçekli arazi koşullarında araştırılması ve etkili titreşim azaltma stratejilerinin geliştirilmesi bu çalışmanın temel omurgasını oluşturmaktadır.

1.2. İlgili Çalışmalar

Modern çağda sanayinin hızla ilerlemesi, kent merkezlerinin sürekli genişlemesi ve ulaşım sistemlerinin bireylerin günlük yaşamları ve çalışma ortamları üzerindeki

etkileri, dünya çapında şehir yöneticilerinin, ulaşım planlamacılarının, trafik mühendislerinin ve çevre araştırmacılarının da dikkatini çekmiştir. Ekonomik ilerlemelerle birlikte gelişen hayat standartları modern kent topluluklarının daha güvenli ve kaliteli yaşama isteğini doğurmuş, böylece çevresel etkilerin sebep olduğu problemlere karşı hassasiyet artmıştır. Bu durum tren ve makine titreşimleri, patlamalar, inşaat aktiviteleri vb. insan kaynaklı çevresel etkilere karşı toplumların toleransını azaltmış ve bu konu akademik çevrelerde de geniş kapsamlı araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Titreşim yalıtımı için akla gelen ilk seçenek bazı özel damper sistemleri kullanarak yük kaynağını izole etmek olabilir. Bu konuda literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur (Yun ve Mak, 2010; Yang ve ark, 2019; Liu ve ark, 2023). Ancak bu seçeneğin uygulanabilir olmadığı durumlarda titreşimin hareket ettiği ortamı izole etmek etkili bir çözümdür. Dalga bariyerleri, yüzeyde bir süreksizlik (hende) oluşturarak veya titreşimleri gövdeleriyle bloke ederek bu amaçla kullanılmaktadır.

Dolling (1965, 1970) hende tipi bariyer sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek için saha araştırmaları yapmış ve bariyer boyutlarına ilişkin tavsiyelerde bulunmuştur. Şekil 1.2 Dolling'in bulguları ile Woods (1968) ve Haupt'un (1981) bulguları arasında, derinliğine göre normalize edilmiş açık bir hendeğin izolasyon etkinliği üzerine bir karşılaştırmayı göstermektedir.



Şekil 1.2. Açık hendeklerin izolasyon etkisinin normalize edilmiş bariyer derinliğine göre teorik olarak karşılaştırılması (Haupt,1981).

Titreşim frekansının etkisini karşılamak için, dalga boyu ve frekans arasındaki ters ilişki göz önüne alındığında, Rayleigh dalga boyuna (λ_R) göre hendeklerin normalleştirilmiş derinlik/genişlik oranı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çeşitli yük kaynakları tarafından üretilen zemin titreşimleri iki tipte kategorize edilebilir. Bunlardan birincisi makine titreşimi, kazık temel üzerindeki dinamik yük,

diğer yarı statik yük kaynakları gibi tek noktalı yüklemeler sonucu oluşan titreşimlerdir. Bir diğeri ise esas olarak çok akslı tren yüklemesi, trafik yüklemesi gibi eş zamanlı yük kaynaklarından ötürü oluşan titreşimlerdir. Bununla birlikte yeraltı metro tüneli ve patlama faaliyetleri ile oluşan titreşimler ayrı bir şekilde değerlendirilebilir. Titreşim kaynaklarının çeşitlilik göstermesi araştırmacıları yük kaynağından ziyade türü ne olursa olsun titreşimlerin azaltılması konusunda seçilecek yöntemi kategorize etmeye itmiştir. Bu bağlamda ilk kez Woods (1968) tarafından titreşim yalıtım bariyerlerinin yük kaynağına yakın yerleştirilmesi durumu aktif izolasyon, kaynaktan uzak ve korunacak yapı yakınında yerleştirilmesi durumu ise pasif izolasyon olarak adlandırılmış ve açık hendeklerin bir titreşim kaynağından yayılan yüzey (Rayleigh) dalga enerjisinin neden olduğu düşey yer hareketini nasıl azaltılabileceğini araştırmak üzere bir saha çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmada bariyer verimliliği bir hendeğin varlığında zemin yüzeyinin düşey yer değiştirme bileşeninin hendezsiz durumdaki yer değiştirmeye oranı olarak tanımlanan “ A_R ” değeri kullanılarak değerlendirilmiştir. Pasif izolasyon için düz açık hendeklerin araştırıldığı çalışmada dikkat çekici sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre “H” bariyer derinliği, L bariyer uzunluğu olmak üzere; etkili bir izolasyon için HL/λ_R^2 değerinin titreşim kaynağından iki dalga boyu mesafedeki hendek için en az 2.5, titreşim kaynağından altı dalga boyu mesafedeki hendek için ise en az 6 olması gerektiği ifade edilmiştir. Bariyerin önünde ve yanlarında düşey titreşim genliklerinin arttığına gözlenmesi çalışmanın öne çıkan sonuçlarından bir diğeridir.

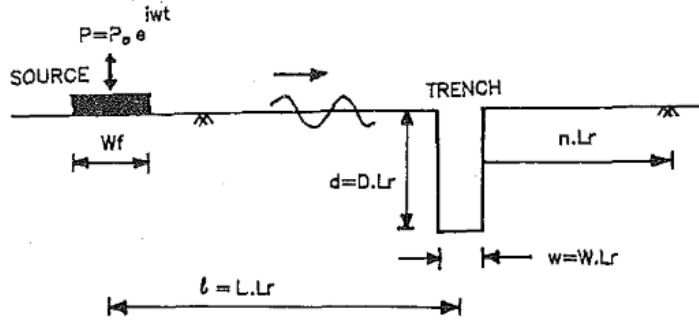
Haupt (1981) açık hendekler ve beton bariyerler de dahil olmak üzere çeşitli yalıtım sistemlerinin izolasyon verimliliğini araştırmak için küçük ölçekli deneyler gerçekleştirmiştir. Deney setinin boyutları sebebiyle çok düşük dalga boylarına karşılık gelen 240 ile 400 Hz aralığındaki titreşim frekansları kullanılmıştır. Çalışmada açık hendeklerin izolasyon etkinliğinin normalleştirilmiş derinlikle birlikte arttığı, beton bariyerler gibi rijit sistemlerin yalıtım etkinliğinin ise normalleştirilmiş kesit alanının bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir.

Crispino ve D'apuzzo (2001), karayolu trafiği kaynaklı titreşimlerin kültürel miras düzenlemeleri kapsamında korunan tarihi öneme sahip binalar üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. İngiliz standardında (BS 6472, 2008) belirtilen kriterleri kullanarak maksimum parçacık hız üzerinden değerlendirmeler yapmışlardır.

Hajek ve ark. (2006) ağır vasıta tekerleklerinin asfalt yol kaplamasındaki yüzey bozuklukları ile temasından oluşturduğu zemin titreşimlerinin ve dizel motorlu bu araçların egzoz ile motor sistemlerinin ürettiği düşük frekanslı gürültü titreşimlerinin hafif yapı elemanları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Karayolu trafiğinin sebep olduğu titreşim etkilerini Amerikan standardında (FTA, 2006) belirlenen kriterlere göre karşılaştırıldıkları çalışmalarında çözüm önerisi olarak; zemin kaynaklı titreşimler için yol kaplama yüzeyinin iyileştirilmesi, gürültü titreşimleri için ise hafif yapı elemanlarının ses iletimine karşı yalıtımının artırılmasını önermişlerdir. Yüksek frekanslı titreşim hareketlerinin yapı güvenliği, insan konforu ve endüstride çalışan hassas makineler üzerindeki olumsuz etkilerinin önlenmesi için yayılma alanında ya da korunacak yapıda titreşim yalıtım araçlarının geliştirilmesi gibi çalışmalar da önemli araştırma konuları olmuştur.

Pao ve Mow (1963) düzlemsel cisim dalgalarının bir yüzey ile karşılaştıklarında saçılma davranışını inceleyerek bu alandaki ilk çalışmaları başlatmışlardır. Abouidi (1973), Fuyuki ve Matsumoto (1980) tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak yük kaynağının yayılma alanında meydana getirdiği titreşim genliklerinin düşürülmesi amacıyla geliştirilen bariyerlerin analitik çözümleri ortaya konmuştur.

Ahmad ve Al-Hussaini (1990), yayılan yüzey harmonik Rayleigh dalgalarının neden olduğu zemin titreşimlerini azaltmak için Sınır Elemanlar Yöntemi (BEM) kullanarak dikdörtgen açık veya içi dolu hendeklerin etkinliğini incelemiştir. Açık ve beton dolgulu hendekler kullanılarak düzlem-gerilme koşulları altında pasif izolasyon problemi ele alınmıştır. Geometrik ve malzeme parametrelerini dikkate alarak, homojen zeminde dikdörtgen hendeklerin titreşim engelleme etkinliğini tahmin etmek için tasarım parametreleri sağlamışlardır. Çalışmalarında tabakalı zeminlerde dalga yalıtımına da odaklanmış ve çok katmanlı zeminin bir hendeğin dalga bariyeri olarak performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. İncelenen problemin şematik diyagramı Şekil 1.3'de gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Visko-elastik yarı uzayda dikdörtgen açık hendek ile pasif izolasyon uygulaması (Ahmad ve Al Hussaini, 1990).

Bu çalışmanın dikkat çekici sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Açık hendekler için zemin kaynaklı titreşimlerin etkili bir biçimde izole edilebilmesi için normalize edilmiş derinliğin 0.8'den büyük olması gerekmektedir.
- Derin olmayan (sığ) bariyerlerde bariyerin genişliği etkili bir yalıtım performansı için önemli bir parametredir.
- İçi dolu hendekler için hem derinlik hem de genişlik eşit derecede önemlidir.
- Zeminin Poisson oranının etkisi göz ardı edilebilirken, kayma dalgası hızı ve bariyer malzemesinin birim hacim ağırlığı titreşim genliklerinin azaltılmasında önemli derecede etkilidir.
- İçi dolu hendekler için boyutsuz derinlik ve genişlik ifadeleri sırasıyla 1 ve 0.8'den yüksek olmalıdır.

Al-Hussaini (1992) doktora çalışmasında farklı geometrik özelliklere sahip dalga bariyeri uygulamaları ile titreşimlerin soğurulmasını sınır elemanlar yöntemi ile ele almış ve bir dizi parametrik çalışmalar gerçekleştirmiştir. İzolasyon sisteminin yalıtım performansını bariyerin geometrik ve malzeme özelliklerini esas alarak belirleyen çeşitli ampirik formüllerin geliştirildiği bu tez çalışması bu alanda yapılan önemli araştırmalardan biridir. Buna ek olarak önerilen analitik modellerin uygulanabilirliği basit arazi deneyleriyle test edilmiştir. Zeminde dalga yayılımı konusuyla ilgili detaylı analitik çalışmalar 2000'li yılların başlangıcında gelişen bilgisayar teknolojisi ile paralel bir şekilde ivme kazanmıştır. (Kausel, 1994; Bode ve ark, 2002; Hildebrand, 2004).

Ahmad ve ark. (1996) ağır makine temellerinden kaynaklanan yer hareketlerinin yakın çevrede titreşime duyarlı aletler üzerinde oluşturdıkları olumsuz etkilerini azaltmak

için açık hendek tipi dalga bariyer modelini önermişlerdir. Bariyerin yalıtım etkisini doğrudan belirleyen geometrik zelliklerinin, Rayleigh dalga boyuna bağlı bulunabileceğini sayısal ve deneysel araştırmalarıyla göstermişlerdir.

Klein ve ark. (1997) benzer şekilde harmonik kaynaklı bir titreşimin frekans içeriğini ve farklı kayma dalgası hızına sahip zeminleri dikkate alarak dalga yayılım mekanizmasını bariyerin konumuna bağlı incelemişlerdir.

Forchap ve Verbic (1994) titreşim etkilerinin yayılma alanında azaltılması için arazi deneyleri yaparak zemin içerisinde ana kaya özelliğini taşıyan bir yapay taban kaya modeli önermişlerdir. alışmalarında, rijit tabanlı tek tabakalı zemin ortamının temel frekansının dış yükün frekans değerlerinden küçük olması durumunda dalga yayılışının gerçekleşmediğini göstermişlerdir.

Trafik yükünün darbe yüküne benzeştirildiği ve sınır elemanlar-sonlu elemanlar yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir nümerik model üzerinde alışan Adam ve Chouw (2001) titreşim genliklerinin azaltılması için yapay bir anakaya önermişlerdir. Çalışma kapsamında yatay dalga bariyerinin konumlandırılacağı kritik derinliğin belirlenmesi için Rayleigh dalga boyuna bağlı farklı tabaka yükseklikleri elde edilmiş ve bu sonuçlar elastik yarı uzay çözümleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Demiryolu taşımacılığının sebep olduğu çevresel titreşimlerin etkileri katar yükü, seyahat hızı, trafik yoğunluğu vb. farklı bakış açıları ile ele alınmış ve zeminde dalga yayılımı konusunun derinlemesine anlaşılabilmesiyle ilgili birçok saha deneyleri gerçekleştirilmiştir. Auersch (1989) Almanya'da işletilen yüksek hızlı yolcu trenlerinin (ICE tipi) 100-300 km/h arasında değişen hızlarda ürettiği titreşim genliklerini rapor olarak yayınlamıştır. Branderhorst (1997) Amsterdam-Utrecht şehirleri arasında 40-160 km/h hızla seyreden yolcu trenlerinin oluşturduğu çevresel titreşimleri ölçerek, bulgularını çeşitli sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmak üzere araştırmacılarla paylaşmıştır. Benzer şekilde Paris-Brüksel arasında seyahat eden ve yaklaşık olarak 200-300 km/h hızla hareket eden yüksek hızlı yolcu treninin yakın çevrede neden olduğu titreşimler Degrande ve Schillemans (2001) tarafından incelenmiştir.

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığına sahip birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi, ülkemizde de yolcu taşımacılığındaki trafik akış hızları ve dingil yükleri artmıştır. Araştırmacılar, yüksek hızlı demiryolu gzerghlarında yoğun tren trafiğinin evre

yapılarda, zeminde ve üstyapıda oluşturduğu etkili yer hareketlerinin ölçülmesi, hassas çalışma alanlarında veya korunacak bina çevresinde titreşimlerin azaltılması ve en elverişli demiryolu üstyapı tasarımı gibi konulara odaklanmıştır.

Çin'in kuzeydoğusunda faaliyet gösteren Shenyang–Harbin demiryolu hattında hareket eden trenlerin 20-80 km/h arasında değişen geçiş hızlarında ürettikleri titreşimlerin seçilmiş bir köprü ayağı ve tren hattına 12 m uzaklıktaki çok katlı betonarme binalar üzerindeki etkileri incelenmiş ve ölçüm sonuçları insan konforu ve yapı güvenliği bakımından Çin ulusal standartlarına göre karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Xia, 2001,2005). Ölçüm yapılan yerel yerleşim bölgelerinin bir kısmında, zeminin jeolojik yapısından dolayı enerji dalgalarının büyüdüğü ve bu bölgelerde yaşayan insanların konfor seviyelerinin bahsedilen standardın altında kaldığı tespit edilmiştir.

Xia ve ark. (2009) yaptığı diğer bir çalışmada, demiryolu trafik akışının yoğun olduğu Çin'deki Beijing-Guangzhou bölgesinde saha deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada ağır yük ve hafif yolcu trenlerinin 40-115 km/h değişen seyahat hızlarında oluşturdukları titreşim etkileri demiryolu hattına 14 m uzaklıktaki 6 katlı yığma yapıda ölçülmüştür. Bina titreşimleri Amerikan FTA (2006) standardında belirlenen kriterlere göre karşılaştırarak değerlendirmişlerdir.

Galvin ve Dominguez (2009) İspanya'nın Cordoba-Malaga kentlerini birbirine bağlayan yüksek hızlı demiryolu hattında kullanılan AVE-Talgo ve AVE-Alstrom tipi tren setlerinin farklı geçiş hızlarında güzergâha yakın yapılarda ve çevre zeminlerde oluşturdukları titreşimleri ölçmüşlerdir. Sonlu ve sınır elemanlar yöntemlerinin ortak kullanımına dayalı geliştirdikleri 3D sayısal modeli ölçüm sonuçları ile kalibre ederek kullandıkları sayısal formülasyonların kapasitesini göstermişlerdir.

Yüksek hız trenleri gibi insan kaynaklı yüzeysel dinamik yüklerin demiryolu üstyapısında, çevre zeminde ve binalarda oluşturduğu titreşim etkilerinin dalga yayılma hareketine bağlı parametrik araştırıldığı çalışmalarda, sonlu eleman, sınır eleman ya da sınır integral yöntemleri (Adam ve ark, 2000a, 2000b; Çelebi ve Schmid, 2005; Fiala ve ark, 2007; Ju, 2007; Auersch, 2008), bu yöntemlerin ortak kullanımına dayalı hibrit çözüm teknikleri (O'brien ve Rizos, 2005; Çelebi, 2006; Bratov ve ark, 2015) ve ampirik tabanlı analitik çözüm yaklaşımları (Barber, 1996; Bode ve ark, 2002; Auersch 2012; Gao ve ark, 2014) kullanılmıştır. Ayrıca gerçek tren yükü yerine

yapay yük kaynağından harmonik titreşim dalgaları üretilerek sahada küçük ölçekli modeller üzerinden deneysel çalışmalar yapılmıştır (Barkan, 1962; Woods, 1968; Dolling, 1970; Ahmad ve Al-Hussaini, 1991; Ju ve Lin, 2008).

Coulter ve Hunt (2014) engelleyici koşul altında Rayleigh yüzey dalgasının yayılımını laboratuvar ortamında deneysel incelemek için doğal saha koşullarındaki elastik zemin ortamı yerine içi jelatin ile dolu mikadan yapılmış hazne, rijit dalga bariyer modeli içinde sıkıştırılmış strafor kiriş kullanmışlardır. Rijit dalga bariyerinin etkisini yapay elektro-dinamik sarsıcının ürettiği harmonik titreşimler altında incelemişlerdir.

Ulusal ve uluslararası literatüre bakıldığında demiryolu ulaşım sistemlerini ilgilendiren konularda gerçekleştirilen az sayıdaki saha araştırma çalışmalarının kent içi hafif raylı sistem titreşimlerinin yolcu konforu ve güvenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesiyle, seyahat kalitesinin ve çevresel akustik sorunların iyileştirilmesiyle sınırlı kaldığı veya titreşim genliklerinin azaltılmasını konu alan çalışmaların çoğunda yapay dinamik yük kaynaklarının kullanıldığı görülmektedir. Gerek demiryolu trafiğinin yüksek seyahat hızlarında seyretmesini gerekse söz konusu demiryolu güzergâhının kötü zemin koşullarında konumlandırılmasını kapsayan bir senaryoda, tren kaynaklı zemin titreşimlerinin azaltılmasını hem serbest zemin hem de korunacak yapı için birlikte konu alan az sayıda deneysel çalışma mevcuttur.

1991 yılında Almanya'nın Düsseldorf kentinin kuzeyinde iki katlı konut binalarını yüksek hızlı bir demiryolu hattının neden olduğu titreşimlerden korumak için farklı izolasyon alternatifleri düşünülmüş ancak Alman demiryolu yetkilileri tarafından gaz yastığı paneller tercih edilmiştir. Bu yöntemin pratik olarak uygulanması konusu 1991 yılında Schiffer tarafından rapor edilmiştir.

Massarsch (1991) tarafından ise düşük empedanslı şişirilmiş, esnek gaz yastıklarının titreşim izolasyonu üzerindeki etkisi sınır elemanlar metodu ile teorik olarak açıklanmıştır.

Çelebi ve ark. (2009) tarafından elektrodinamik bir cihaz vasıtasıyla üretilen temel titreşimlerinin oluşturduğu dalga genliklerinin azaltılması için açık hendek, su dolu hendek, bentonit dolgulu hendek ve beton dolgulu hendek tipleri test edilmiştir. Bu çalışmanın en dikkat çekici sonuçları ise topraktan daha yumuşak malzeme ile doldurulmuş hendeğin pasif izolasyon durumunda aktif izolasyona göre daha etkili

olduğu ve bariyerin yalıtım performansının hem aktif hem de pasif yalıtım durumları için titreşim kaynağının frekansına bağlı olduğudur.

Alzawi ve El Naggar (2011) tarafından maksimum 23.5 kN sinüzoidal harmonik yük üretebilen mekanik bir osilatör kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada makine temellerinin sebep olduğu yerinde titreşimlerin azaltılması için açık hendek ve Geofoam dolgulu hendek uygulamalarının dalga bariyeri olarak koruyucu etkinliği tam ölçekli deneysel bir çalışma ile araştırılmıştır. Siltli kil ve siltli kum olarak karakterize edilen deney sahasında yürütülen bir dizi araştırma sonucunda Geofoam dolgulu bariyer uygulamasının dalga yalıtımı konusunda %68'e varan performans sağladığı ve idealize edilmiş bariyer derinliğinin gerek açık hendek tipi gerekse dolgulu hendek tipinde 0.60 değerinden büyük olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca yük kaynağının bariyere mesafesinin bariyerin derinliğine oranına bağlı olarak bir takım sayısal değerler tespit edilmiş ve bu oran arttıkça açık hendeğin etkisinin azaldığı ancak Geofoam dolgulu hendek performansında dikkate değer bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir.

François ve ark. (2012) yayınladıkları çalışmada 1995 yılında Brüksel toplu taşıma şirketinin yakınında bulunan bir test sahasında toprağa gömülü bir titreşim yalıtım panelinin tasarımı, kurulumu ve verimliliği hakkında bilgi vermişlerdir. Söz konusu yalıtım aracı, gelen yüzey dalgası içeriğinden 20 Hz ve üzerindeki frekansları izole etmek üzere tasarlanmış olup esas malzeme olarak geliştirilmiş polistrenden oluşmakta ve kurulum esnasında zemin içerisinden yukarı hareket etmesinin engellenmesi için beton yan panellerle desteklenmektedir. Deney sahasında yerinde çekiş darbeleri ile performansı test edilen sandviç panelin titreşim yalıtım verimliliği ayrıca sonlu eleman-sınır eleman yaklaşımlarının birlikte kullanıldığı ve ideal bir açık hendek ile beton desteklerin kullanılmadığı bir polistren panel ile karşılaştırmalı olarak sayısal model aracılığıyla değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları polistren ızgaranın açık bir hendeğe göre daha düşük bir performansa sahip olduğunu, buna karşın beton yan panellerin titreşim yalıtım panelinin etkinliğini önemli ölçüde değiştirmediğini göstermiştir. Ayrıca zemin ve dolgu malzemesi arasındaki rijilik kontrastının dolgu malzemesinin performansını belirleyen anahtar faktör olduğu belirlenmiştir.

Garinei ve ark. (2014) tarafından İtalya'nın Bolonya ile Milan şehirlerini birbirine bağlayan yüksek hızlı demiryolu hattının civarında gerçekleştirilen, titreşimlerin yayılma ortamında kontrolünü de kapsayan deneysel çalışmada, demiryolu trafiğinin

120 km/h seyahat hızıyla ürettiği yüksek frekanslı titreşim dalgalarının yakın çevredeki etkisi güzergâh doğrultusunda inşa edilen 15 m uzunluğunda ve 2 m derinliğinde bir betonarme bariyer uygulamasıyla birlikte incelenmiştir. Burada, birbirine çelik çubuklarla bağlanmış iki sıralı uygulanan ön dökümlü betonarme panellerden oluşan dalga bariyer modelinin yalıtım performansı sadece zemin titreşimlerinden kayıt alınarak test edilmiştir.

Ülgen ve Toygar (2015) tarafından yapılan arazi çalışmasında, yapay bir darbe çekicinin meydana getirdiği enerji dalgalarının yayılma yoluna 4.5 m derinliğinde hendek açılarak (kesit alanı=4.8 m²) aktif ve pasif yalıtım durumları incelenmiştir. Deney sahasının zemin profili çok sert kil üzerine oturan killi kumdan oluşmakta olup açık hendek, su dolu hendek ve Geofom dolgulu hendek tipleri test edilmiş ve geofom dolgulu bariyer etkinliğinin diğer iki tip bariyere kıyasla daha elverişli olduğu ifade edilmiştir.

Coulter ve ark. (2015) İspanya’da zayıf zemin üzerine konuşlandırılmış bir demiryolu hattı boyunca yerinde tam ölçekli arazi deneyleri gerçekleştirmiş ve zemine göre daha rijit bir dalga bariyerini test etmeyi hedeflemişlerdir. İlgili bariyerin inşa edilebilmesi için öncelikle zemin jet grout yöntemiyle güçlendirilmiş ve üst üste binen jet grout kolonlarından oluşan 7.5 m derinlik, 1 m genişlik ve 55 m uzunluğundaki rijit bariyerin titreşim genliklerini azaltma performansı deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır.

Feng ve ark. (2017) Çin’deki Pekin-Şanghay demiryolunun menfez, viyadük ve geçiş bölümlerinde YHT tarafından üretilen yer titreşimlerini ölçmüşlerdir. Tren hızının yaklaşık 250-350 km/h olduğu çalışmada tren hattına paralel, dik ve düşeyde olmak üzere üç doğrultu için ölçümler yapılmış ve hattın merkezinden uzaklık ve tren hızı gibi parametrelerin titreşim genlikleri üzerindeki etkisine bakılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları düşey ivme tepkisinin tipik olarak yakın alanda en büyük olduğu ancak uzak alanda enine ivmelerin baskın olduğunu göstermiştir. Ayrıca menfez veya viyadük varlığının yakın alanda boyuna titreşim genliklerinin büyümesine sebep olduğu gözlenmiştir.

Naghizadehroki ve ark. (2020) maksimum dinamik kuvvet genliği 15 kN olan bir yük kaynağı aracılığıyla oluşturulan titreşimlerin azaltılmasında dikdörtgen prizması ve üçgen biçiminde farklı tipteki hendeklerin aktif ve pasif yalıtım durumlarında ideal derinlik, genişlik ve uzunluklarını 2D ve 3D nümerik olarak araştırmışlar ve sonuçları

frekans tanım alanında sunmuşlardır. Ayrıca zemini kum-çakıl karışımı olan bir test sahasında geofoam dolgulu bir hendeği deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçları ile örtüşen sayısal modelden yola çıkarak bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Buradan hareketle araştırmacılar dikdörtgen prizması biçimindeki hendeklerde normalize edilmiş bariyer derinliğinin (D) 0.5'ten büyük olması gerektiğini ancak bu değer arttıkça bariyerin etkinliğinin pasif yalıtım için dikkate değer ölçüde artmadığını; buna karşın üçgen şeklindeki yalıtım sistemlerinde bu D değerinin daha önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca genel bir sonuç olarak hem aktif hem de pasif yalıtımda bariyer derinliğinin dalga boyunun en az 0.6 katı kadar olması gerektiğini bildirmişlerdir.

Toygar ve Ülgen (2021), titreşim kaynağının tipi, yerel saha koşulları ile birlikte açık hendeklerin geometrik boyutları gibi parametrelerin titreşim izolasyonu üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla bir dizi tam ölçekli saha deneyleri yapmışlardır. Sahada yapay olarak üretilen yer titreşimlerinin genlikleri, farklı test konfigürasyonlarında oldukça hassas ivmeölçerler aracılığıyla ölçülmüştür. Titreşim frekansının, yalıtım etkinliği üzerinde bariyerin gerçek derinliğinden daha fazla etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Hendeğe yakın bir bölgede daha iyi izolasyon sağlanırken, uzak mesafelerde izolasyon etkinliğinin azaldığı görülmüştür. Titreşimlerin genlikleri genellikle beklendiği gibi kaynaktan uzaklaştıkça azalmıştır. Tabakalı zemin profillerinde, tabaka sınırlarında yansıyan cisim dalgaları, zemin tabakalarının yoğunluklarındaki farklılıklar ve heterojenlik nedeniyle yüzeydeki kaynaktan üretilen titreşimlerle üst üste gelebilir. Bu dalgaların girişiminin, dalgaların faz içi ve faz dışı kombinasyonları nedeniyle belirsiz noktalarda büyütme etkisine neden olduğu gözlemlenmiştir.

Huang ve ark. (2021) kompozit dalga bariyerlerinin izolasyon etkinliğini açık hendeklerle karşılaştırmak için tam ölçekli saha testleri gerçekleştirmiştir. Titreşim kaynağı olarak sarsıcı kamyonun (T-Rex tipi) kullanıldığı çalışmada açık hendeğin en iyi izolasyon performansını sağlaması beklenmesine rağmen, kompozit bariyer bazı farklı frekanslarda daha iyi performans göstermiştir.

Jauhari ve ark. (2023) sahada tekli ve ikili (dual) açık ve geofoam dolgulu hendekler kullanmıştır. 0.5 m genişliğinde, 1 m derinliğinde ve 4.5 m uzunluğunda açık hendekler 2 m aralıklarla kazılırken, yük kaynağı (mekanik osilatör) ile ilk bariyer arasındaki mesafe 2 m ile 12 m arasında olacak şekilde deneyler yapılmıştır.

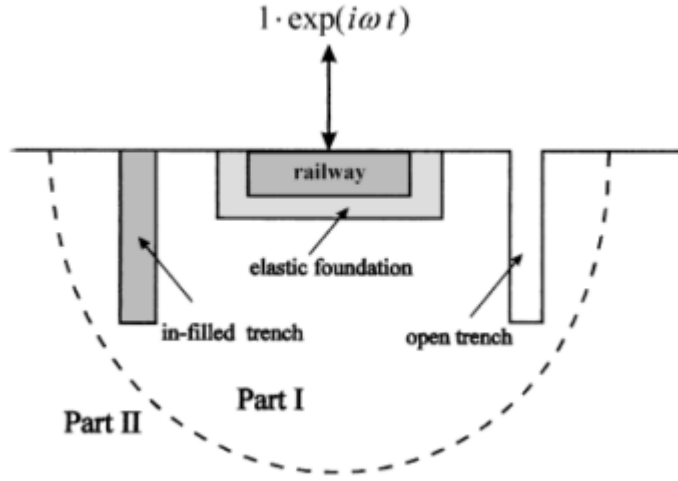
Beklendiği gibi, ikili açık hendekler diğer bariyerlerden daha iyi performans göstermiştir. Bariyerler yük kaynağının yakınına kurulduğunda daha etkili olurken en iyi izolasyon %76'lık performans ile en yüksek uyarım frekansı ve dolayısıyla en yüksek normalleştirilmiş derinlik için elde edilmiştir. Tek ve çift açık hendekler normalleştirilmiş derinliğin sırasıyla 0.27 ve 0.14'ten büyük olması durumunda %50'den fazla yalıtım performansı sağlanmıştır.

Titreşim problemlerinin yaşandığı yumuşak zeminlerde, düşey (Jones ve Block, 1996; Pflanz ve ark, 2002; El Naggar ve Chehab, 2005; Buonsanti ve ark, 2009; Howard ve Warren 2009; Çelebi ve ark, 2013; Chiang ve Tsai, 2014) ve yatay konumlandırılmış dalga bariyer uygulamalarının (Chouw ve ark, 1991; Chouw, 1994; Takemiya, 1998a, 1998b; Chouw ve Pflanz, 2002; Göktepe ve Çelebi, 2013) yalıtım performanslarıyla ilgili literatürde önemli sayıda teorik çalışma mevcuttur. Düşey dalga bariyerlerinin sayısal modellerinde ahşap levha, beton plak veya çelik palplanş gibi rijit sistemler kullanıldığı gibi, su, akışkan bentonit, lastik kırıntıları ve köpük gibi yumuşak malzemeler de iç dolgusu olarak tercih edilmiştir (Kattis ve ark, 1999; Andersen ve Liingaard, 2005; Andersen ve ark, 2008; Alzawi, 2011).

Yang ve Hung (1997) demiryolu trafiğini birim genlikli harmonik yüke dönüştürerek literatürdeki içi dolu ve boş dalga bariyer modellerinden farklı olarak elastik yataklı demiryolu üst yapısının titreşimlerini iki boyutlu sonlu ve sonsuz eleman ağı kullanarak incelemiştir (Şekil 1.4).

Bu çalışmanın öne çıkan sonuçları aşağıda sıralanmıştır:

- i. İçi dolu hendek tipi bariyerlerin titreşim izolasyonunda etkin olabilmesi için boyutsuz derinlik ve genişlik sırasıyla 1 ve 0.3'ten fazla olmalıdır.
- ii. Zemin parametreleri arasında Poisson oranı aktif izolasyon problemi için kritik bir faktördür.
- iii. Hendek genişliği açık hendeklerde önemli değilken (sığ hendekler hariç) içi dolu hendeklerde önemli bir parametredir.



Şekil 1.4. Problemin şematik gösterimi (Yang ve Hung, 1997).

Ju ve Lin (2004) sonlu elemanlar metodunu kullanarak geliştirdikleri üç boyutlu model üzerinde, trenlerin geçişleri esnasında zeminde meydana gelen titreşimleri ve Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılımını incelemişlerdir. Dinamik yükün meydana getirdiği kuvvetli yer hareketlerinin etkisini azaltmak için, demiryolu üstyapısı etrafındaki zayıf zemin koşullarını iyileştirme veya demiryolu hattında balast malzemesi kullanmak yerine beton plak önermişlerdir. Elde edilen sonlu eleman çözümleri teorik sonuçlarla karşılaştırılmış, kritik hızın Rayleigh tipi yüzey dalgalarının elastik ortamda yayılış hızına özdeş olduğu durumlarda rezonans etkisi görüleceği vurgulanmıştır.

Adam ve Estorff (2005) zaman tanım aralığında sonlu ve sınır elemanlarının ortak kullanımına dayalı geliştirdikleri algoritma üzerinden yapı-zemin-dalga bariyer sistemini iki boyutlu olarak modellemişlerdir. Balastlı demiryolu üstyapısından geçen tren trafiğini periyodik davranan darbe yüklerine benzeştirerek düşey dalga bariyerin aktif ve pasif durumları için çevre bina titreşimlerindeki yalıtımını kontrol parametrelerine bağlı incelemişlerdir.

Çelebi ve Göktepe (2012) hızlı demiryolu hattına yakın ve yumuşak zemin koşullarında inşa edilmiş yapıları kuvvetli titreşimlerden korumak için dalga bariyeri olarak yapay anakaya modelini incelemişlerdir. Geliştirilen 2D matematik modelde dinamik yük kaynağı olarak Almanya'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan lokomotif dikkate alınarak yapay taban kaya bariyer modelinin aktif ve pasif yalıtım performansları analiz edilmiştir.

Ülkemizde Göktepe (2013) tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında, yüksek hızlı tren trafiğinin ürettiği titreşimler ve dalga bariyerinin yerleştirilmesi ile çevre

binalardaki etkilerinin azaltılmasına ilişkin çözümler, yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkilerini kapsayan bir dalga yayılım problemi olarak ele alınmış ve 2D sonlu eleman çözüm yönteminden yararlanılarak idealize edilmiştir. Dinamik yük kaynağı olarak, Türkiye'nin yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan $V=250$ km/h geçiş hızına sahip tren setinin demiryolu platformuna uyguladığı zamana bağlı yük fonksiyonu kullanılmıştır. Zemin ortamının doğrusal olmayan mekanik davranışını temsil etmek için, Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme modeli tercih edilmiştir. Dalga bariyerinin ideal boyutlarının ve tesis edileceği yerin belirlenerek yalıtım performansı açısından en uygun dolgu malzemesinin seçimi, kapsamlı parametrik çalışmalar yürütülerek araştırılmıştır.

Li ve ark. (2020) gürültü ve titreşim izolasyonu amacıyla geniş frekans bantlarında yayılan dalgaları perdelemekte kullanılan yeni nesil sismik yapay malzemeyi sonlu elemanlar yöntemi ile LS-DYNA yazılımı kullanarak araştırmışlardır. Tren-ray-zemin etkileşiminin üç boyutlu olarak dikkate alındığı çalışmada hem zaman tanım alanında hem de frekans tanım alanında çözümlemeler yapılmış söz konusu malzemenin tren hattına farklı mesafelerde konumlandırılmasının ivme genliklerini hangi oranda azalttığı incelenmiştir.

Zou ve ark. (2020) artan şehirleşme ve düşey yapılaşma etkisiyle metro depolarının üzerine inşa edilen üst yapılarda raylı sistemlerin oluşturduğu titreşimlerin azaltılmasının araştırılması amacıyla Çin'de bulunan bir metro deposunu ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar programı ile modellemişlerdir. İlgili model üzerinde açık hendek ve farklı tipte malzemeler ile doldurulan dolu hendek tipi yalıtım bariyerleri ile beton duvar bariyer analiz edilerek dalgaların üst yapının farklı katlarında oluşturduğu titreşim etkisi incelenmiştir.

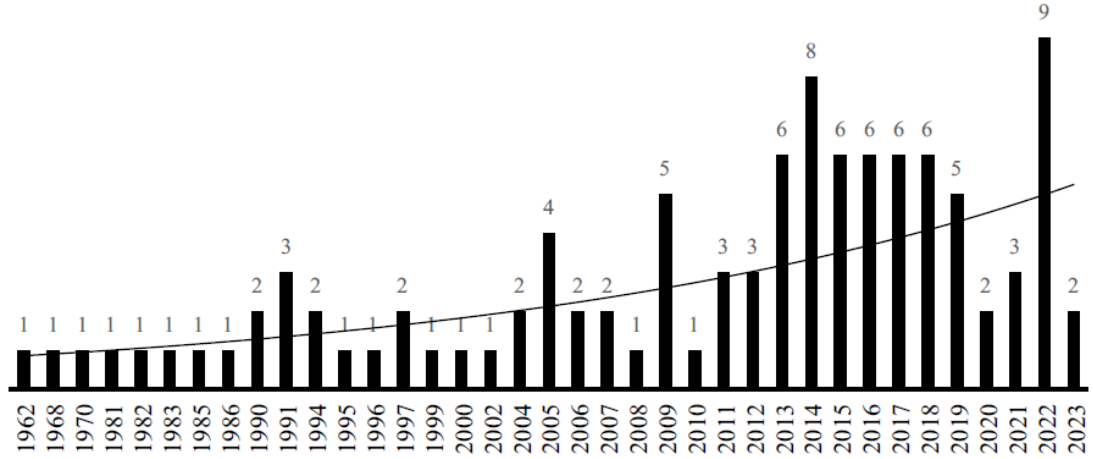
Lyratzakis ve ark. (2021), genişletilmiş polistiren (EPS) blokların, farklı zemin altı ve demiryolu dolgu malzeme koşullarındaki demiryolu setlerinde oluşan zemin titreşimlerini azaltmadaki etkinliğini araştırmışlardır. EPS blokları, setin kenar dolgu malzemesi, hendek dolgu malzemesi veya bunların kombinasyonu olarak uygun yerlere yerleştirilmiştir. Birleştirilmiş dolgu-zemin modelinin dinamik tepkisini doğru bir şekilde hesaplamak için üç boyutlu bir sayısal model geliştirilmiştir. Kaya, çakıllı yoğun kum, sert ve yumuşak kil olarak sınıflandırılan dört tipik toprak türü incelenmiştir. Ek olarak, dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin değişiminin, yüksek hızlı tren titreşimleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Setin kenarına dolgu

malzemesi olarak EPS blok uygulaması yapılmasının, dolgu çakıllı, sert veya yumuşak kil ile yoğun kum üzerindeki 0-40 Hz frekans aralığındaki zemin titreşimlerini başarılı bir şekilde azalttığı görülmüştür. Ayrıca EPS blokları ile doldurulmuş hendek kullanımının, çakıllı yoğun kum, sert veya yumuşak kil sınıflı zeminlerde, özellikle 30 Hz ile 50 Hz frekans aralığındaki zemin titreşimlerini azalttığı tespit edilmiştir.

Peplow ve ark. (2021), yeni bir yaklaşım olarak; titreşim ve gürültü bariyerlerini tek bir çatı altında birleştirmenin verimliliğini araştırmak amacıyla; zemin titreşimi için yarı analitik sonlu elemanlar yöntemi ve ses yayılımı için sınır eleman yöntemini kullanarak sayısal araştırmalar yapmışlardır. Zemin yüzeyine rijit bir şekilde tutturulmuş veya toprağa dikey olarak gömülü çeşitli bariyer konfigürasyonlarının titreşim ve gürültü azaltma üzerindeki etkisini araştıran parametrik analizler yapılmıştır. Gürültü ve zemin bariyerlerinin beraber kullanımının, demiryolu hattı kenarındaki sakinler üzerindeki olumsuz etkiyi azaltma potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmanın sonucunda; tren hattından 80 m uzaklıkta konuşlandırılan gömülü haldeki 4 m'lik beton duvarla birleştirilmiş tipik bir 3 m'lik gürültü perdesinin, 12 dB'lik bir gürültü kaybı ve titreşim genliklerinde %8'lik bir azalmaya yol açtığı görülmüştür.

Cai ve ark. (2021), yüzey dalgasının azaltılması için geliştirilmiş polistiren (EPS) ve betondan oluşan kompozit bir dolgulu hendek önermiştir. İvme verilerini ve bunlara karşılık gelen hâkim frekansları elde etmek için yükseltilmiş bir şehirlerarası demiryolu hattına yakın arazide saha testleri yapılmıştır. Daha sonra, katmanlı zeminde yüzey dalgasının dağılım ilişkisini ve titreşim azaltma etkilerini ortaya çıkarmak için COMSOL yazılımının kullanıldığı iki boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Periyodik kompozit dolgulu hendeklerin farklı parametrelerinin tren kaynaklı yer titreşimini azaltma performansı sayısal olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, önerilen kompozit periyodik dolgulu hendeğin; yalnızca beton veya EPS içeren periyodik dolgulu hendeklere kıyasla zemin titreşimi yalıtımında daha iyi bir performans sunduğu göstermiştir. Hendek derinliğinin belli bir değere kadar artması, periyodik kompozit dolgulu hendeğin titreşim izolasyon performansını iyileştirmiştir; ancak titreşim enerjisinin esas olarak bir Rayleigh dalga boyunun derinliği boyunca yoğunlaşması nedeniyle hendek derinliğinde devam eden artışın, titreşim yalıtımı üzerinde çok az etkisi olduğunu göstermiştir.

Şekil 1.5'te titreşim izolasyonu için yalıtım bariyerlerinin kullanıldığı yaklaşık 100 adet çalışmanın bir özeti sunulmuştur. Buradan anlaşılabileceği üzere bu alandaki yeni araştırma yayınlarının sayısında 2010 yılından itibaren üstel bir büyüme olduğu açıktır. Bu eğilimin sebebi sanayileşme ve kentleşmedeki hızlı artışa bağlı olarak nüfusun büyük şehirlerde birikmesi ve bunun da nüfus yoğunluğundaki artışla birlikte arazi kıtlığına yol açarak ulaşım sistemlerinin günlük şehir hayatı içerisine entegre olmuş olmasıdır (Majumder ve Venkatraman, 2023).



Şekil 1.5. 1962 yılından bu yana dalga bariyerlerinin ele alındığı çalışmalar (Majumder ve Venkatraman, 2023).

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı yüksek hızlı trenlerin özellikle yumuşak zemin ile karakterize edilen bölgeler ve bu bölgelere inşa edilmiş yapılar üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde araştırmak ve söz konusu çevresel titreşimlerin azaltılması için tasarlanan çeşitli dalga bariyer tiplerinin titreşim enerjisini yutma kapasitesini tam ölçekli deneysel çalışmalarla yerinde incelemektir. Araştırma kapsamında;

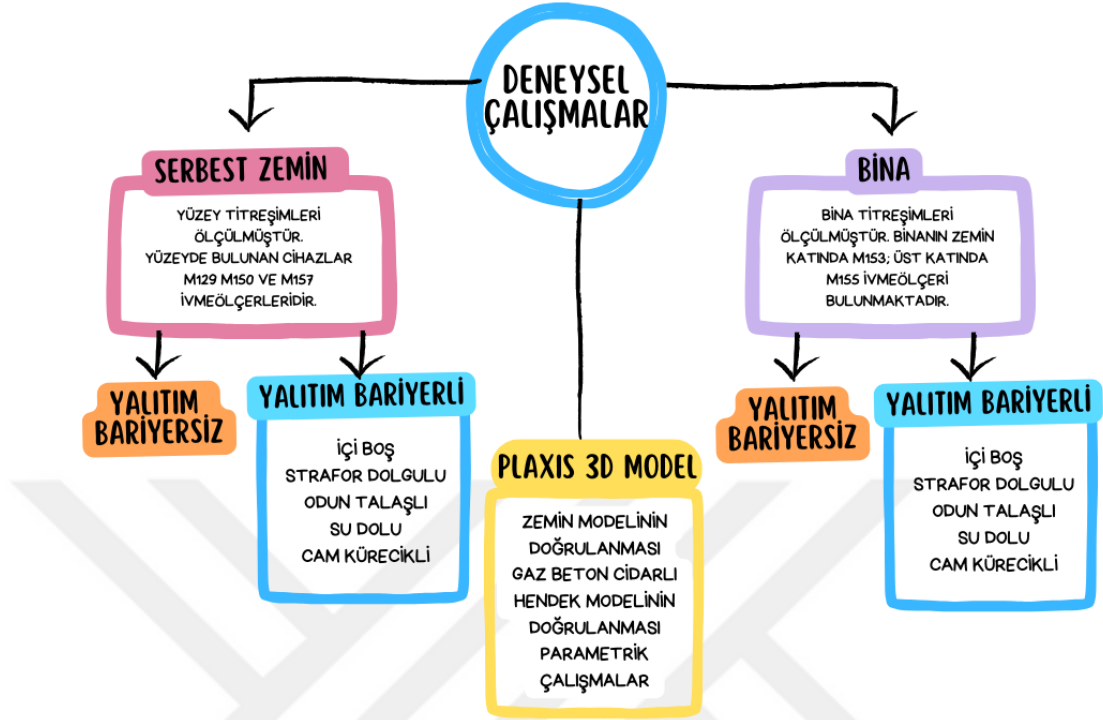
-Titreşim dalgası iletkenliği yüksek olan yumuşak zeminli bölgelerde yüksek hızlı trenlerin neden olduğu titreşimlerin özellikleri ve büyüklüğü nedir?

-Bu titreşimler demiryolu hatlarına yakın konumdaki bina sakinlerinin konfor düzeyini nasıl etkilemektedir?

-Çevresel titreşimlerin hassas ekipman ve insan refahı üzerindeki negatif etkilerini azaltmak için düşük bütçeli ve çevre dostu stratejiler geliştirilebilir mi? gibi soruların yanıtlanması amaçlanmaktadır.

Bu doğrultuda Türkiye'nin en yüksek hızlı tren güzergâhlarından biri olan İstanbul-Ankara tren hattı yakınında, çok zayıf zemin ile karakterize edilen bir sanayi ve yerleşim bölgesi olan Pamukova ilçesi test sahası olarak seçilmiştir. Bu bölgede yedi farklı tarihte üç farklı sefer için beş adet ivmeölçer kullanılarak bir dizi tren geçişi kayıt altına alınmıştır. Her bir titreşim kaydının üç ekseninde incelendiği düşünüldüğünde toplamda 945 adet ivme, hız ve deplasman kaydı bu doktora çalışması kapsamında değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bölgeye tek katlı betonarme bir yapı inşa edilerek çevresel titreşimlerin yapı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bu yapının toplumsal (yaşam kalitesi) ve ekonomik (hassas cihazların işlevselliği) risk teşkil edecek dinamik kuvvetlerden korunması için yapı yakınına yerleştirilen ve yenilikçi tasarımı ile öne çıkan bir dalga bariyeriyle pasif izolasyon yönteminin etkinliği incelenmiştir. İlgili literatürden açık hendek tipi dalga yalıtım sistemlerinin genellikle en yüksek düzeyde performans gösterdiği bilinmesine karşın özellikle zayıf zeminlerde derin hendek uygulamalarının güçlüğü de dikkate alınması gereken bir konu olarak göze çarpmaktadır. Bu endişe, açık hendeğin titreşim enerjisini soğurma kapasitesini büyük oranda azaltmayacak ancak buna ek olarak derin kazılarda stabilite problemini ortadan kaldıracak bir malzeme arayışını beraberinde getirmiş ve bu amaçla düşük yoğunluklu gaz beton panellerin kullanımı fikri doğmuştur. Gaz beton panellerin birer iç cidar vazifesi görecektir şekilde tasarlandığı dikdörtgen açık hendek uygulamasının yanı sıra bariyerin içinde geri dönüştürülebilir atık malzemelerin kullanılmasının titreşim yalıtımına ilave katkısının olup olamayacağı da araştırma kapsamında incelenmiştir. Gerçekleştirilen yedi arazi ölçümünün ikisinde bariyersiz durumu temsil eden doğal saha koşullarında ölçümler alınmış geri kalan beş ölçümde ise sırasıyla içi boş bariyer, strafor köpüklü bariyer, odun talaşlı bariyer, su dolu bariyer ve cam kürecikli bariyer test edilmiştir. Yüksek hızlı demiryolu güzergâhı yakınındaki bir test binasının önüne yerleştirilen hendek tipi pasif dalga bariyeri modelinde kullanılan dolgu malzemesinin yer hareketi dalgalarını iletme ve yansıtmadaki etkinliğinin yanı sıra titreşim enerjisini absorbe etme kabiliyetini insan algısına ve hassas cihazların çalışmasına etkisi açısından daha anlaşılır ve kolay karşılaştırılabilir bir şekilde ortaya koymak amacıyla, bariyerin önünde ve arkasında serbest zemin üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerden kaydedilen yüzey titreşim hareketleri V_{RMS} ve L_v olmak üzere iki farklı değerlendirme kriteri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca arazi verilerinden hareketle ölçüm yapılan Pamukova bölgesinin PLAXIS 3D adlı yazılım aracılığıyla zemin modeli kurulmuş ve daha sonra

ilgili modele gaz beton panelli açık hendek tipi dalga bariyeri dahil edilerek bir dizi nümerik ve parametrik analizler yapılmıştır.



Şekil 1.6. Tez çalışmasına dair içerik diyagramı

Özetle; bu tez çalışması demiryolu trafiği kaynaklı dinamik etkilerin genlik ve frekans karakteristiklerini serbest zemin yüzeyinde ve yapısal olarak tespit etmek ve efektif bir titreşim azaltma yöntemi önermek için deneysel, nümerik ve parametrik yaklaşımların bir arada kullanıldığı geniş kapsamlı bir araştırmadır. Tam ölçekli saha deneylerinden elde edilen ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesiyle, demiryolu yakınında büyük genlikli yer titreşimlerinden etkilenecek yapılar için mühendislik pratiğinde ilk defa uygulanan titreşim yalıtım performansı yüksek, gaz beton duvarlı, iç dolgusunda geri dönüştürülebilir atık malzeme kullanılmış, hendek tipi farklı özellikte pasif dalga bariyer modelleri geliştirilmiştir.



2. ZEMİNDE TİTREŞİM DALGALARININ YAYILIMI VE DALGA GENLİKLERİNİN AZALTILMASINA İLİŞKİN YÖNTEMLERE GENEL BİR BAKIŞ

Bu tez çalışmasına konu olan demiryolu kaynaklı titreşimler gibi titreşim kaynaklarının birçoğu zemin yüzeyinde yer almakta ve büyük ölçüde Rayleigh dalgası üretmektedir. Buradan hareketle bu bölümde zeminde özellikle Rayleigh titreşim dalgası yayılım mekanizmasına dair temel bazı kavramlar sunulacak ve söz konusu titreşimlerin azaltılmasına yönelik deneysel yöntemlerin teorisine değinilecektir.

2.1. Zemin Ortamında Dalga Yayılımı

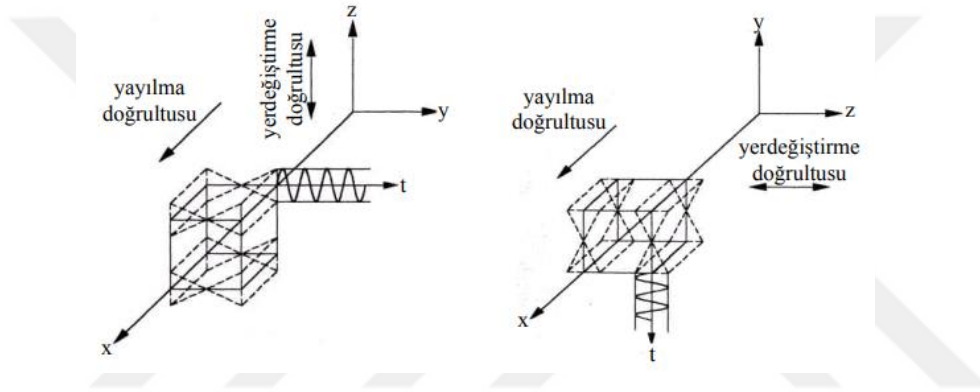
Zemin ortamındaki titreşim hareketini yorumlamak için dalga yayılımının temellerini anlamak oldukça önemlidir. Karayolu ve demiryolu trafiği, patlama ve kazık çakma, makine temelleri gibi titreşim kaynaklarının çoğu zemin yüzeyinde veya yüzeye yakın etkilediğinden bu tip dinamik yükler titreşim izolasyonunun öncelikli araştırma konusudur. Bu dalgalar elastik dalgalar olarak yayılıp yüzey dalgaları ve cisim dalgaları olarak kategorize edilmektedir. Cisim dalgaları zeminde hacim değişikliği veya dönme yoluyla yayılırken genişleme ve sıkışma hareketleri ile karakterize edilenler basınç dalgası (P-birincil dalga), zeminde yana doğru kayma hareketi oluşturan enine dalgalar ise kayma dalgaları (S-ikincil dalga) olarak isimlendirilmektedir. Birincil ve ikincil dalgalara ait yayılma hızlarını veren ilişki Denklem 2.1 ve 2.2’de sırasıyla ifade edilmiştir.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{vE}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.3)$$

Burada verilen λ sembolü Lamé sabiti, G sembolü kayma modülü, ρ ise zeminin yoğunluğunu göstermektedir. Denklem 2.3'te ise elastisite modülü ve Poisson oranı sırasıyla E ve ν sembolleri ile gösterilmiştir. Homojen, izotrop ve sonsuz bir elastik ortamda yalnızca cisim dalgaları yayılırken, yüzey dalgalarının yayılabilmesi için ise sınırlı yani yarı sonsuz bir ortama ihtiyaç vardır. Düşük frekanslı ve yüksek genlikli bu dalgalar Rayleigh ve Love dalgaları olarak isimlendirilmektedirler (Şekil 2.1). Love dalgaları sadece tabakalı ortamda oluşabilirler ve SH dalgalarının yüzey tabakası içinde girişimi ile karakterize edilirler. Rayleigh dalgasının oluşumu ise cisim dalgalarının süperpozisyonu ilkesine dayanmakta olup birincil dalga (P dalgası) ve ikincil dalganın (S dalgası) düşey bileşeninin girişimiyle açıklanmaktadır.



Şekil 2.1. Rayleigh ve Love dalgalarının yayılma biçimi (Kramer, 1996).

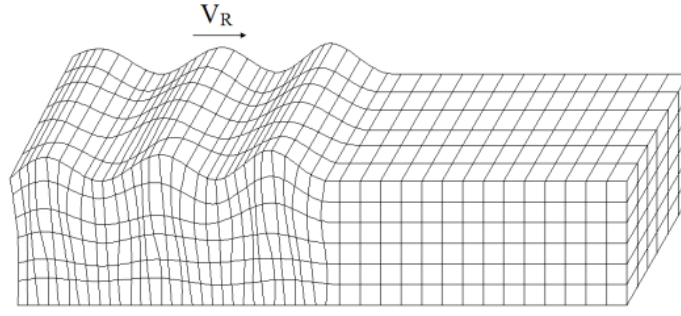
İlk olarak 1885 yılında İngiliz fizikçi John William Strutt tarafından incelenen ve yer küre boyunca yüzeyde yuvarlanarak ilerlediklerinden “ground roll” olarak da bilinen (Şekil 2.2) Rayleigh dalgalarının yayılma hızı Denklem 2.4-7’de verilmiştir.

$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad (2.4)$$

$$K = \frac{V_R}{V_S} \quad (2.5)$$

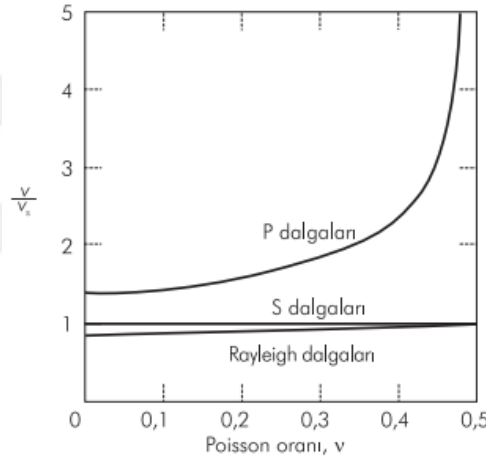
$$\alpha = \frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}} \quad (2.6)$$

$$V_R = \frac{0.86 + 1.14\nu}{(1 + \nu)} V_S \quad (2.7)$$



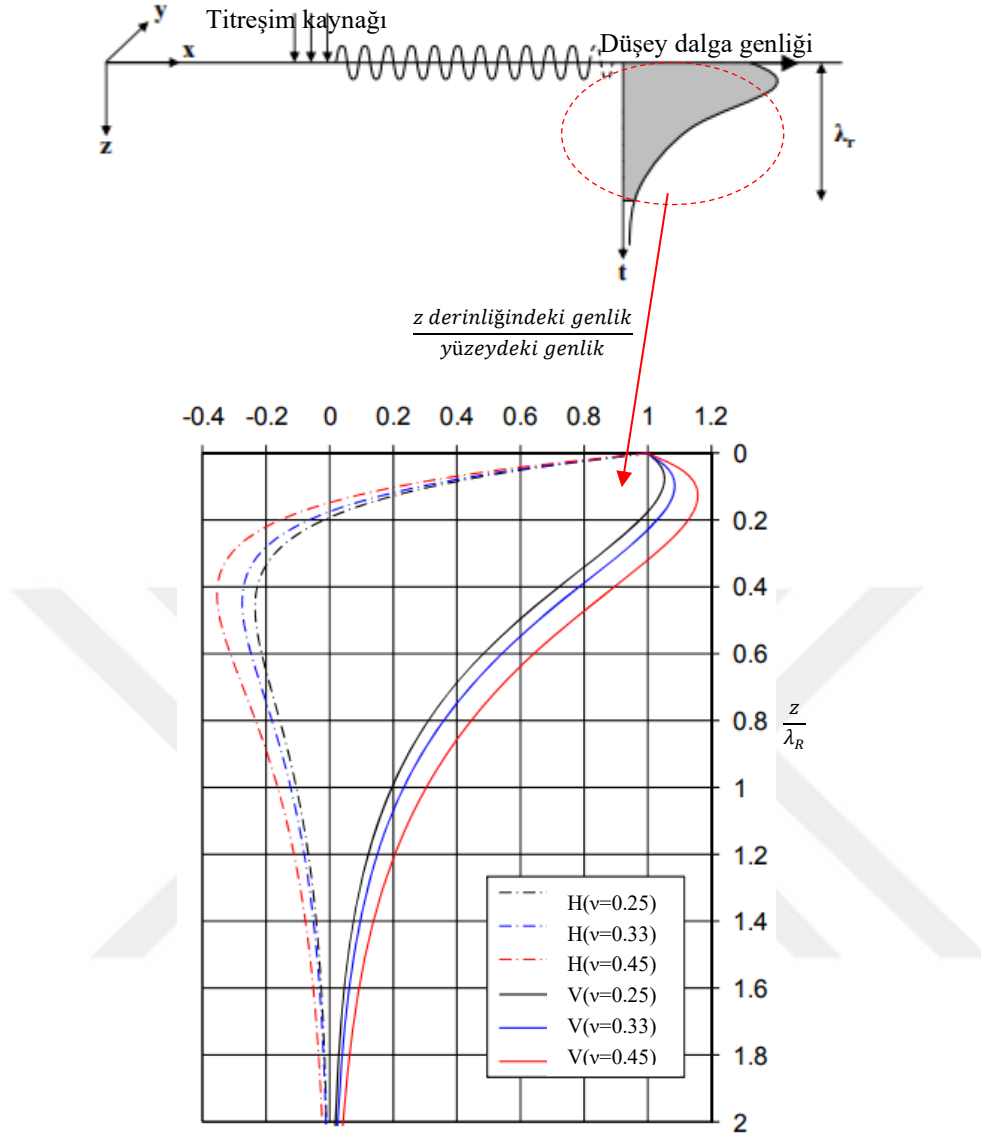
Şekil 2.2. Rayleigh dalgasının yayılımı (Toygar, 2023).

Zeminin Poisson oranı 0 ve 0.5 arasında olduğundan Rayleigh dalgası yayılma hızı 0.86 ve 0.95 arasında lineer olarak değişmekte ve Poisson oranının 0.5 hariç bütün değerlerinde kayma dalgalarından daha düşük hızla ilerlediği anlaşılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Rayleigh dalgası ve cisim dalgası yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi (Kramer, 1996).

Titreşim genliklerinin derinlik ile hızla azalması bu dalga türünü diğerlerinden ayıran en önemli özelliklerden biridir. Richart ve diğerleri (1970) Rayleigh dalgasının genliğinin zemin derinliği ile zayıflamasını incelemiştir. Yarı-uzay, 0.25 ve 0.5 aralığında farklı Poisson oranları için homojen, izotropik ve elastik olarak modellenmiştir. Rayleigh dalgasının yatay ve düşey bileşenleri yüzey seviyesindeki Rayleigh dalgası genliği ile normalize edilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey hareketi (Azar, 2008).

Böylelikle Rayleigh dalgasının bileşenleri için genlik oranları normalize edilmiş derinliğin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Şekil 2.4'te derinliğe bağlı titreşim genliklerindeki değişim görülmektedir. Rayleigh dalgasının genliği $1.0 \lambda_R$ normalleştirilmiş derinlikte %75 azalmaktadır. Burada λ_R , Rayleigh dalga uzunluğudur. Normalleştirilmiş derinliğin $0.2 \lambda_R$ 'ye kadar olduğu bölgede yatay genlik bileşeni azalırken düşey bileşende artış gözlenmiştir. Daha sonra artan derinlik beklendiği gibi düşey yönde daha küçük bir genlikle sonuçlanmıştır. Bu durum Rayleigh (1885) tarafından belirtildiği gibi Rayleigh dalgasının etki bölgesinin yüzeye yakın bir alanla sınırlı olduğunu doğrulamaktadır. Haupt (1995) Rayleigh dalgasının nüfuz bölgesinin zemine doğru yaklaşık bir dalga boyu olduğunu belirtmiştir. Yatay bileşen için $0.2 \lambda_R$ ile $0.5 \lambda_R$ derinlikleri arasında ters yön için genlikteki artış, Rayleigh

dalgasının geriye doğru hareketine atfedilebilir. Bu derinliğin ötesinde, yatay bileşenin genliği artan derinlikle birlikte tekrar azalmaktadır. Genel olarak, Rayleigh dalgasının genliğinin derinlikle birlikte azaldığı sonucuna varılabilir (Richart ve ark, 1970; Haupt, 1995). Dikey olarak salınan bir titreşim kaynağı nedeniyle zemin ortamındaki Rayleigh dalga uzunluğu (λ_R), dalga yayılma hızı ve titreşimin frekansı dikkate alınarak aşağıdaki denklemle hesaplanabilir.

$$\lambda_R = \frac{V_R}{(f)} \quad (2.8)$$

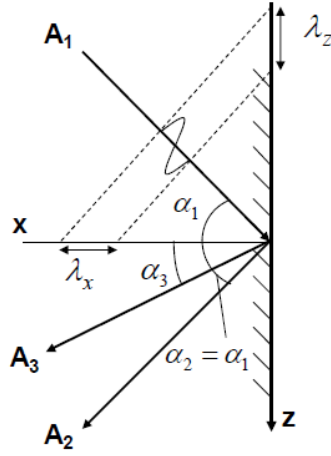
Rayleigh dalgasının genliğini kontrol eden bir diğer özellik de sönümdür. Dalga titreşim kaynağından uzaklaştıkça, malzeme sönümlemesine ek olarak geometrik sönümleme nedeniyle genlik azalır. Dalganın kat ettiği mesafe r olduğuna göre, Rayleigh dalgasının ve cisim dalgalarının yüzeydeki genliği sırasıyla $1/r^{0.5}$ ve $1/r^2$ oranında azalır (Richart ve ark, 1970). Bu, Rayleigh dalgasının yüzeydeki cisim dalgalarından daha yavaş bir oranda zayıfladığı anlamına gelir. Jain ve Soni (2007) dalga bariyerleri tarafından izolasyonun dalga enerjisinin yansımaları, saçılması ve kırınımına bağlı olduğunu belirtmiştir. Kısacası, Rayleigh dalgası cisim dalgalarına kıyasla yüzeyde nispeten daha yüksek genliğe (Lamb, 1903) ve enerjinin çoğuna sahiptir (Miller ve Pursey, 1955). Kaynaktan uzaklık arttıkça, dalgaların geometrik sönümleme özellikleri nedeniyle Rayleigh dalgası daha baskın hale gelir. Bu nedenle Rayleigh dalgası titreşim izolasyonu çalışmalarında büyük önem taşımaktadır.

2.1.1. Rayleigh dalgalarının yansımaları ve iletimi

Titreşim dalgalarının yayılma yolu boyunca karşılaştıkları süreksizlikler, engeller ve farklı malzeme sınır yüzeyleri akustik veya optikten de bilindiği gibi çeşitli dalga türlerinin yansımalarına, kırınımına ve iletimlerine neden olur. Bu davranış, dalga ileten ortamın farklı malzeme özelliklerinden ve dalga hızında ortaya çıkan değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Burada P ve SV cisim dalgalarının girişimleri sonucu oluşan Rayleigh dalgasının yayılma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için sınırlardan yansıyan bu cisim dalgalarının davranışı teorik olarak incelenecektir. Burada ifade edilen sınır kavramı zeminde açılan düşey gaz beton duvarlı hendek tipi bariyerin yüzeyi olarak düşünülebilir.

Bir ortam sınırına gelen basınç dalgası yansıyan birer P ve S dalgası oluşturur. Denklem 2.9-2.10'da gelen sıkıştırma (basınç) dalgası (A_1), yansıyan P ve S

dalgalarının genliği (sırasıyla A_2 ve A_3) ve yüzey normaliyle ilgili ilişkiler (Şekil 2.5) sunulmuştur.



Şekil 2.5. Ortam sınırında basınç dalgasının yansıması.

$$\sin\alpha_1 \cos 2\alpha_3 (A_1 + A_2) - \sin 2\alpha_3 \sin\alpha_3 A_3 = 0 \quad (2.9)$$

$$2\cos\alpha_1 \sin\alpha_3 (A_1 - A_2) - \cos 2\alpha_3 A_3 = 0 \quad (2.10)$$

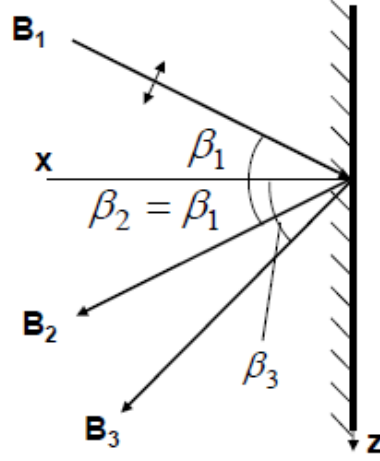
$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_3} \quad (2.11)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_P}{V_P} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = 1 \quad (2.12)$$

Denklem 2.11 ve 2.12’de farklı hızlara sahip tabakalar arasında oluşan bir ara yüzeye gelen dalgaların kırılma ve yansımasını tanımlayan Snell yasası uygulanmıştır. Basınç dalgası ile benzer şekilde, gelen bir kayma dalgasının yansıması da birer S ve P dalgalarından oluşur. Bu dalgaların genliği için aşağıdaki ilişkiler yazılabilir.

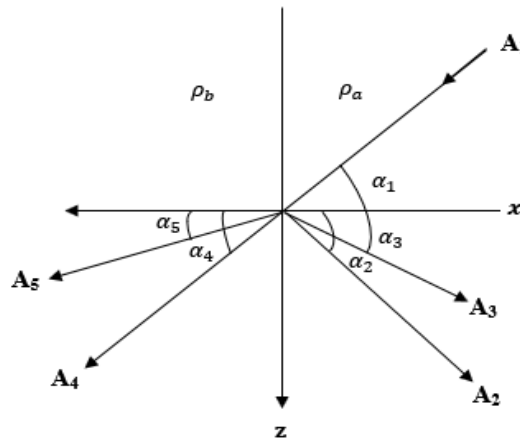
$$\sin\beta_1 \sin 2\beta_1 (B_1 - B_2) + \cos 2\beta_1 \sin\beta_3 B_3 = 0 \quad (2.13)$$

$$\cos 2\beta_1 (B_1 + B_2) + 2\cos\beta_3 \sin\beta_1 (B_3) = 0 \quad (2.14)$$



Şekil 2.6. Ortam sınırında kayma dalgasının yansıması.

Yansıyan kayma dalgasının hızının daha düşük olması nedeniyle, kayma dalgasının (β_1) ortam sınırının normaliyle yaptığı açı da yansıyan basınç dalgasının (β_3) yaptığı açıdan daha küçüktür (Şekil 2.6). S dalgasının geliş açısı arttıkça, yansıyan basınç dalgasının açısı da artar ve $\beta_3 = 90^\circ$ 'lik bir açığa ulaşır. Buradan itibaren (kritik geliş açısı β_{crit}), yansıyan basınç dalgası ortamın kenarı boyunca yayılır. Bu geliş açısına kadar 2.13 ve 2.14 denklemleri hala gerçek bir çözüme sahiptir. İki malzemenin ara yüzüne gelen bir cisim dalgası normalde iki dalga şeklinde yansır (Şekil 2.7). Buna ek olarak, iki dalga kırılır ve diğer ortama iletilir. Bir basınç dalgası (A_2, α_2) ve bir kesme dalgası (A_3, α_3) a ortamına yansıtılırken diğer bir basınç dalgası (A_4, α_4) ve kesme dalgası (A_5, α_5) ise x-z düzlemine gelen bir basınç dalgası tarafından ikinci ortama taşınır. Bu dalga iki malzemenin ara yüzüne A_1 genliği ve x eksenine α_1 açısı ile çarpar.



Şekil 2.7. İki malzemenin ara yüzüne gelen bir basınç dalgasının yansıması ve kırılması.

$$\frac{\sin\alpha_1}{V_1} = \frac{\sin\alpha_2}{V_2} = \frac{\sin\alpha_3}{V_3} = \frac{\sin\alpha_4}{V_4} = \frac{\sin\alpha_5}{V_5} \quad (2.15)$$

$$V_1 = V_2 = V_{P,a} ; \alpha_1 = \alpha_2 ; V_3 = V_{S,a} ; V_4 = V_{P,b} \text{ ve } V_5 = V_{S,b} \quad (2.16)$$

Yoğunluğu ρ_a ve Poisson oranı ν_a olan a ortamından ρ_b ve ν_b olan b ortamına gelen bir dalga için arayüzeyde aşağıdaki sınır koşulları sağlanmalıdır:

- i. Arayüze normal yerdeğiştirmeler; $u_{x,a}=u_{x,b}$
- ii. Arayüze teğet yerdeğiştirmeler; $u_{z,a}=u_{z,b}$
- iii. Arayüze normal gerilmeler; $\sigma_{xx,a}=\sigma_{xx,b}$
- iv. Arayüze teğet gerilmeler; $\sigma_{zx,a}=\sigma_{zx,b}$

Bir ortam kenarındaki yansıma benzer şekilde sırasıyla i. ve ii. sınır koşulları yerine getirilerek 2.17 ve 2.18 denklemleri türetilebilir.

$$\cos\alpha_1(A_1 - A_2) + \sin\alpha_3 A_3 - \cos\alpha_4 A_4 - \sin\alpha_5 A_5 = 0 \quad (2.17)$$

$$\sin\alpha_1(A_1 + A_2) + \cos\alpha_3 A_3 - \sin\alpha_4 A_4 + \cos\alpha_5 A_5 = 0 \quad (2.18)$$

Denklemler 2.1 ve 2.2 ile birlikte üçüncü ve dördüncü sınır koşulları göz önünde bulundurulursa aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

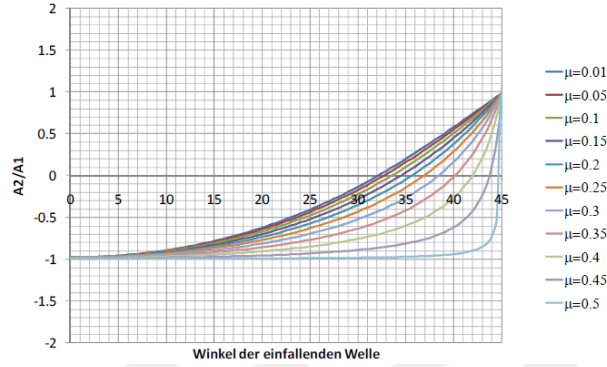
$$\sum [(\lambda + 2G) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z}]_a = \sum [(\lambda + 2G) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z}]_b \quad (2.19)$$

$$\lambda + 2G = \rho V_P^2; G = \rho V_S^2; \lambda = \rho V_P^2 - 2\rho V_S^2 \quad (2.20)$$

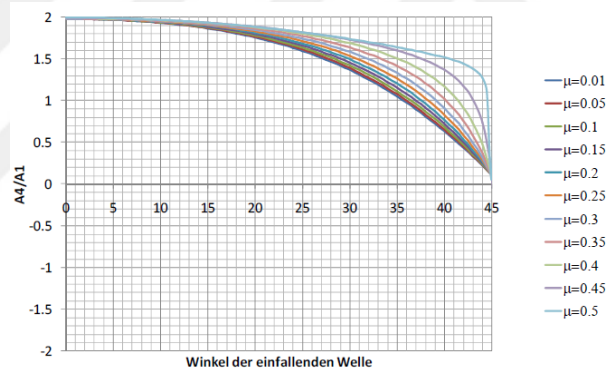
$$\begin{aligned} \cos 2\alpha_1(A_1 + A_2)V_{P,a} - \sin 2\alpha_3 A_3 V_{S,a} - \cos 2\alpha_4 A_4 V_{S,b} \frac{\rho_b}{\rho_a} \\ - \sin 2\alpha_5 A_5 V_{S,b} \frac{\rho_b}{\rho_a} = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \rho_a V_{S,a}^2 [\sin 2\alpha_1(A_1 - A_2) - \cos 2\alpha_3 A_3 \frac{V_{P,a}}{V_{S,a}}] \\ - \rho_b V_{S,b}^2 [\sin 2\alpha_4 A_4 \left(\frac{V_{P,a}}{V_{P,b}}\right) - \cos 2\alpha_5 A_5 \frac{V_{P,a}}{V_{S,b}}] = 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Zemin içerisine düşey yerleştirilmiş bariyer sistemlerine gelen dalgaların arayüzeye normale göre küçük bir açıyla geldiği varsayılabilir. Ancak küçük açılarda zeminin farklı Poisson oranları için gelen ve yansıyan/kırılan dalga genlik oranlarının büyük ölçüde değişmediği bilinmektedir (Şekil 2.8). Bu sebeple özel durum olarak arayüzeye normal gelen basınç dalgaları konusu irdelenebilir.



(a) Yansıyan ve gelen basınç dalgası genlik oranları



(b) Kırılan ve gelen basınç dalgası genlik oranları

Şekil 2.8. Yansıyan (a) ve kırılan (b) basınç dalgası genliklerinin gelen dalga genliğine oranının Poisson katsayısına göre değişimi (Azar, 2008).

Bu durumda yansıyan ve kırılan dalgalar da arayüzeye normaldir ve herhangi bir kesme dalgası oluşmaz. Yansıyan ve iletilen dalgalar için aşağıdaki ilişkiler geçerlidir.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\rho_b V_{P,b} - \rho_a V_{P,a}}{\rho_b V_{P,b} + \rho_a V_{P,a}} \quad (2.23)$$

$$\frac{A_4}{A_1} = \frac{2\rho_a V_{P,a}}{\rho_b V_{P,b} + \rho_a V_{P,a}} \quad (2.24)$$

Denklem 2.23 ve 2.24 aracılığıyla yansıyan ve kırılan dalga enerjileri arasındaki ilişki belirlenebilir.

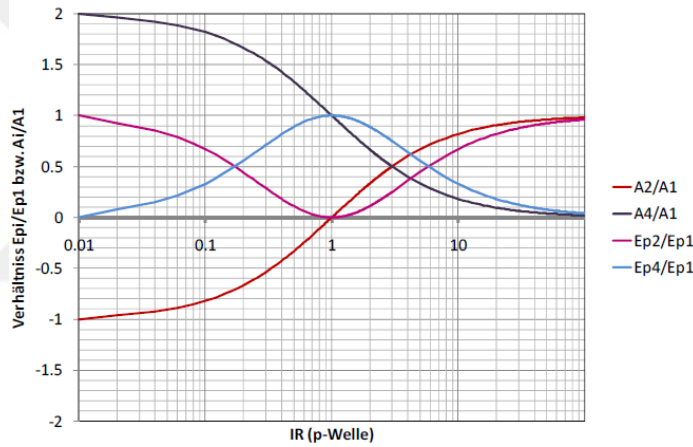
$$A_4^2 = \frac{2V_{P,b}}{(\lambda_b + 2G_b)w^2} E_{P,4} \text{ ve } A_1^2 = \frac{2V_{P,a}}{(\lambda_a + 2G_a)w^2} E_{P,1} \quad (2.25)$$

$$\frac{E_{P,4}}{E_{P,1}} = \frac{4(\rho_b V_{P,b})(\rho_a V_{P,a})}{(\rho_b V_{P,b} + \rho_a V_{P,a})^2} \quad (2.26)$$

$$\frac{E_{P,2}}{E_{P,1}} = \left(\frac{\rho_b V_{P,b} - \rho_a V_{P,a}}{\rho_b V_{P,b} + \rho_a V_{P,a}} \right)^2 \quad (2.27)$$

$$E_{P,1} = E_{P,2} + E_{P,4} \quad (2.28)$$

$z = \rho_b V_{P,b}$ ifadesi b ortamının bir basınç dalgasına karşı empedansı olarak adlandırılır. Şekil 2.9'da empedans oranlarının bir fonksiyonu olarak iki malzemenin arayüzüne normal gelen bir P dalgası için enerji ve genlik oranları gösterilmiştir.

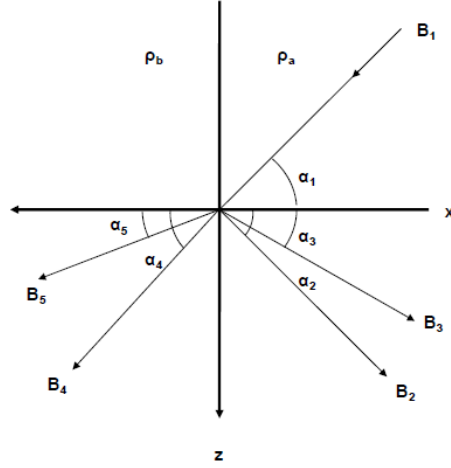


Şekil 2.9. Empedans oranlarının bir fonksiyonu olarak iki malzemenin arayüzüne normal gelen bir P dalgası için enerji ve genlik oranı (Azar, 2008).

Bir P dalgası için, iki malzemenin empedans oranı (IR) şu şekilde tanımlanır:

$$IR_P = \frac{\rho_b V_{P,b}}{\rho_a V_{P,a}} \quad (2.29)$$

Gelen bir P dalgasına benzer şekilde, B₁ genlikli bir S dalgası için yansıyan ve iletilen dalga genlik oranları da yukarıda açıklanan sınır koşulları yardımıyla belirlenebilir.



Şekil 2.10. İki malzemenin arayüzeyine gelen bir kayma dalgasının yansıması ve kırılması.

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{\rho_a V_{S,a} - \rho_b V_{S,b}}{\rho_b V_{S,b} + \rho_a V_{S,a}} \quad (2.30)$$

$$\frac{B_5}{B_1} = \frac{2\rho_a V_{S,a}}{\rho_b V_{S,b} + \rho_a V_{S,a}} \quad (2.31)$$

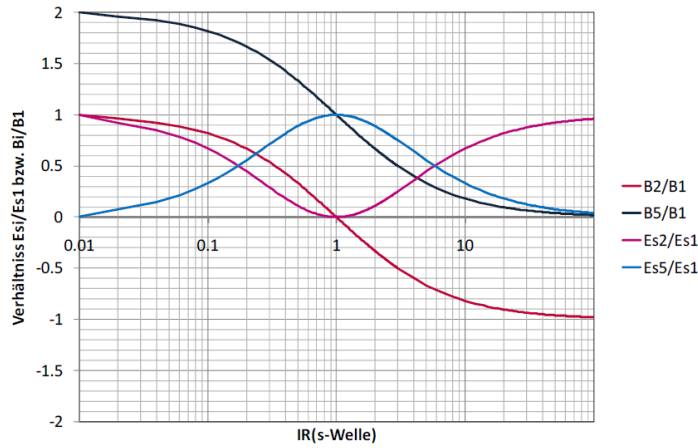
$$IR_S = \frac{\rho_b V_{S,b}}{\rho_a V_{S,a}} \quad (2.32)$$

Basınç dalgasına benzer bir biçimde kayma dalgası için de empedans Denklem 2.32'deki gibi belirlenir. Yansıyan bir kayma dalgasının enerjisini belirlemek için ise Denklem 2.34 kullanılabilir.

$$\frac{E_{S,5}}{E_{S,1}} = \frac{4(\rho_b V_{S,b})(\rho_a V_{S,a})}{(\rho_b V_{S,b} + \rho_a V_{S,a})^2} \quad (2.33)$$

$$\frac{E_{S,2}}{E_{S,1}} = \left(\frac{\rho_a V_{S,a} - \rho_b V_{S,b}}{\rho_b V_{S,b} + \rho_a V_{S,a}} \right)^2 \quad (2.34)$$

$$E_S = \frac{G}{2} \frac{w^2}{V_S} B^2 \quad (2.35)$$

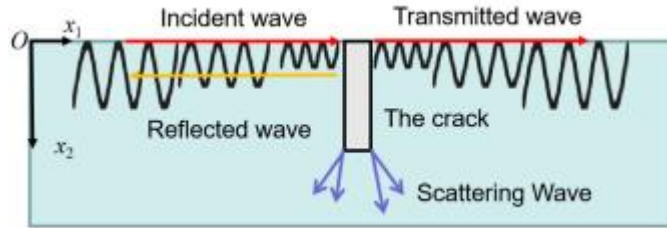


Şekil 2.11. Empedans oranlarının bir fonksiyonu olarak iki malzemenin arayüzüne normal gelen bir S dalgası için enerji ve genlik oranı (Azar, 2008).

Yüzeydeki bir uyarımla ortaya çıkan titreşim enerjisinin önemli bir kısmı Rayleigh dalgaları şeklinde yayıldığından, bunların zemindeki yalıtkan bir cismin etkisi açısından da incelenmesi gerekir. Bir süreksizliğe veya bir ortam kenarına gelen bir Rayleigh dalgası olması durumunda, enerji sadece Rayleigh dalgaları şeklinde yansımaz. Ortamda her yönde yayılan kesme ve basınç dalgaları da üretilir (Richart ve ark, 1970). Buna ek olarak, Rayleigh dalgaları ortam kenarının veya süreksizliğinin yüzeyinde de üretilir. Ancak, hem Rayleigh dalgaları (yüzey dalgaları) hem de cisim dalgaları üretildiği için bu problemin analitik bir çözümü yoktur. Buna ek olarak, yansıyan cisim dalgalarının genliği geliş açısına bağlıdır. Bu da derinliğe bağlı farklı genlik ve eliptik yer değiştirmeler nedeniyle, gelen bir Rayleigh dalgası için tanımlanmamıştır. Bir malzeme arayüzü için durum daha da karmaşıktır çünkü yansıyan ve iletilen Rayleigh dalgasına ve yansıyan cisim dalgalarına ek olarak, iletilen ve kırılan cisim dalgalarının yanı sıra arayüzde arayüz dalgası olarak adlandırılan bir dalga da üretilir. Bu nedenle bu konu literatürde çoğunlukla deneyler veya sonlu eleman hesaplamaları yardımıyla araştırılmış ve süreksizliklerin, ortam kenarlarının ve malzeme ayırma yüzeylerinin Rayleigh dalgaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın odak noktası, gelen titreşim dalgasına ve yüzeyine yaklaşık olarak dik olduğu varsayılabilir zemindeki düşey yalıtım bariyeri olduğundan, yalnızca dikey bir ortam kenarını veya malzeme arayüzünü dikkate alan literatür kaynakları değerlendirilmiştir. Bir ortam kenarına gelen Rayleigh dalgası için çeşitli yansıyan dalgaların enerji oranı De Bremaecker (1958), Knopoff ve Gangi (1960), Lapwood (1960) ve Pilant ve ark. (1964) tarafından çeşitli deneyler yardımıyla belirlenmiştir. Kenar açısına bağlı olarak, testlerde yansıyan cisim dalgaları için çok

farklı enerji bileşenleri belirlenmiştir. Bir atlamanın Rayleigh dalgası üzerindeki etkisini belirlemek için Dally ve Lewis (1968) fotoelastik testler, Bullitt ve Toksöz (1985) ise ultrasonik testler gerçekleştirmiştir. Sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak yapılan hesaplamalar Martel ve ark. (1977) tarafından gerçekleştirilmiştir. Burada, atlama açısına bağlı olarak, yansıyan cisim dalgaları için gelen enerjinin %90'ına varan enerji bileşenleri belirlenmiştir.

Malzeme ayırma yüzeyleri için McGarr ve Alsop (1967), kıtasal faylardaki büyük ölçekli süreksizliklerde meydana gelenler gibi çok düşük frekanslı Rayleigh dalgalarının yansıma ve iletim katsayılarını belirlemek için bir yaklaşım yöntemi geliştirmiştir. Biagi ve ark. (1990) malzeme ara yüzeylerine gelen Rayleigh dalgası için yansıma ve iletim katsayılarını deneyler yoluyla araştırmıştır. Tahribatsız malzeme testleri çerçevesinde, çatlakların gelen Rayleigh dalgaları üzerindeki etkisini belirlemek için de birçok araştırma yapılmıştır. Bunlar arasında Angel ve Achenbach (1983) tarafından yapılan sayısal incelemeler ve Kim ve ark. (1998) tarafından çatlak yüzeyine normal gelen Rayleigh dalgaları ile yapılan ultrasonik testler bulunmaktadır. Song ve ark. (2002) da özellikle beton için sayısal BEM hesaplamaları ve ultrasonik testler gerçekleştirmiştir. Çatlakların Rayleigh dalgaları üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik yeni bir çalışma Li ve ark. (2020) tarafından yürütülmüştür. Bu makalede, bir lazer tarafından üretilen geniş bantlı Rayleigh dalgası ile yapay bir dikdörtgen yarığın etkileşimi teorik ve deneysel olarak analiz edilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Rayleigh dalgası ile çatlaklar arasındaki etkileşim (Li ve ark, 2020).

Farklı frekans içeriğinde dalgaların ve farklı çatlak derinliklerinin yansıyan ve iletilen dalgalar üzerindeki etkisini inceleyen bu ve benzeri birçok çalışma problemin şematik gösteriminden de anlaşılabilir. Üzere hendek tipi dalga yalıtım sistemlerinin çalışma prensibi ve etkinliğini belirlemede bir çeşit küçük ölçekli deneyler dizisi olarak düşünülebilir.

Özetle, literatürde ara yüzeyde yansıyan cisim dalgalarının gelen Rayleigh dalgasına enerji oranları belirlenmiştir. Farklı ortam ayırma yüzeylerinin incelendiği senaryolarda gelen Rayleigh dalgası arayüze normal olduğunda enerjinin %90'ına kadarı cisim dalgaları şeklinde yansımıştır. Çok farklı karakteristik değerlere sahip malzeme arayüzeyleri için de benzer değerler belirlenmiştir. Çatlağın önündeki ve arkasındaki genlikler ölçülmüş ve bunlardan yansıyan veya iletilen enerji belirlenmiştir. Nispeten kısa çatlaklar veya yarıklar için literatür kaynaklarının çoğunda 0.2 iletim katsayısı belirlenmiştir. Bu da enerjinin yaklaşık %80'inin yansıtıldığını ve titreşim enerjisinin sadece küçük bir kısmının süreksizliğin arkasına iletildiğini göstermektedir.

2.2. Titreşimlerin Ölçülmesi ve Azaltılmasına İlişkin Yöntemler

Dinamik bir etki sonucu oluşan karmaşık karakterdeki çeşitli titreşimler basit bir ifadeyle bir dizi salınım olarak tanımlanabilir. Bu salınımın genliği ivme, hız ve yer değiştirme gibi kavramlarla belirlenebilir. Bu nedenle titreşim ölçülmesi ve yalıtımı ile ilgili çalışmalar salınımların genliğini tespit etmek için bu üç göstergeden bir veya daha fazlasını kullanmıştır. Tablo 2.1'de bu alanda yapılan bazı çalışmalara dair bir özet sunulmuştur. Titreşim yalıtımı üzerine yapılan deneysel çalışmaların temel odak noktası, önerilen sistemin titreşimleri azaltmadaki etkinliğinin değerlendirilmesidir. Bu etkinlik tipik olarak dalga bariyeri uygulanmış ve uygulanmamış titreşim seviyelerinin karşılaştırmalı analizi yoluyla ölçülür (Woods, 1968). Titreşim kaynaklarının çeşitliliği göz önüne alındığında, izolasyon sisteminin performansı farklı frekanslarda değişiklik göstermektedir. Örneğin, yüksek hızlı trenler ve metro geçişleri gibi yük kaynakları geniş bir frekans spektrumuna yayılan titreşimler üretirken, makine temelleri baskın bir frekans sergiler.

Tablo 2.1. Titreşimlerin ölçülmesi ve azaltılmasına ilişkin önceki çalışmalar.

Yıl	Araştırmacı	Ölçüm cihazı	Değerlendirme kriteri
2001	Hao vd.	İvmeölçer	İvme-zaman ilişkisi, güç spektrumu, davranış spektrumu
2007	Comina ve Foti	Jeofon	PPV, V_{RMS}
2009	Çelebi vd.	İvmeölçer	Düşey deplasman
2009	Madheswaran vd.	İvmeölçer	PPA, PPV
2011	Alzawi ve El Naggar	Jeofon	PPV, Fourier genliği
2011	Babu vd.	İvmeölçer	PPA
2014	Kouroussis vd.	Üç eksenli ivmeölçer	PPV, titreşim hız seviyesi
2014	Garinei vd.	İvmeölçer	İvme, V_{RMS}
2015	Ülgen ve Toygar	İvmeölçer	PPA
2016	Dijkmans vd.	Jeofon	Titreşim hız seviyesi
2017	Zou vd.	İvmeölçer	Titreşim hız seviyesi
2018	Mahdavisefat vd.	Jeofon	PPV
2018	Sitharam vd.	İvmeölçer	V_{RMS}
2018	Cao vd.	İvmeölçer	A_{RMS} , titreşim hız seviyesi
2018	Ainalis vd.	Üç eksenli sismometre	PPV
2019	Baziar vd.	İvmeölçer	A_{RMS}
2019	Chew ve Leong	Jeofon	PPV
2020	Naghizadehrokni vd.	İvmeölçer, Jeofon	Hız
2021	Toygar ve Ülgen	İvmeölçer	PPA
2021	Huang vd.	Jeofon	İvme, PPA
2023	İstegün vd.	Üç eksenli ivmeölçer	PPA, PPV
2023	Jauhari vd.	İvmeölçer	PPA

Belirli frekanslardaki titreşim genliklerini değerlendirmek için ivme/hız verilerinin 1/3 oktav bant analizi gibi tekniklerle işlenmesi gerekir (Zou ve ark, 2015; 2017; 2020; Dijkmans ve ark, 2016; Cao ve ark, 2018). İzolasyon sisteminin etkinliği genellikle izolasyon sistemi olan ve olmayan senaryolar arasındaki ilişki veya logaritmik olarak ölçeklendirilmiş bir referans hız seviyesine karşı titreşim hızı seviyelerindeki tutarsızlığı temsil eden “insertion loss” parametresi ile ölçülür. Her iki yaklaşım da farklı frekans profilleri ile karakterize edilen gerçek dünya titreşim kaynakları (bkz. Tablo 2.2) ile uğraşırken yaygın olarak kullanılır.

Tablo 2.2. Mevcut çalışmalarda dikkate alınan titreşim kaynakları.

Yıl	Araştırmacı	Yük kaynağı
2001	Hao vd.	Karayolu trafiği
2007	Comina ve Foti	Ağır makine
2009	Çelebi vd.	Elektrodinamik titreşim üretici
2009	Madheswaran vd.	Kazık çakma
2011	Alzawi ve El Naggar	Mekanik osilatör
2011	Babu vd.	Titreşimli plaka kompaktörü
2014	Kouroussis vd.	T2000 tramvay (Brüksel)
2014	Garinei vd.	ETR 500 tren (Campegine)
2015	Ülgen ve Toygar	Titreşimli plaka kompaktörü
2016	Dijkmans vd.	X31 yolcu ve yük treni
2017	Zou vd.	Metro
2018	Mahdavisefat vd.	Elektromekanik vibratör
2018	Ainalis vd.	Patlatma, AM96 Treni
2020	Naghizadehrokni vd.	Servo-hidrolik titreşim üretici
2021	Toygar ve Ülgen	Titreşimli plaka kompaktörü
2021	Huang vd.	Kamyon titreşimi
2023	İstegün vd.	HT65000 yüksek hızlı tren

Farklı titreşim kaynaklarının izolasyonunda kullanılan çok sayıda dalga bariyeri türü vardır. Aşağıda bariyerin üretiminde kullanılan malzeme esas alınarak bir sınıflandırma sunulmuştur.

- i. Açık hendek tipi bariyer
- ii. Esnek bariyer
 - o *Geofoam bariyer*
 - o *Kauçuk dolgulu bariyer*
 - o *Su dolu bariyer*
 - o *Bentonit dolu bariyer*
- iii. Rijit bariyer
 - o *Diyafram duvar tipi bariyer*
 - o *Kazık tipi bariyer*
 - o *Palplanj levha tipi bariyer*
- iv. Kompozit bariyer

Açık hendekler genelde herhangi bir ek malzeme kullanılmadan kazı yoluyla inşa edilir, bu nedenle ayrı bir dalga bariyeri türü olarak kabul edilir. Ancak söz konusu

yalıtım sisteminin hammaddesi toprak ortamından daha yumuşak veya daha sert ise esnek ve rijit bariyer kavramları ortaya çıkar. Örneğin Geofoam, kauçuk talaşı, su ve bentonit ile doldurulmuş hendekler esnek dalga bariyerleri olarak kabul edilirken beton bariyerler, kazıklar ve palplanşlar rijit bariyerlerdir. Birden fazla bariyer türünün kullanıldığı senaryolarda ise yalıtım sistemini tarif edebilmek için kompozit bariyer ifadesi kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasına konu olan yalıtım sisteminin yukarıda ifade edilen herhangi bir başlık altında doğrudan sınırlandırılmayacağı düşünülmektedir. Şöyle ki, zemini desteklemek için seçilen malzemenin düşük empedansı sebebiyle zemin ortamının devamı gibi davranması beklentisi ve dolayısıyla zayıf bir zeminde açık hendek uygulaması fikriyle yola çıkılmış olmasına karşın çalışmanın ilerleyen aşamalarında odun talaşı, strafor, su vb. malzemelerin kullanılmasıyla zayıf zeminde açık hendek fikri kompozit esnek bir bariyer sistemine evrilmiştir. Woods (1968) etkili bir dalga bariyerinin titreşim genliklerinde en az %75 azalma sağlaması gerektiğini öne sürmüştür. Bu nedenle, Richart ve arkadaşlarına (1970) göre, bir dalga bariyerinin titreşim yalıtımı amacıyla başarılı sayılabilmesi için derinliğinin en az $1.0 \lambda_R$ olması gerekir. Dalga bariyeri ve uyarım kaynağı arasındaki mesafe, dalga bariyerinin genişliği, uzunluğu, derinliği gibi yönetici parametreler Rayleigh dalga uzunluğu açısından dikkate alınmalıdır. Woods (1968), bariyer verimliliğinin nicel olarak ifadesi için genlik azaltma oranı (A_R) olarak adlandırılan bir terim tanımlamıştır. Baziar ve ark. (2019) aynı terimi azaltma faktörü (R_F) olarak adlandırmıştır. Farklı araştırmacılar tarafından farklı şekilde isimlendirilse de özetle ölçüm yapılan noktadaki titreşim genliğinin bariyerli ve bariyersiz durumdaki oranı bariyer etkinliğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir. Genlik azaltma oranı (A_R) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$A_R = \frac{A_{\text{bariyerli durum}}}{A_{\text{bariyersiz durum}}} \quad (2.36)$$

Denklem 2.36'da verilen A değeri bir ölçüm noktasındaki titreşimin genliğini ifade eder. Burada bariyerin verimliliği ivme, hız ve yer değiştirme gibi çeşitli kavramlar üzerinden incelenebilir. İzolasyon sisteminin etkinliğini ifade etmek için Baziar ve ark. (2019) tarafından önerilmiş bir başka kavram (BE=Barrier Efficiency) Denklem 2.37'de gösterilmiştir.

$$BE = 100x(1 - A_R) \quad (2.37)$$

Burada değinilmesi gereken bir başka önemli konu bariyer malzemesinden bağımsız olarak hangi izolasyon yönteminin kullanılacağıdır. Titreşim azaltıcı sistemlerin yük kaynağının yakınına yerleştirilmesi durumu aktif yalıtım, korunmak istenen yapı sisteminin yakınına yerleştirilmesi durumu ise pasif yalıtım olarak bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerde pasif yalıtım yaklaşımıyla hareket edilmiştir.

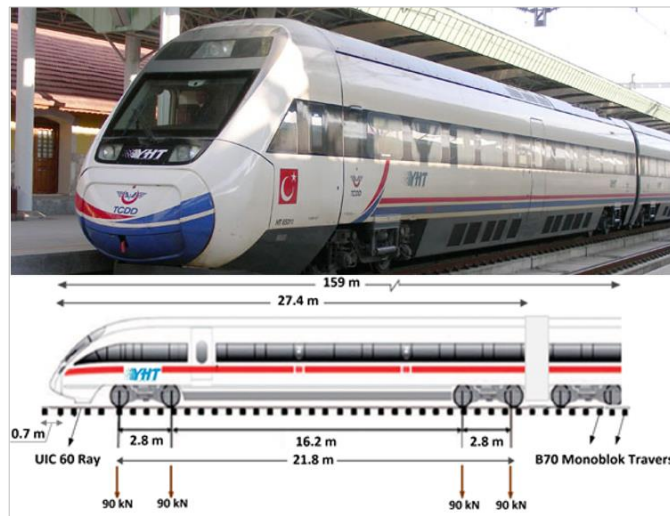


3. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİNİN YAKIN ÇEVREDE OLUŞTURDUĞU TİTREŞİMLERİN ARAŞTIRILMASI VE AZALTILMASINA İLİŞKİN SAHA ÇALIŞMALARI

Bu bölüm titizlikle yürütülen saha çalışmalarının sunumuna ve bir dizi ampirik araştırmanın sonuçlarına ayrılmıştır. Bu araştırmaların odak noktası yüksek hızlı demiryolu trafiğinin neden olduğu titreşimlerin yayılma mekanizmalarını anlamak ve bu etkiler sonucu ortaya çıkan çevresel titreşim probleminin iyileştirilmesi için etkili stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayabilecek olan deneysel sonuçları ortaya koymaktır.

3.1. Yüksek Hızlı Tren Setinin ve Demiryolu Alt Yapısının Genel Özellikleri

Ülkemizde hızlı demiryolu taşımacılığına yönelik ilk girişim 2003 yılında Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları'nın (TCDD) kurulumunu üstlendiği İstanbul-Ankara hattı ile başlamış ve bu hattın ilk etabı olan Ankara-Eskişehir güzergâhında 2009 yılında ilk yüksek hızlı tren seferi gerçekleştirilmiştir. TCDD'nin hızlı yolcu taşımacılığı için kullandığı İspanyol menşeli HT65000 ve Alman menşeli HT80000 olmak üzere iki farklı tipte tren mevcut olup bu çalışmadaki deney sonuçları özellikleri Şekil 3.1'de verilen HT65000 tipi tren setlerini içermektedir.



Şekil 3.1. Çalışmaya konu olan HT65000 yüksek hızlı tren seti ve boyutları.

Demiryolunun taşıtı ve hattının mekanik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Maksimum yolcu kapasitesi 411 ve yolcu vagonlarını çeken lokomotifin uzunluğu 27.4 metredir. Katar yükü 18 tona kadar çıkabilen tren setinde tekerlekler arası mesafe 2.8 m’dir. Toplamda 6 vagonla birlikte yaklaşık 160 m uzunluğa ulaşarak yüksek hızda hareket eden ağır bir kütleye dönüşmektedir. Yolcu durumuna göre 2 vagon daha eklenebilmektedir. Bu tren seti 36 m’lik UIC-60 ray altında ön-germeli, ön-çekmeli monoblok B70 traversler üzerinde hareket etmektedir.

Tablo 3.1. Demiryolu taşıtı ve hattının mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).

Bileşenler	Karakteristikler	Semboller	Büyüklik	Birim
Lokomotif	Dingil yükü	F_z	180	kN
HT 65000	Hareket hızları	V	69.44	m/s
	Kesit alanı	A_r	1.54×10^{-2}	m^2
2UIC 60	Atalet momenti	I_z	6.11×10^{-5}	m^4
	Elastisite modülü	E	2.11×10^8	kN/m ²
	Birim hacim ağırlık	γ	78	kN/m ³
Balast	Rijitlik katsayısı	k_b	1.26×10^5	kN/m
Yay-söndürücü sistem	Sönüm katsayısı	c_b	1.69×10^2	kNsn/m

3.2. Deney Sahası Jeofizik ve Geoteknik Özelliklerine Genel Bir Bakış

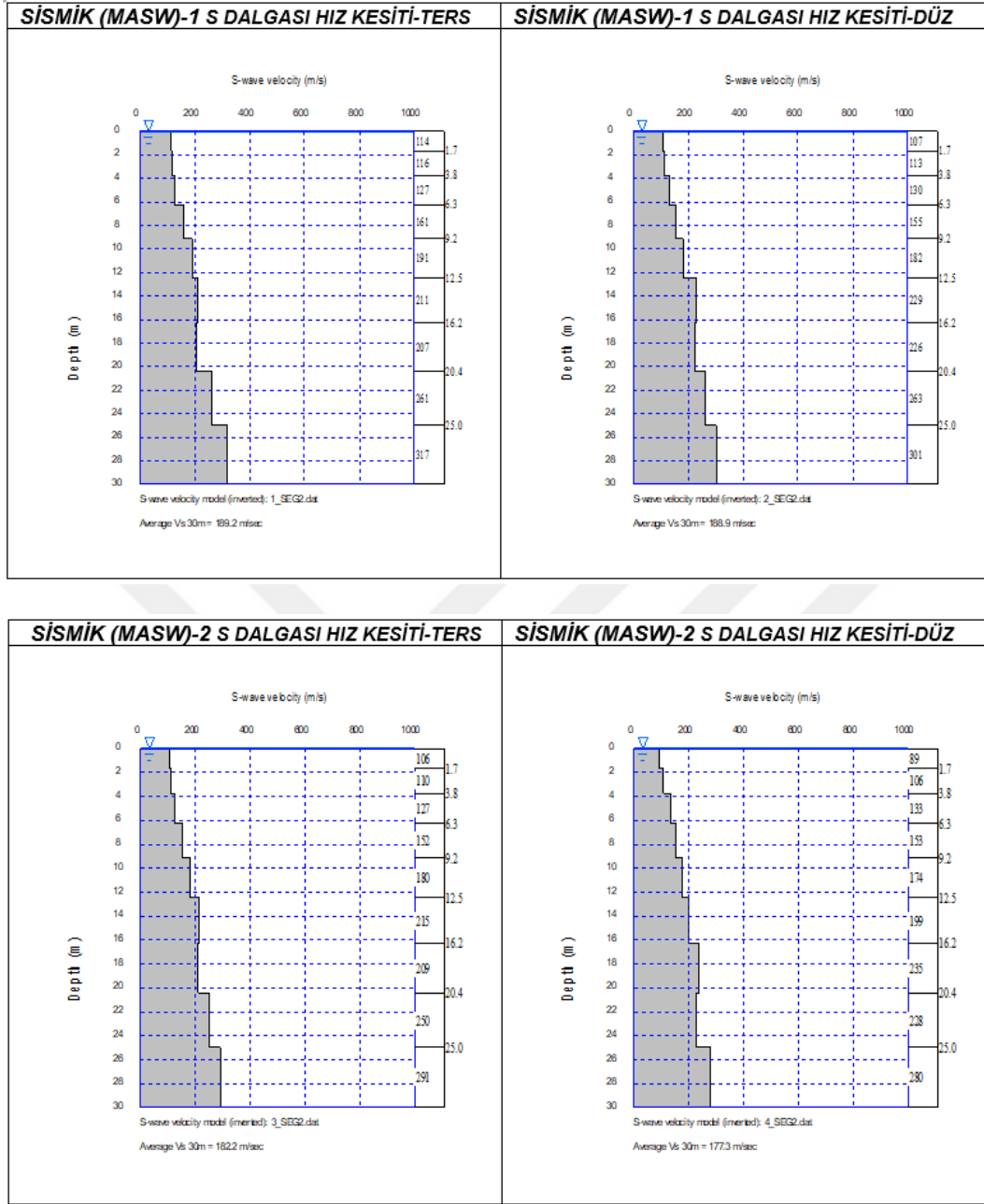
Arifiye’den başlayarak Sakarya Nehri boyunca devam eden Pamukova-Mekece demiryolu parkuru geniş bir alüvyon vadiden geçmektedir. Sapanca ve Pamukova bölgelerindeki zemin formasyonu arasındaki küçük farklılıklar jeolojik geçmişlerinden ve buna bağlı olarak elek analizlerinde tespit edilen süprüntü malzeme danelerinin boyutlarından kaynaklanmaktadır. Test sahası olarak seçilen Pamukova/Yenice bölgesindeki zemin ortamının dinamik özellikleri, elastik parametreleri ve jeolojik yapısıyla ilgili iki adet Sismik Refraksiyon (Kırılma) ve MASW (Çok Kanallı Yüzey dalgası) etüdü yapılmıştır (Şekil 3.2). Zeminin yeraltı mekanik, litolojik ve yapısal özelliklerinin tespiti için boyuna ve enine sismik hız kayıtları olmak üzere 2 adet sismik yüzey dalgası ölçümü alınmıştır. Profil uzunlukları zeminin yaklaşık 30.0 m derinliklerine kadar tanıyacak şekilde seçilmiştir. Alınan

ölçümlerdeki sismik sinyal geliş zaman uzaklık grafikleri ek olarak verilmiştir. Sismik enerji kaynağı olarak 6 kg ağırlığında balyoz kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Arazinin iki dik doğrultusunda sismik (MASW) testlerin uygulanması.

Ölçümler sonucunda üstte bulunan bitkisel toprak kalınlığı ve altındaki zemin ortamının hızları ve derinlikleri tespit edilmiştir. Alınan MASW kayıtlarında profil uzunluğu 60 m, sismometre (jeofon) aralıkları 5 m uygulanmıştır. Boyuna (V_p) sismik dalga hızı yer altı yapısal konumları daha derinlerden tespit etmek için enine (V_s) sismik dalga hızı ise yanal süreksizlikler ile mekanik özellikleri daha iyi tanımak amacıyla ölçülmüştür. Jeofizik deneylerin yapıldığı sahaya ait fotoğraflar Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Şekil 3.3’te test sahasının zeminine ait kayma dalgası yayılma hızının derinliğe bağlı değişimi demiryolu hattına paralel ve dik doğrultularda sırasıyla iki serim için verilmiştir.



Şekil 3.3. Demiryolu hattına dik ve paralel doğrultuları için elde edilmiş S dalgası hız kesiti.

İnceleme alanında yapılan bir adet sismik ölçümden elde edilen P dalga hızları (V_p) ve S dalga hızlarına (V_s) bağlı olarak; yoğunluk, elastisite modülü, kayma ve Bulk modülleri, Poisson oranı, zemin taşıma gücü ve zemin emniyet gerilmesi değerleri hesaplanmıştır. Ölçüm ya da hesaplamalarla elde edilen bu dinamik ve elastik parametreler kendi sınıflamalarına göre değerlendirilerek her bir parametreye göre sahanın zemin sınıfları tespit edilmiştir. Sismik yöntem ile zemin tabakaları için elde

edilen dinamik ve elastik parametrelerin ortalama değerleri ve sınıfları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Zemin tabakalarının dinamik ve elastik parametreleri.

Makina Tipi-Saradorem/12 Kanallı			1.Serim		2.Serim	
Zemin Dinamik Elastik Parametreleri	Sembol	Birimi	I. Tabaka	II. Tabaka	I. Tabaka	II. Tabaka
Sıkışma Dalgası Hızı	V_p	m/s	331	1918	489	1693
Kayma Dalga Hızı	V_s	m/s	128	239	122	226
30 Metre Derinlikte Ort. Kayma Dalgası Hızı	$(V_s)_{30}$	m/s	189.1		179.8	
Ort. Tabaka Kalınlığı	h	m/s	7.39	-	7.28	-
Yoğunluk	d	kg/m ³	2000	2050	1460	1990
Kayma Modülü	G	kg/m ²	3280000	11720000	2170000	10160000
Elastisite Modülü	E	kg/m ²	9250000	34970000	6370000	30290000
Poisson Oranı	μ	birimsiz	0.412	0.492	0.467	0.491
Bulk Modülü	K	kg/m ²	17540000	739070000	31970000	556410000
Zemin Taşıma Gücü	q_u	kg/m ²	25600	49000	17800	44900
Emniyetli Taşıma Gücü	q_a	kg/m ²	8500	16300	5900	15000
Zemin Emniyet Gerilmesi	q_s	kg/m ²	9900	6100	4400	6000

Gerçekleştirilen sismik testlerin yanı sıra zemin profilinin jeolojik yapısının deneysel olarak belirlenebilmesi amacıyla zemin etüdü de yaptırılmıştır. Açılan sondaj kuyusu aracılığıyla her 1.5 m derinlikte standart penetrasyon deneyleri (SPT) ile örselenmiş örnekler ve farklı derinliklerden olmak üzere shelby tüpü vasıtasıyla 6 adet örselenmemiş numune alınmıştır (şekil 3.4).



Şekil 3.4. Test sahasında yapılan sondaj çalışması ve araziden alınan UD örnekleri.

Alınan numuneler üzerinde laboratuvar ortamında yapılan ilgili deney sonuçlarına bağlı hesaplanan mekanik zemin parametreleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Tablo 3.3’de hesaplanan parametrelerden çalışma sahası olan Pamukova/Yenice mevkiindeki tren hattının yakın çevresinin zemin yapısının gevşek kıvamlı siltli kumlu killerden oluştuğu anlaşılmıştır. Yapılan jeofizik çalışma sonuçlarının; zemin sondajı ile elde edilen laboratuvar sonuçlarıyla örtüştüğü açık olarak görülmektedir. Tablo 3.3’de gösterilen SPT değerleri incelendiğinde; Pamukova/Yenice’deki deney arazisinin oldukça zayıf zemin koşullarına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. İnceleme alanında alınan iki profil sismik ölçüm (sismik kırılma+ MASW) neticesinde yüzeyden itibaren -30 m derinlik için iki tabakalı sismik yapı tespit edilmiş ve ortalama birinci tabaka kalınlığı $h_{1ort}=7.34$ m olarak bulunmuştur.

Tablo 3.3. Zemin tabakalarının SPT değerleri.

Rapor no.: 06/0327		Elek Analizi			Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı TS-EN-ISO-14688-1 TS-EN-ISO-14688-2	Su Oranı (%)	Birim Hacim Ağırlık (BHA) TS-EN-17892-2		Üç Eksenli TS-EN-ISO-17892-8 TS-EN-ISO-17892-9		
			12			12								
Proje Adı			Çakıl	Kum	Silt/Kil	LL	PL			PI				
TUBITAK 217M427														
Örnek No.	Derinlik (m)	%	%	%	%	%	%			Doğal BHA	Kuru BHA	c (kPa)	φ (derece)	
UD1	1.00-1.50	0.0	0.5	99.5	53.9	21.3	32.6	CIH	31.9	18.98	14.40	94.30	0.00	
SPT 1	1.50-1.95	0.0	0.6	99.4	46.1	19.9	26.3	CIM	32.7	-	-	-	-	
UD2	2.50-3.00	0.0	0.5	99.5	55.8	19.3	36.5	CIH	33.0	19.06	14.32	82.30	0.00	
SPT 2	3.00-3.45	0.0	0.5	99.5	55.4	20.0	35.4	CIH	32.0	-	-	-	-	
UD3	4.00-4.50	0.0	0.9	99.1	57.6	20.5	37.0	CIH	33.6	18.95	14.19	77.20	0.00	
SPT 3	4.50-4.95	0.0	0.5	99.5	54.7	21.1	33.6	CIH	34.9	-	-	-	-	
CRT1	5.00-5.50	0.0	0.6	99.4	53.0	20.6	32.3	CIH	34.3	18.90	14.14	60.03	0.00	
UD4	5.50-6.00	9.2	87.2	3.6	NP	NP	NP	SaW	21.2	-	-	-	-	
SPT 4	6.00-6.45	0.0	21.8	78.2	44.0	19.4	24.6	CIM	34.9	-	-	-	-	
SPT 5	7.50-7.95	0.0	2.9	77.1	51.3	20.5	30.8	CIH	33.4	-	-	-	-	
UD5	8.50-9.00	0.0	0.6	99.4	43.7	19.7	24.0	CIH	31.0	19.10	14.55	61.25	0.00	
SPT 6	9.00-9.45	0.0	18.9	81.1	54.2	20.3	33.9	CIM	30.6	-	-	-	-	
SPT 7	10.50-10.95	0.0	13.5	86.5	45.9	19.2	26.8	CIH	33.9	-	-	-	-	
SPT 8	12.00-12.45	15.1	74.1	10.9	NP	NP	NP	CIM	15.0	-	-	-	-	
SPT 9	13.50-13.95	17.9	72.2	9.9	NP	NP	NP	SaP-SaSi	15.0	-	-	-	-	
UD6	14.50-15.00	0.0	0.6	99.4	54.5	20.4	34.1	CIH	34.6	19.09	14.18	54.06	0.00	
SPT 10	15.00-15.45	0.0	28.6	71.4	NP	NP	NP	Si	22.5	-	-	-	-	

Hesaplanan tabakaların ortalama sismik hızları sırasıyla birinci tabaka için; $V_{p1ort}=410$ m/s ve $V_{s1ort}=125$ m/s, ikinci tabaka için; $V_{p2ort}=1806$ m/s ve $V_{s2ort}=233$ m/s olarak bulunmuştur.

- Sismik yöntem ile elde edilen araştırma alanına ait sismik S dalgası hızlarına göre birinci tabakanın ZE zemin grubunda (Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları) ve ikinci tabakanın ZD zemin grubunda (Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları) yer aldığı belirlenmiştir. İnceleme alanından elde edilen $V_{s30}=184.5$ m/s hızı için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği sınıflamasına göre zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir. Ancak yönetmelikte belirtilen $V_{s30}<180$ m/s sınır

durumu göz önünde bulundurulduğunda ZE yerel zemin sınıfı kapsamında bile değerlendirilebilir.

- Birinci tabakanın kayma modülü $G_{1ort}=272 \text{ kg/cm}^2$, ikinci tabakanın kayma modülü $G_{2ort}=1094 \text{ kg/cm}^2$, zeminin yatay kuvvetlere karşı direncinin birinci tabakada çok zayıf ve ikinci tabakada zayıf dayanımlı olduğu belirlenmiştir. Birinci tabakanın elastisite modülü $E_{1ort}=781 \text{ kg/cm}^2$ ve ikinci tabakanın elastisite modülü $E_{2ort}=3263 \text{ kg/cm}^2$ aralıklarında olup, tabakaların bir doğrultudaki streslerinin deformasyona oranının birinci tabakada çok zayıf ve ikinci tabakada zayıf özellikte olduğu belirlenmiştir.
- Hesaplanan elastisite modülü ortalama değerlerine göre zemin dayanımları; birinci tabakanın çok zayıf ve ikinci tabakanın zayıf dayanımlı olduğu belirlenmiştir.
- Sismik yöntem ile elde edilen kayma modülü ortalama değerlerine göre zeminlerin dayanımları; birinci tabakanın çok zayıf ve ikinci tabakanın zayıf dayanımlı olduğu belirlenmiştir.
- Arazide elde edilen Bulk modülü ortalama değerlerine göre birinci tabakada az ve ikinci tabakada yüksek derecede sıkışmanın bulunduğu belirlenmiştir. Sıkışmanın az olması inşaat işlerinde kolaylık sağlayacak ve çevresel zarar az olacaktır.
- Sismik yöntem ile belirlenen ortalama Poisson oranı ortalama değerleri gözeneklilik sınıflamasına göre değerlendirildiğinde; birinci tabakanın gözenekli ve ikinci tabakanın gözenekli bir yapıda olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bölgede yapılan geoteknik ve jeofizik rapor sonuçlarına göre tren hattının yakın çevresinin zemin cinsi ağırlıklı olarak zayıf dayanımlı siltli kumlu kil olarak belirlenmiş, zemin sınıfı ise NEHRP'ye göre D grubu ve TBDY 2018'e göre ZD yani oldukça olumsuz özelliklere sahip zemine karşı gelmektedir. Bu test sahasının zemin formasyonu alüvyondur. Arazide beş profil sismik kırılma+MASW ölçümleri yapılarak, demiryolu hattına en yakın noktadaki zemin profilinin 7.95 m derinliğindeki üst tabakasının ortalama kayma dalgası yayılım hızı $V_s=171 \text{ m/s}$ ve elastisite modülü $E=1234 \text{ kg/cm}^2$ olarak tespit edilmiştir.

3.3. Titreşim Ölçüm Setinin Karakteristikleri ve Veri Alım Süreci

Saha çalışmalarında deneysel ölçümler için kullanılan ivmeölçerler, 32 bit yüksek çözünürlük ve çok düşük gürültü seviyelerine sahip AREL marka DAC-3HDG tipidir.

Bu ivmeölçerler üç eksenli kapasitif kuvvet mikro işlenmiş sensörlerle donatılmış olup düşük seviyede titreşim hareketlerinin algılanmasını sağlar (Şekil 3.5). Ölçümler için kullanılan ekipman üç ana bileşenden oluşmaktadır: ivmeölçer ana kutusu, enerji kaynağı ve GPS anteni. Enerji kaynağı hem ivmeölçer ana kutusuna hem de GPS antenine güç sağlar. Sonuç olarak, ivme verileri ivmeölçer ana kutusunda sayısallaştırılır. GPS antenine enerji verilmesi uydu bağlantısı kurarak zaman ve konum verilerinin kaydedilmesine olanak tanır. Ayrıca, enerji kaynağına entegre edilen wifi ünitesi ivmeölçer ile bilgisayar arasındaki bağlantıyı kolaylaştırarak gerekli ayarlamaların yapılmasını ve veri aktarımını mümkün kılar. Deney setinin üç ana bileşeni kablolar aracılığıyla birbirine bağlanır. İvmeölçer ekranı, deney düzeneğinin çalışma durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Saha ölçümlerinde kullanılan deney seti.

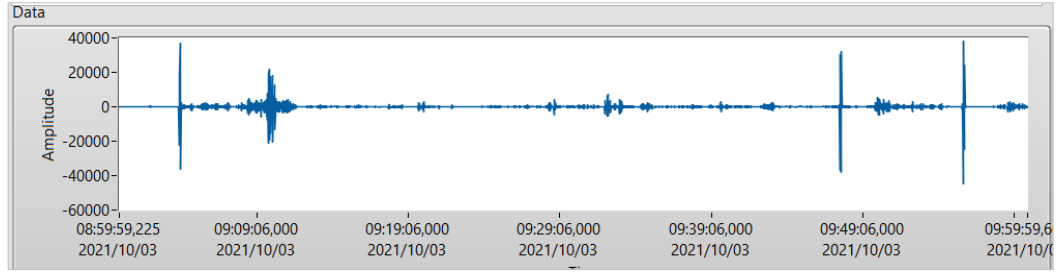
Deney setine ait teknik özellikler Tablo 3.4’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Tüm titreşim ölçümlerinde ivmeölçerler, yerleştirildikten sonra hızlı tren geçişleri öncesinde güç verilerek açılmış, o günkü çalışma tamamıyla bittikten ve veri kayıtları tamamlandıktan sonra kapatılmışlardır. İvmeölçerler ilk çalıştırıldıklarında veri kaydı yapıp yapmadığını kontrol etmek için sahada bilgisayar ile cihazlara bağlanılarak canlı veri takibi de yapılmıştır. Hızlı tren geçişi esnasında meydana gelen çevresel

titreşimler için kullanılan ivmeölçerler saniyede 200 ($\Delta t=1/200=0.005$ s) veri kaydedilebilecek şekilde ayarlanmıştır. GPS anteni ile kurulan uydu bağlantısı sayesinde titreşimin zaman bilgisi deney setine kaydedilmiştir. Ekipman bir yılı 365 güne bölerek çalışmanın yapıldığı gün ve saat bilgisine göre dosyaları isimlendirmektedir. Cihaz ile alınan her ivme verisinin saniyenin 1/200'ünde kaydedildiğini bilmek, ivme verisinin açılacağı bilgisayar programının ivme verisini zaman verisiyle eşleyebilmesi açısından önemlidir.

Tablo 3.4. Deney setine ait teknik özellikler.

Donanım	Özellikleri
	3 Eksen
İvmeölçer	a) Capacitive Force Micromachined Sensor b) $300/\sqrt{\text{Hz}}$ noise c) $\pm 2\text{g}$ Full calibration d) ± 5 V Differential output e) Resolution over 200 Hz. Bandwidth f) Self test input (Kendi kendini test edebilme girişi)
Güç Kaynağı	12 VDC
Çalışma Sıcaklığı	-20 +80
Haberleşme Portu	1 Ethernet / TCP-IP
GPS Çalışma Frekansı	50 Kanal Super Sense Dahili 50/100/200 Hz. (5 mS)
Hafıza Kartı	2 Gb Dahili (140 saat kayıt alabilme yeteneği) Kutu
ADC	32 Bit yüksek çözünürlük
Filtre	2 Kanal FIR/Antialiasing

İvmeölçerler vasıtası ile ölçülen titreşim kayıtları, sensörlerin tüm gün boyunca açık olmasından dolayı çok uzun süreli verileri içermektedir. Her bir tren geçişine ait titreşim verilerine ulaşmak için öncelikle tren geçişine ait zaman bilgisi kullanılarak ayırıklaştırma işlemi yapılmıştır. Bu ayırıklaştırma işleminde tren geçişini de içerecek şekilde ilgili titreşim verileri, geçiş öncesi ve sonrasındaki sükunetteki zaman dilimlerini kapsayan 15 s'lik kayıt dilimlerinden oluşmaktadır. Kesilen ivme verisinin bir sütununda 15 s'lik süre için 3000 sayısal ivme verisi bulunmakta ve her bir sütun farklı yayılım doğrultusundaki ivme kaydını temsil etmektedir. Şekil 3.6'da örnek bir ivme kaydı gösterilmiştir.

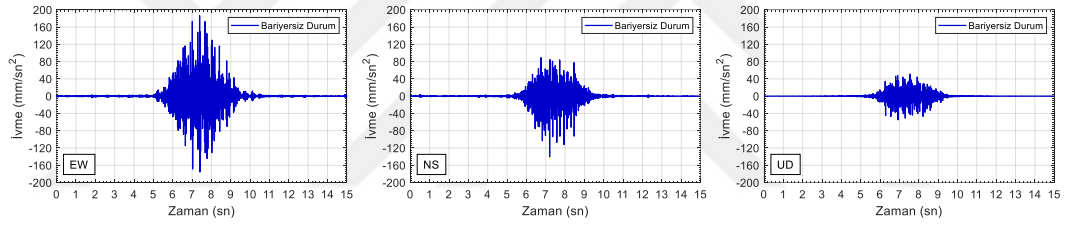


*M150_13.30 - Not Defteri

Dosya	Düzen	Biçim	Görünüm	Yardım
0.000018			0.000008	
0.000029			-0.000002	
0.000000			-0.000011	
-0.000019			-0.000018	
0.000004			-0.000017	
0.000026			-0.000002	
0.000010			0.000016	
-0.000015			0.000013	
-0.000006			-0.000008	
0.000010			-0.000020	
0.000002			-0.000002	
-0.000007			0.000021	
0.000012			0.000027	
0.000023			0.000007	

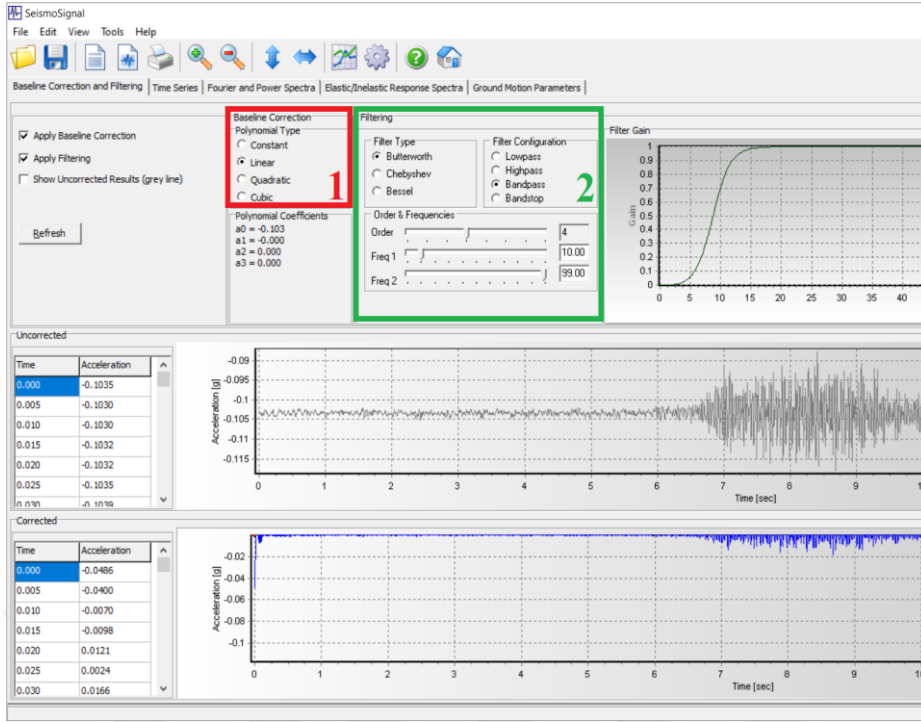
St 14, Stn 18 100% Windows (CRLF) UTF-8

Veri setinin üç farklı bileşeni için ivme-zaman ilişkileri



Şekil 3.6. Veri ayrıklaştırılması ve örnek ivme kaydı.

Ayrıklaştırılan ham ivme verilerindeki eksen kaymalarının düzeltilmesi ve gürültü vb. istenmeyen titreşim etkilerinin ortadan kaldırılması için bir dizi sinyal işleme prosedürü uygulanmıştır. Bu işlemler SeismoSignal yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Veri analizleri zaman ve frekans ortamında gerçekleştirilmiştir. İvme verisi ilk olarak sıfır çizgisine (Baseline Correction) hizalanmıştır. Sıfır çizgisine getirilen titreşim kayıtlarının Fourier genlik spektrumları incelendiğinde, dinamik yükün baskın frekans aralığı 10 ile 100 Hz aralığında olduğu saptanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda kayıtlarda olabilecek düşük frekanslı titreşim etkileri ve darbe vb. yüksek frekanslı titreşim etkilerini ayıklemek için filtreleme işlemi uygulanmıştır.



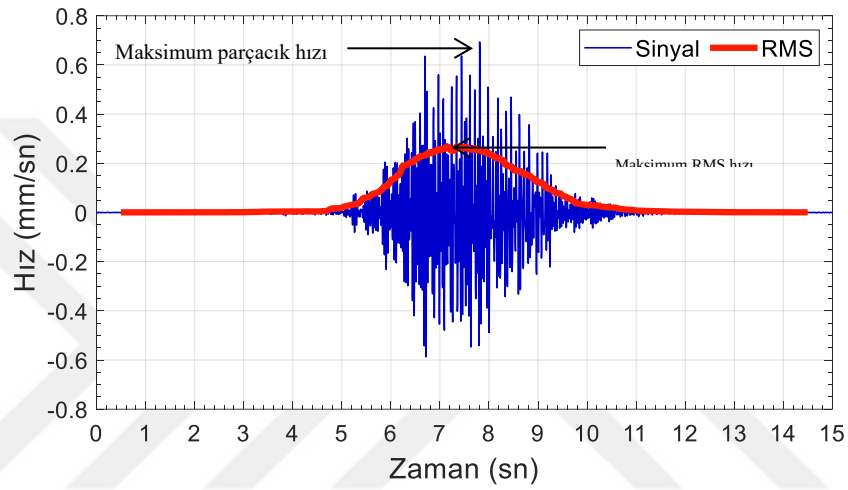
Şekil 3.7. Titreşim kayıtlarının işlenmesi ve ivme verilerinin filtrelenmesi.

Filtreleme işleminde 4. dereceden Butterworth Band geçişli filtreleme fonksiyonu kullanılmış olup 10-100 Hz aralığında Bandpass filtreme seçilmiştir. Söz konusu işlemler tüm titreşim kayıtları için ayrı ayrı uygulanmıştır. İvme-zaman kayıtlarına integrasyon işlemi uygulanarak hız-zaman ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri de hesaplanmıştır. Filtrelenmiş titreşim kayıtları için tepki spektrumları %5 sönüm oranı için çizdirilmiştir. Hızlı tren geçişleri esnasında ölçülen titreşim verilerini “İnsan Sağlığı ve Konforu” ve “Yapısal Hasar” açısından değerlendirmek için maksimum parçacık hızı (PPV-mm/s), V_{RMS} (Root Mean Square-mm/s) ve L_v (Hız seviyesi-dB) değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kozmetik çatlama potansiyeli olabilecek düşük seviyeli yer hareketlerini tanımlamak için yerdeğiştirme ve ivme verileri yerine parçacık hızı daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Hız-zaman değişim eğrisinde maksimum genlikler parçacık hızının sıfırdan tepe değerlerine kadar ölçülen miktarıyla ifade edilir. Titreşim genliğinin miktarını tam olarak niteleyebilmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hız zaman geçmişinin veri içeriği incelendiğinde, anlık titreşim hızı sınır çizgisinin etrafında artı ve eksi yönde dalgalanmaktadır. Maksimum parçacık hızı (PPV) ise ölçüm süresince kaydedilen titreşim sinyallerinin en büyük anlık pozitif veya negatif tepe noktası olarak tanımlanmaktadır ve konuyla ilgili yönetmeliklerde düşük seviyeli yer hareketlerinde insan tepkisini ölçmekten ziyade yapısal hasar potansiyelini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Denklemler

3.1). İnsan vücudu titreşim sinyaline anlık tepki göstermemekte, reaksiyon süresi söz konusu olmaktadır.

$$PPV = \max|V(t)| \quad (3.1)$$

Titreşim sinyalinin net ortalaması sıfır olduğundan kuadratik ortalama yani ortalama karekök (RMS) yumuşatılmış titreşim genliğini tanımlamak için kullanılır. Bir sinyalin RMS'si, genliğinin karesinin ortalamasıdır ve tipik olarak 1 s'lık bir aralık üzerinden hesaplanmaktadır (Şekil 3.8). Desibel cinsinden hız seviyesi ile (L_v) V_{RMS} değerine bağlı olarak aşağıdaki bağıntı kullanılarak elde edilmektedir.



Şekil 3.8. Maksimum parçacık hız ve örnek VRMS karşılığı.

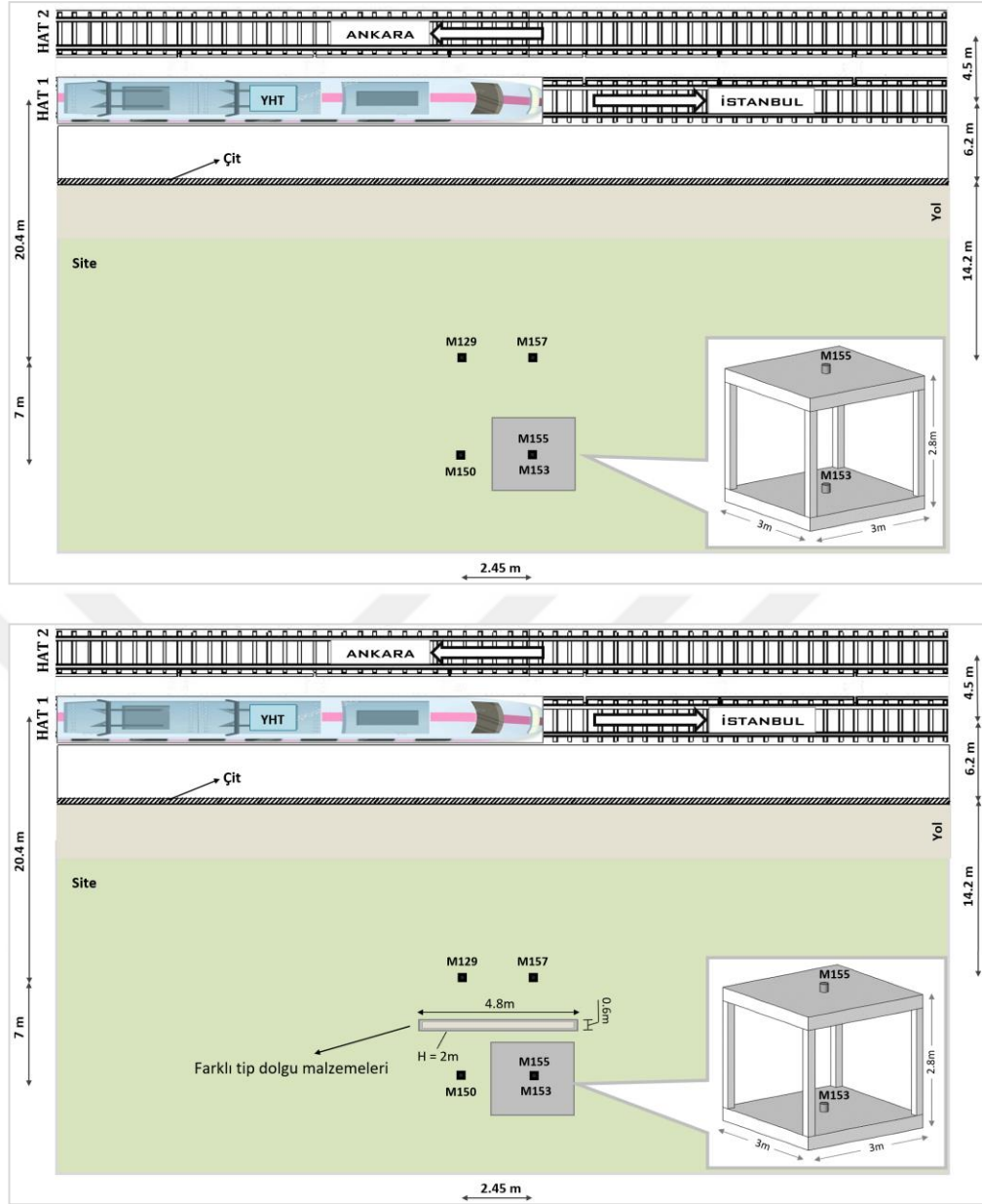
$$L_v = 20 \times \log \left(\frac{V_{RMS}}{V_{ref}} \right) \quad (3.2)$$

Burada VRMS maksimum RMS genliğini ve V_{ref} ise referans hız değerini ifade etmekte olup 1×10^{-8} m/s olarak alınmaktadır.

3.4. Ölçüm Cihazlarının Yerleşim Düzeni

Hızlı tren trafiğinin güzergâh çevresindeki yakın alanlarda ürettiği yüksek genlikli zemin titreşimlerinin etkilerini azaltmak için geliştirilen pasif yalıtım modelini belirlemek üzere bir dizi pilot deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar tezin kapsamına dâhil edilmemekle birlikte bariyer geometrisinin belirlenmesinde rol oynamıştır. Pasif yalıtım yönteminin teorik olarak test sahasında geçerliliğini sağlayabilmek için titreşim kaynağı ile korunacak yapı arasına yerleştirilecek dalga bariyerinin demiryolu hattından uzaklığının doğru belirlenmesi gerekmektedir.

Dinamik yük kaynağının yakın çevresinde konumlandırılacak dalga bariyerleri (en fazla Rayleigh dalga boyunun (λ) 1.5 ile 2 katı kadar uzaklıkta) aktif yalıtım modeli olarak tanımlanır ve dalga yayılma mekanizmasına bağlı olarak titreşim enerjisini yutma kapasiteleri pasif yalıtım durumuna göre farklıdır. Dalga kaynağına yakın alanda cisim dalgaları baskın karakterde yayılmaktadır ve özellikle basınç dalgalarının sönümlenmesinde aktif bariyer modelleri etkili rol oynamaktadır. Korunacak yapının önüne inşa edilecek bariyerin en az Rayleigh dalga boyu modeli olarak etkili olması için hızlı tren geçişlerinin ürettiği Rayleigh yüzey dalgalarının yeterli yayılma yoluna sahip olmalıdır. Literatürdeki konuyla ilgili çalışmalar dalga bariyerinin pasif yalıtım olarak tanımlanabilmesi için özellikle küçük titreşim kaynakları için uzaklığının en az Rayleigh dalga boyu (λ) kadar olması gerektiğini göstermektedir. Bunun için test sahasında açık hendek tipi titreşim yalıtım bariyerinin yerini belirlerken titreşim kaynağının baskın frekans içeriğine (20-50 Hz) ve zemin tabakasının dinamik parametrelerine bağlı yaklaşık ön hesaplar yapılarak yüzey dalga boyunun $\lambda=4-6$ m aralığında olduğu tahmin edilmektedir. Hendeğin lokasyonu demiryolu hattından en az 3λ uzağında olacak şekilde planlanmıştır. İlk olarak zeminde herhangi bir hendek açılmadan doğal saha koşullarında yapılan serbest zemin ölçümleri ve yapı üzerindeki ölçümler değerlendirilmiş ve bu değerlendirmeler bariyersiz duruma karşılık gelen “Yalıtım bariyersiz test sahasında serbest zemin yüzey titreşimlerinin ve bina titreşimlerinin seçilmiş referans noktalarında ölçülmesi ve veri analizi” olarak Bölüm 3.5.1.1’de sunulmuştur. Şekil 3.9’dan görülebileceği üzere test sahasında serbest zemin noktalarını işaret eden ivmeölçerler M129, M150 ve M157 kodlu cihazlar iken, binaya ait ivmeölçerler zemin katta M153; üst katta ise M155’ tir.



Şekil 3.9. Bariyersiz ve bariyerli durumda test sahasının görünümü ve ivmeölçer yerleşimi.

Optimum dalga bariyeri ölçülerine göre inşa edilen pasif yalıtım modelinin performansını farklı bariyer dolgu malzemeleri için test etmek amacıyla serbest zemin ölçümleri ve yapı üzerindeki ölçümler değerlendirilmiş ve bu değerlendirmeler bariyerli duruma karşılık gelen “Yalıtım bariyerli test sahasında farklı iç dolgu malzemesine göre serbest zemin yüzey titreşimlerinin ve bina titreşimlerinin seçilmiş referans noktalarında ölçülmesi ve veri analizi” olarak Bölüm 3.5.1.2’de sunulmuştur. Bu test ölçümleri sonucunda gaz beton cidarlı inşa edilen bariyerin içinin boş olması, strafor köpüklü olması, su dolu olması, odun talaşlı olması ve son olarak da cam

kürecik dolgulu olması durumlarına ait yalıtım performansları karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.



(a) Düşey dalga bariyerinin kazılması

(b) Bariyer cidarının inşası



(c) Gaz beton cidarlı içi boş bariyer



(d) Strafor köpüklü bariyer



(e) Su dolu bariyer



(f) Odun talaşlı bariyer



(g) Cam kürecikli bariyer

Şekil 3.10. Bariyerli durumda test sahasının görünümü.

3.5. Deney Sahasında Gerçekleştirilen Ölçümler

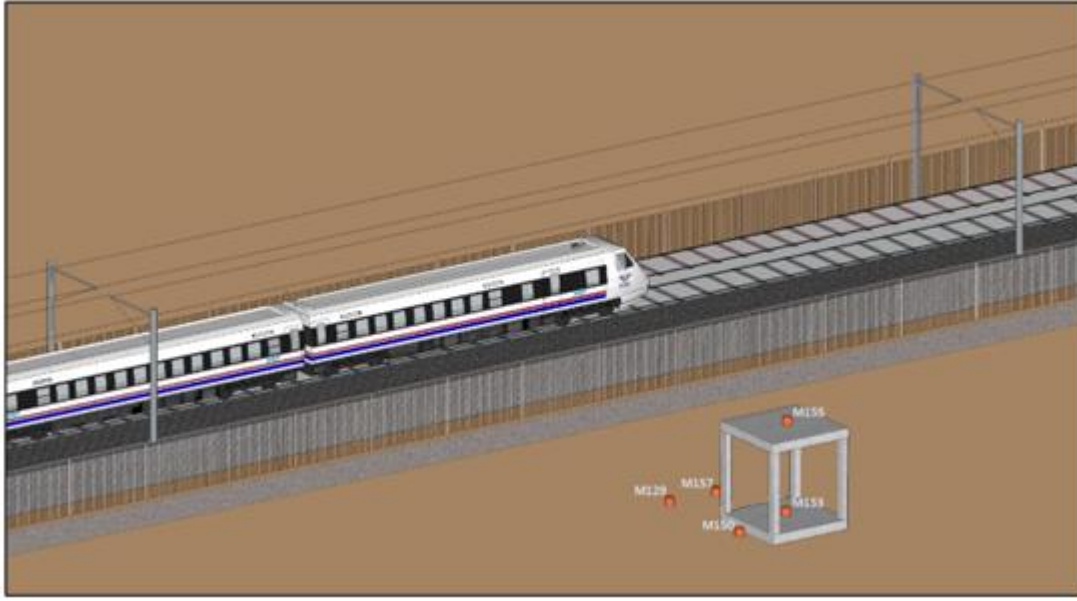
3.5.1. Serbest zemin yüzey titreşimlerinin ölçülmesi

Bu bölümde ilk olarak zeminde herhangi bir hendek açılmadan doğal saha koşullarında yapılan serbest zemin ölçümleri değerlendirilecek ve bu değerlendirmeler bariyersiz

duruma karşılık gelen “Yalıtım bariyersiz test sahasında serbest zemin yüzey titreşimlerinin seçilmiş referans noktalarında ölçülmesi ve veri analizi” başlığı altında sunulacaktır. Daha sonra ise aynı referans noktalarından yalıtım bariyerli durumda alınan ölçümlerin değerlendirildiği “Yalıtım bariyerli test sahasında farklı iç dolgu malzemesine göre serbest zemin yüzey titreşimlerinin seçilmiş referans noktalarında ölçülmesi ve veri analizi” başlıklı bölüm sunulacaktır. İlgili başlıklardan anlaşılacağı üzere Bölüm 3.5.1’de bina üzerine yerleştirilen M153 ve M155 ivmeölçerleri değerlendirilmeyecek olup sadece serbest zemin üzerindeki M129, M150 ve M157 kodlu ivmeölçerler dikkate alınacaktır.

3.5.1.1. Yalıtım bariyersiz test sahasında serbest zemin yüzey titreşimlerinin analizi

Çalışmanın ilk aşamasında doğal saha koşullarında 3 adet ivmeölçer kullanılarak ölçülen serbest zemin titreşimleri analiz edilmiştir. Bu ivmeölçerlerden M129 ve M150 ivmeölçerleri serbest zemin üzerinde; daha sonra yapılacak olan dalga bariyeri için belirlenen alanın önüne ve arkasına konumlandırılmışlardır (Şekil 3.11). Böylece bariyerli ve bariyersiz durumlardaki titreşim genliklerinin doğrudan karşılaştırılabilmesi amaçlanmıştır. M157 numaralı ivmeölçerin bina önüne yerleştirilmesinin nedeni ise bariyerin varlığından kaynaklanan titreşim genliklerindeki farklılıkları daha sonra bina zeminine yerleştirilecek olan M153 ivmeölçerinden alınan verilerle kıyaslayarak gözlemlemektir. Bu bölümde M153 ve M155 numaralı ivmeölçerlere dair bir değerlendirme yapılmayacak olup ilgili sonuçlar Bölüm 3.5.2’de sunulacaktır. Serbest zemin titreşimlerini bariyersiz doğal saha koşullarında değerlendirebilmek amacıyla iki farklı tarihte deneyler yapılmıştır. İlk olarak 26 Eylül 2021 tarihinde gerçekleştirilen deneylerde test sahasının suya doymun olduğu gözlenmiş bu sebeple ikinci bir deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur. 3 Ekim 2021 tarihli ikinci saha çalışmasında ise kuru zemin koşullarında ölçümler yapılmıştır (Tablo 3.5).



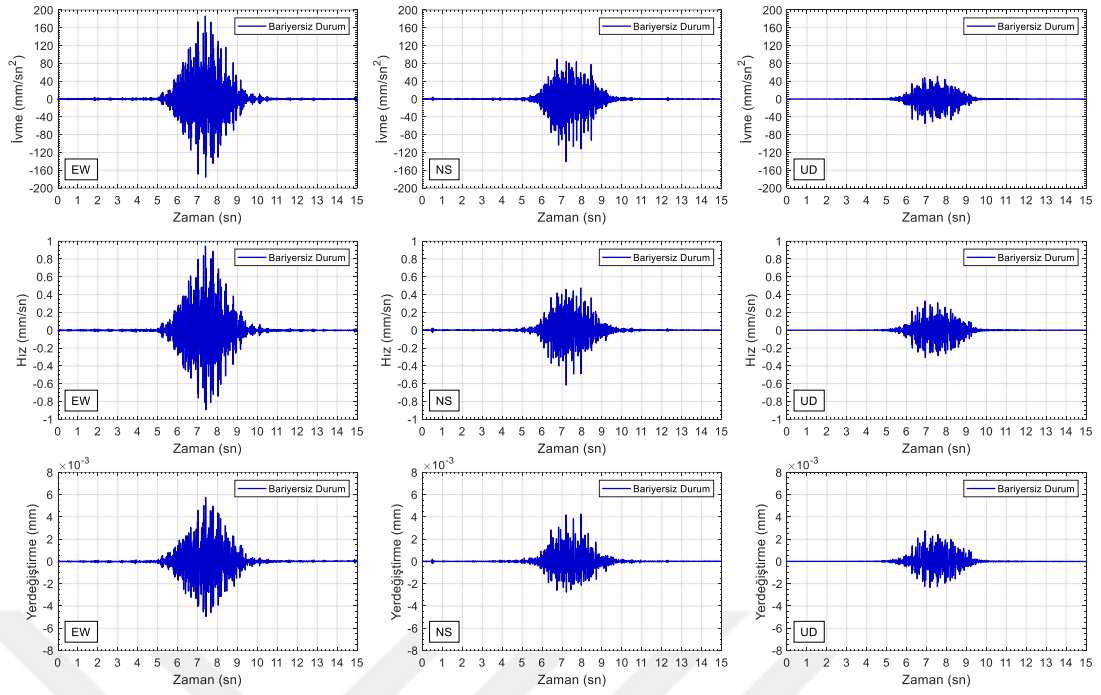
Şekil 3.11. Bariyersiz durumda ivmeölçerlerin arazideki konumu.

Aşağıda verilen tablodan görülebileceği üzere her bir deney türü için üç farklı tren geçişi kaydı alınmıştır. Bir deney setinde titreşim kaydı yapan toplamda 5 adet ivmeölçer olduğu ve her bir ivmeölçerin tren hattına paralel, tren hattına dik ve düşeyde olmak üzere üç farklı doğrultuda kayıt aldığı göz önünde bulundurulursa elde edilen veri hacminin büyüklüğü anlaşılabilecektir.

Tablo 3.5. Arazi çalışmalarında dikkate alınan tüm YHT seferlerinin tarih ve saatleri.

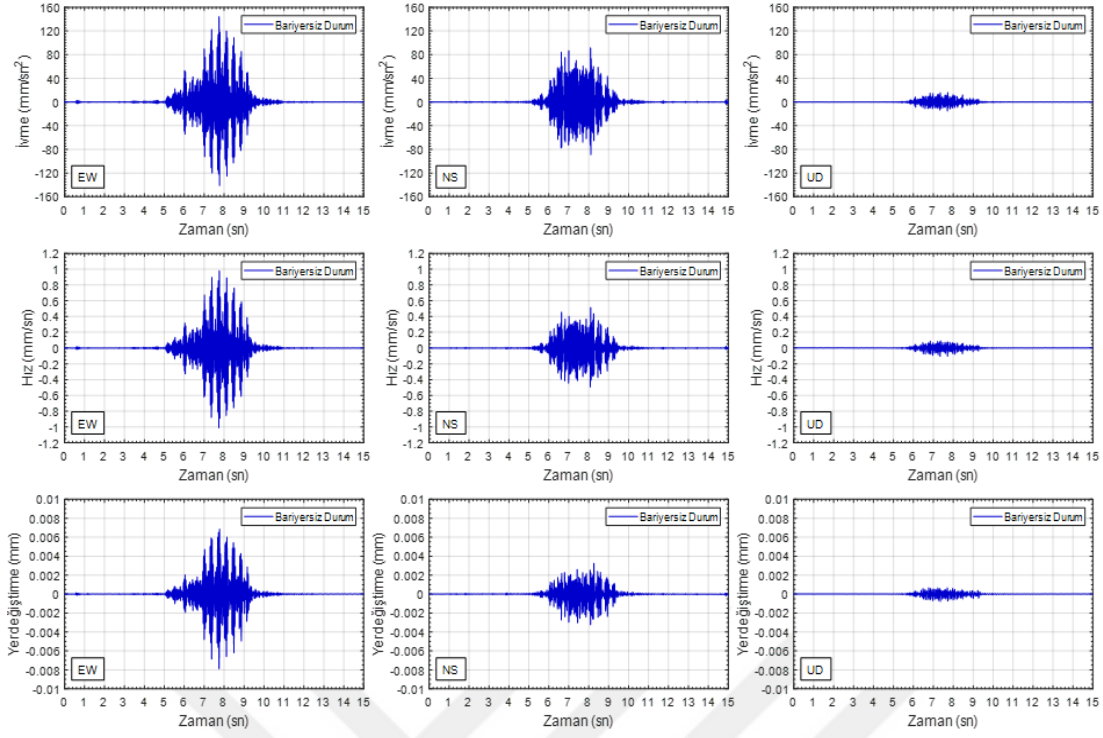
Ölçüm tarihi	Bariyer Tipi	YHT Sefer Saati
26.09.2021	Bariyersiz durum	11.51
		12.55
		13.45
		12.03
03.10.2021	Bariyersiz durum	12.55
		13.44

Bu sebeple yapılan ölçümler kendi içerisinde detaylı bir analize tabi tutulmuş ve söz konusu analiz çıktılarından en elverişsiz sonuçlar ayrıştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Üç eksenli ivmeölçerlerin kaydettiği ham veriler işlendikten sonra her bir kaydın her bir doğrultusu için ivme-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman ilişkileri çizdirilmiştir (Şekil 3.12).

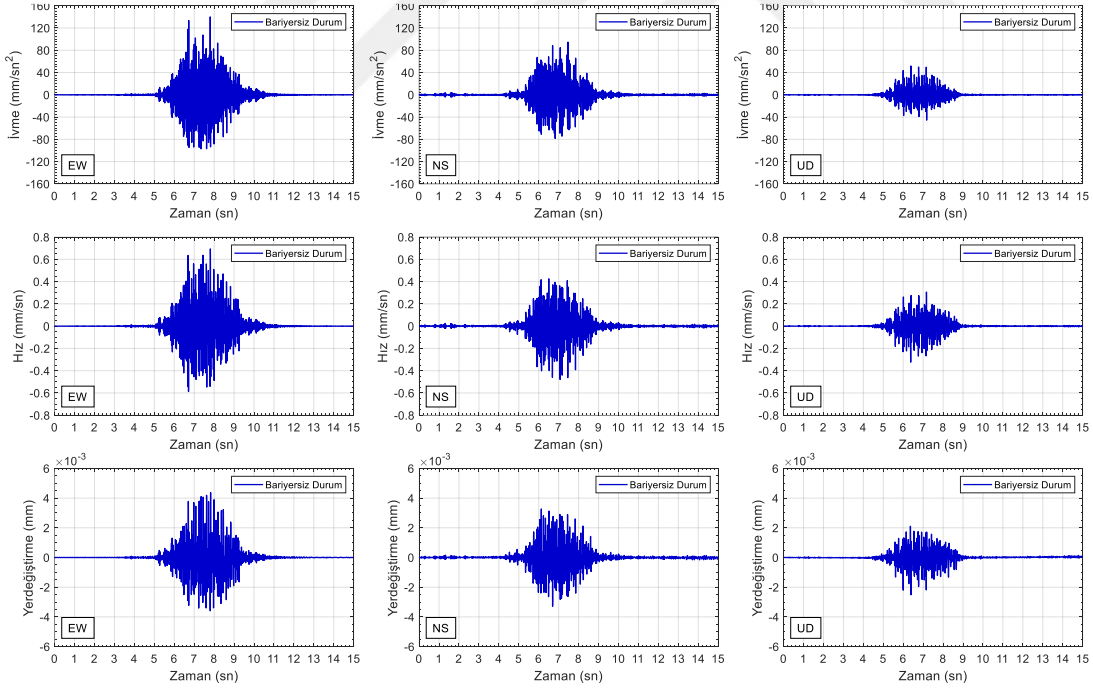


Şekil 3.12. Bariyersiz sahada M129 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.

Şekil 3.12-3.14'te verilen grafiklerin sol alt bölümüne yerleştirilen EW ibaresi tren hattına paralel doğrultuyu temsil eden Doğu-Batı bileşeninin kısaltması, NS ibaresi tren hattına dik doğrultuyu temsil eden Kuzey-Güney bileşeninin kısaltması, UD ibaresi ise düşey doğrultunun kısaltmasıdır. Çalışmanın tamamında benzer gösterimler kullanılmıştır. Ayrıca bu maksimum değerler ilgili grafiklerin devamında Tablo 3.6'da da sayısal olarak gösterilmiştir. M129 ve M150 kodlu ivmeölçerler dikkate alınarak Şekil 3.12-3.14 ve Tablo 3.6 incelendiğinde uzaklığa bağlı dalga genliğinin, enerjinin soğurulmasıyla azaldığı açıkça gözlenmiştir. Aralarında 7 m mesafe bulunacak şekilde yerleştirilen iki ivmeölçerden hatta daha uzak mesafede bulunan M150 ivmeölçerinde her üç doğrultuda da ivme, hız ve yer değiştirme büyüklüklerinde M129 numaralı ivmeölçere kıyasla azalmalar olmuştur. Tren hattına paralel EW doğrultusu dikkate alındığında ivme cinsinden bu azalma yaklaşık %25 seviyesindeyken, tren hattına dik NS doğrultusunda %20 ve düşey doğrultuda yaklaşık %70 mertebelerindedir.



Şekil 3.13. Bariyersiz sahada M150 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.



Şekil 3.14. Bariyersiz sahada M157 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.

Tablo 3.6. Bariyersiz durumda serbest zemindeki ivmeölçerlerden elde edilen ivme, hız, yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

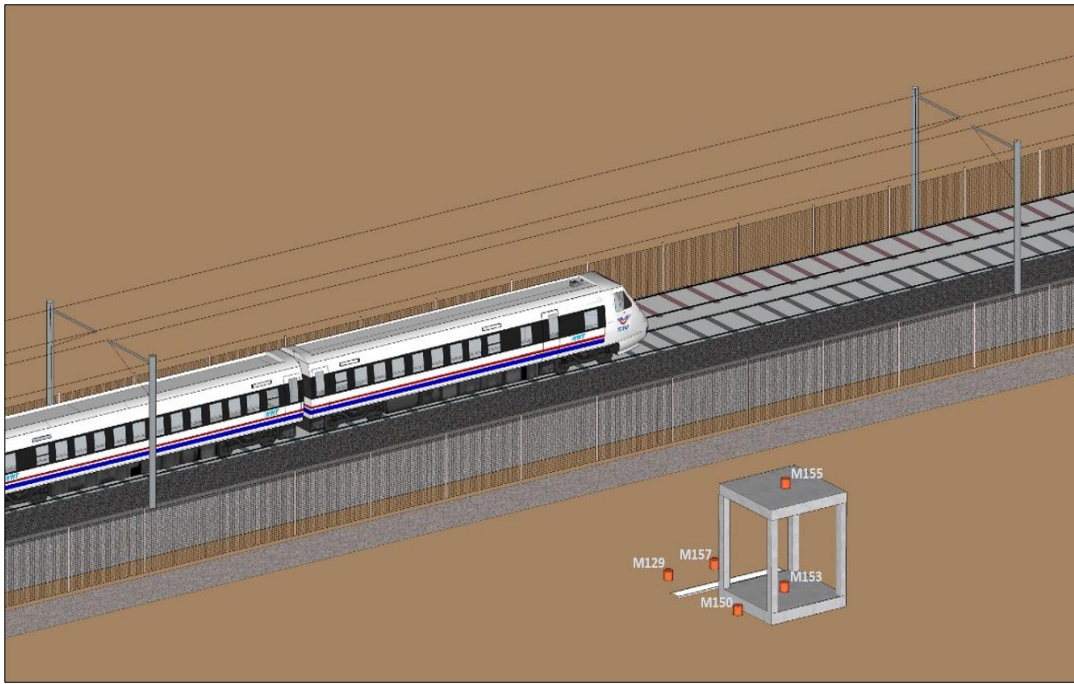
İvmeölçer	Bariyer Tipi	Doğrultu	İvme (mm/s ²)	Hız(mm/s)	Yerdeğiştirme (mm)
		EW	186.36	0.944	0.00574
M129	Bariyersiz Durum	NS	140.66	0.616	0.00425
		UD	54.79	0.329	0.00275
		EW	144.10	1.020	0.00826
M150	Bariyersiz Durum	NS	113.34	0.681	0.00413
		UD	16.28	0.107	0.00079
		EW	139.93	0.693	0.00437
M157	Bariyersiz Durum	NS	94.71	0.479	0.00328
		UD	51.80	0.323	0.00251

Tren hattına paralel olacak biçimde aynı yatay düzlemde konumlandırılan M129 ve M157 ivmeölçerlerinin kaydettiği titreşimler incelendiğinde ise özellikle EW ve NS doğrultuları için farklı büyüklükte kayıtlar elde edildiği görülecektir. Ancak ivmeölçerler demiryolu hattına her ne kadar eşit uzaklıkta yerleştirilmiş olsa da ivme değerlerinde bazı farklılıkların görülmesi hat boyunca ray pürüzlülüğünün rastgele doğası, balast alt yapısı rijitliğinin homojen olmaması, üst zemin tabakasının mekanik özelliklerinin bir noktadan diğer noktaya değişkenlik göstermesi sebebiyle olasıdır. Benzer koşullara sahip noktalarda kaydedilen titreşimler arasındaki fark, yüksek frekanslarda daha belirgin hale gelir. Bunun nedeni, yüksek frekanslarda dalga uzunluğunun, zemin özelliklerindeki yerel değişikliklerin dalga tarafından tanımlanacak kadar küçük olmasıdır. Bir kil tabakasındaki küçük bir kaya, küçük dalga uzunluğuna sahip dalga tarafından, kırılması veya yansmasıyla sonuçlanan yeni bir ortam olarak kabul edilir (Bahrekazemi, 2004).

3.5.1.2. Yalıtım bariyerli test sahasında serbest zemin yüzey titreşimlerinin analizi

Test sahasına açılan hendek tipi dalga bariyerinin serbest zemin titreşimlerine etkisini araştırmak amacıyla söz konusu hendek, farklı özellikte dolgu malzemeleri ile doldurularak çeşitli bariyer türleri için test edilmiştir. Bahsi geçen dolgu

malzemelerinin yerleştirilebilmesi için kazılan hendeğin uzunluğu 4.8 m, genişliği 0.60 m ve derinliği 2 m'dir. Serbest zemin titreşimlerini bariyerli saha koşullarında değerlendirebilmek amacıyla beş farklı deney yapılmıştır (Tablo 3.7). Farklı bariyer türlerinin test edildiği tüm deneylerde ivmeölçerlerin arazideki yerleşim planı değiştirilmemiştir (Şekil 3.15). Burada M157 kodlu ivmeölçerin konumu binaya ait ivmeölçer verileri ile doğrudan kıyaslanacak olması bakımından önemlidir. M157 numaralı ivmeölçerin bina önüne yerleştirilmesinin nedeni; bariyerin varlığından kaynaklanan titreşim genliklerindeki farklılıkları daha sonra bina zeminine yerleştirilecek olan ivmeölçerden alınan verilerle karşılaştırmaktır.



Şekil 3.15. Bariyerli durumda test sahasının görünümü.

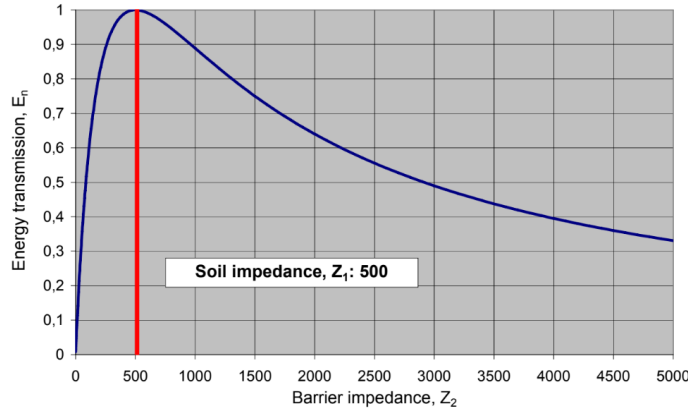
Deneylerin gerçekleştirildiği test sahasının alüvyon zemin koşulları göz önünde bulundurulduğunda 2 m derinliğinde kazılan zeminde yanal stabilite problemi ortaya çıkmakta ve bu problem hendek tipi dalga bariyerinin iç yüzeylerden desteklenmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak burada zemini bir istinat duvarı gibi destekleyecek malzemenin düşük empedanslı olması dalgaların iletim mekaniği açısından önemli bir konudur.

Tablo 3.7. Bariyerli durum için dikkate alınan YHT seferlerinin tarih ve saatleri.

Ölçüm Tarihi	Bariyer Tipi	YHT Sefer Saati
23.10.2021	İçi boş bariyer	11:38
		12:06
		12:51
		11:45
28.10.2021	Strafor köpüklü bariyer	12:02
		12:52
		11:42
29.10.2021	Odun talaşlı bariyer	12:04
		13:05
		11:48
30.10.2021	Su dolu bariyer	12:08
		12:52
		11:38
7.11.2021	Cam kürecikli bariyer	12:02
		12:50

Burada öncelikle empedans kavramını ifade etmekte fayda vardır. Bir malzemenin kayma dalgası yayılma hızı ve yoğunluğunun çarpımı ile elde edilen bu değer malzemenin bir yük altında bükülmeye veya deformasyona dayanmasına izin veren sertliği hakkında yorum yapmaya olanak tanır. Bilindiği üzere zeminin dinamik ve elastik parametrelerini belirlemek için saha deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde zeminin birinci katmanı için elde edilen kayma dalgası hızı değeri 125 m/s, ikinci katmanı için elde edilen değer ise 233 m/s'dir. Benzer şekilde, zemin katmanlarının yoğunluğu sırasıyla 1,73 t/m³ ve 2,02 t/m³ olarak belirlenmiştir. Buna göre, zemin empedansının alt ve üst sınırları 216 ve 433 t/ms² olarak hesaplanabilir. Dolayısıyla düşük yoğunluklu ve düşük empedanslı bir malzeme üretilmiş ve böylece zemin ile kullanılan gazbeton panellerin empedansları birbirine yakınlştırılmaya çalışılmıştır. Gazbeton paneller çok düşük yoğunluklu olduğu için malzeme empedansı da bu aralıktadır. Dinamik yük kaynağından bariyer duvarına yaklaşan yüzey titreşim dalgalarına içinden geçtiği ortam değişikliği hissettirilmeyecek şekilde hendek duvar malzemesi seçilmiştir. Şekil 3.16' dan görülebileceği üzere korunacak bölgeye iletilen titreşim enerjisi literatürde E_n ile ifade edilmiş olup bariyerin empedansına göre değerlendirilmektedir. Söz konusu eğrinin tepe noktasının sağ tarafındaki çok yüksek empedans değerlerine sahip bariyer modelleriyle yalıtım performansı sağlanabildiği gibi sol tarafındaki küçük empedans değerleriyle de istenilen düzeyde yalıtım performansı teorik olarak elde edilebilmektedir. Bu çalışmada yüksek empedanslı rijit ve katı bir dalga bariyer modelinin yalıtım performansını ölçmek yerine empedansı

düşük, çevre dostu ve geri dönüşüm özellikli dolgu malzemelerine bağlı dalga bariyer modelinin geliştirilmesi alternatif bir çözüm olarak sunulmuştur.



Şekil 3.16. Bariyer malzemesinin titreşim enerjisi iletkenliği üzerinde etkisi (Massarsch, 2005).

Bu sebeple açılan hendek düşük yoğunluklu hafif bir malzeme olan ve zemin kadar bir empedansa sahip gaz beton düşey duvar panelleri ile desteklenmiştir (Şekil 3.17). Bariyerin cidar malzemesinin empedansı yüzey dalgasının yayıldığı zemin katmanının empedansı ile yakın seçilerek söz konusu cidar ile zemin bölgesinin devamı gibi davranan ideal bir ortam oluşturulmaya çalışılmış ve böylelikle yayılan dalga karakterinin korunabilmesi (büyütülmemesi) amaçlanmıştır. Paneller yerleştirilmeden önce su yalıtımını sağlayabilmek amacıyla hendek içerisine membran bir örtü serilmiş ve panel elemanlar kullanılarak gaz beton cidarlı açık hendek tipi dalga bariyeri oluşturulmuştur. Panellerin kalınlığı 10 cm'dir. Düşey duvar panelleri fabrika, avm, depo ve iş merkezi gibi sanayi ve ticari yapılar ile konutların dış ve iç duvar yapımında kullanılır. Betonarme veya çelik taşıyıcı yapıya dıştan veya kolon aralarına monte edilebilen elemanlar A1 sınıfı yanmaz özellikte, hafif ve montaja hazır, düzgün yüzeyli çevre dostu bloklardır. İlgili gaz beton elemanlara dair malzeme özellikleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Oluşturulan içi boş gaz beton cidarlı bariyer Tablo 3.7'den görülebileceği üzere 23 Ekim 2021'de test edilmiştir. Kullanılan tüm ivmeölçerlerin kaydettiği titreşimler ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri bakımından elde edilmiştir. Hatırlanacağı üzere bariyersiz durumda serbest zemin titreşimlerinin incelendiği bir önceki bölümde ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri M129, M150 ve M157 cihazları için ayrı ayrı verilmişti.



Şekil 3.17. Gaz beton cidarlı açık hendek tipi dalga bariyerinin inşaatı.

Ancak bu bölümde sunulacak olan her bir grafikte üç adet farklı bariyer tipi gösterilmiş olup, bariyersiz durum ve içi boş bariyerli durumlar grafiklerin sabitleri olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.8. Gaz beton panellerin malzeme özellikleri.

Malzeme Özelliği	Birim	Değer
Ortalama Elastisite Modülü	MPa	1749
Kuru Birim Hacim Ağırlık	kg/m ³	500
Basınç Dayanımı	MPa	3.5
Akma Dayanımı	MPa	500
Çekme Dayanımı	MPa	550
Yangına Tepki Sınıfı	-	A1

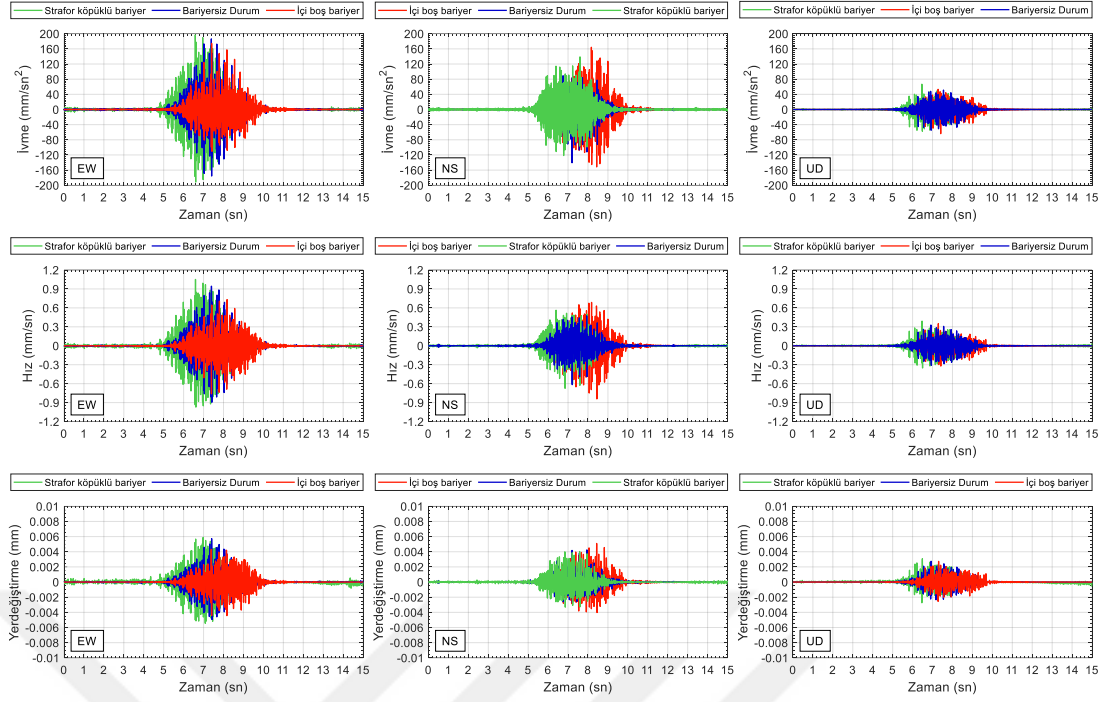
Bir başka deyişle, her bir dolgu malzemesiyle oluşturulan farklı türdeki pasif dalga bariyerleri referans kabul edilen bariyersiz durum ve içi boş bariyerli durumlar ile karşılaştırılmıştır. İçi boş bariyerli durum için de çalışmanın tamamında olduğu gibi üç farklı tren geçişi kaydedilmiş ve bu deneyler tamamlandıktan sonra farklı dolgu malzemelerinin performanslarının incelenmesi aşamasına geçilmiştir. Burada bir konunun tekrar altını çizmekte fayda vardır. Dalga bariyeri olarak en iyi performansı veren yalıtım metodunun zemindeki açık bir hendek olduğu bilinmektedir. Ancak

yerleşim bölgelerinde açık hendek kullanımı, can güvenliği ve ilgili hendekte zeminin yanal stabilizasyonu gibi problemlere sebep olmaktadır. Titreşim dalgalarının yayılma ve yansıma davranışının zeminin ve bariyerde kullanılan malzemenin empedansları arasındaki farka bağlı olduğu yukarıda açıklanmıştır. Buna bağlı olarak boşluğun yani havanın birim hacim ağırlığına en yakın birim hacim ağırlığına sahip dalga bariyerini bulmak hedeflenmiştir. Havanın birim hacim ağırlığı 0.0012 t/m^3 'tür. Açık hendek tipi dalga bariyerinde ilk dolgu malzemesi olarak seçilen strafor köpüğün birim hacim ağırlığı ise $0.01-0.03 \text{ t/m}^3$ değerleri arasındadır.

Geri dönüşüme gönderilmek üzere rulolar haline getirilen strafor köpük öbekleri 42 cm çapında ve 2 m uzunluğunda olup ağırlıkları yaklaşık 2 kg'dır. Söz konusu malzemeler kartonpiyer fabrikasından alınıp bariyerin içine dolgu malzemesi olarak konulmuş ve strafor köpüklü bariyerin dalga yalıtım performansı incelenmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Gaz beton cidarlı açık hendek tipi dalga bariyerinin inşaatı.

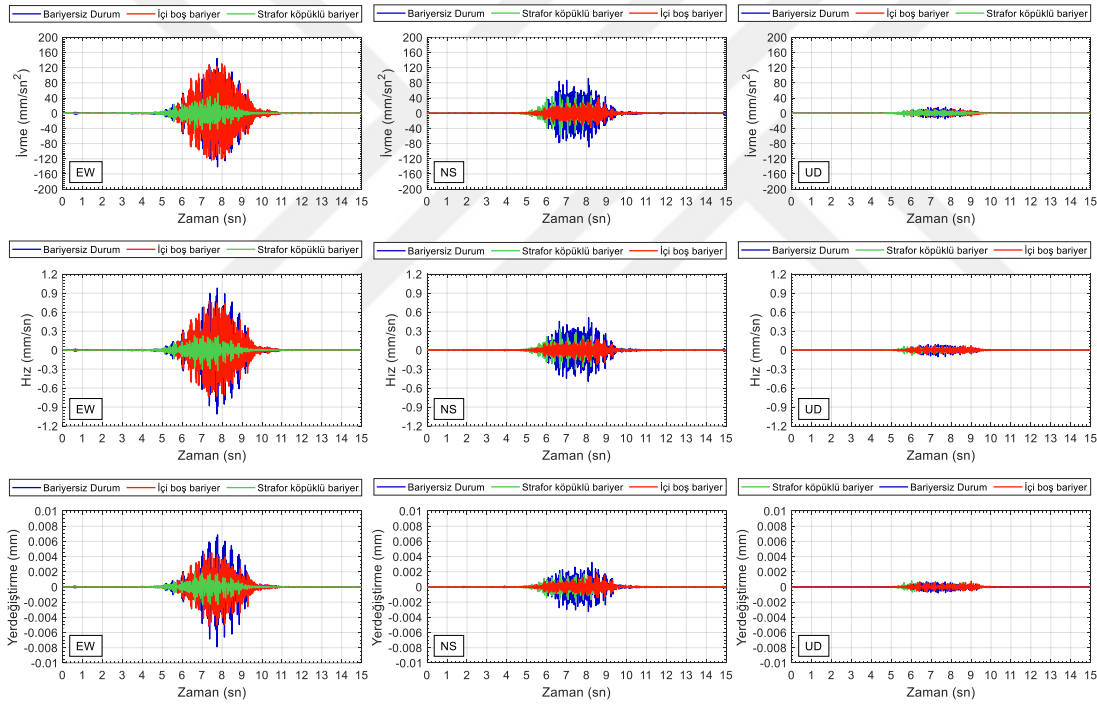


Şekil 3.19. Strafor dolgulu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Kaydedilen aynı hızdaki üç farklı tren geçişine ait en elverişsiz sonuçlar aşağıda sırasıyla M129, M150 ve M157 ivmeölçerleri için ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri bakımından bariyersiz durum ve içi boş bariyerli durumlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 3.19). Şekil 3.19'da M129 ivmeölçerinin kaydettiği titreşimler incelendiğinde EW doğrultusunda strafor köpüklü bariyer, bariyersiz duruma kıyasla ivme değerini yaklaşık %6, hız değerini %11, yerdeğiştirme değerini ise %3 mertebelerinde arttırmıştır. NS doğrultusu dikkate alındığında ivme bakımından dikkat çekici bir değişim olmamakla birlikte hız bakımından yaklaşık %28, yerdeğiştirme bakımından ise %17 mertebelerinde bir artış gözlenmiştir. Benzer şekilde düşey doğrultuda da ivme ve hız genliklerinde %20 mertebelerinde artışlar mevcuttur. Dolgu malzemesi olarak strafor köpük kullanılması durumunda içi boş bariyerli duruma kıyasla ise EW doğrultusunda ivme genliği %13, hız genliği %38, yerdeğiştirme genliği ise %33 artmıştır. NS doğrultusunda ise EW yönünün aksine genliklerde %3 ile %15 arasında değişen azalmalar görülmüştür. Düşey doğrultuda da EW doğrultusu ile benzer bir artış eğilimi görülmekle beraber değerler doğu-batı doğrultusunda olduğu kadar dikkat çekici düzeyde değildir. Ancak burada M129 ivmeölçerinin bariyerin önünde olduğunu hatırlatmakta fayda vardır. Dalga, yayıldığı ortamda bir başka ortam ile karşılaştığında bir bölümü geri yansımakta ve böylelikle bariyerin

önünde bulunan ölçüm noktalarındaki titreşim genliklerinde büyümeler gözlemlenebilmektedir.

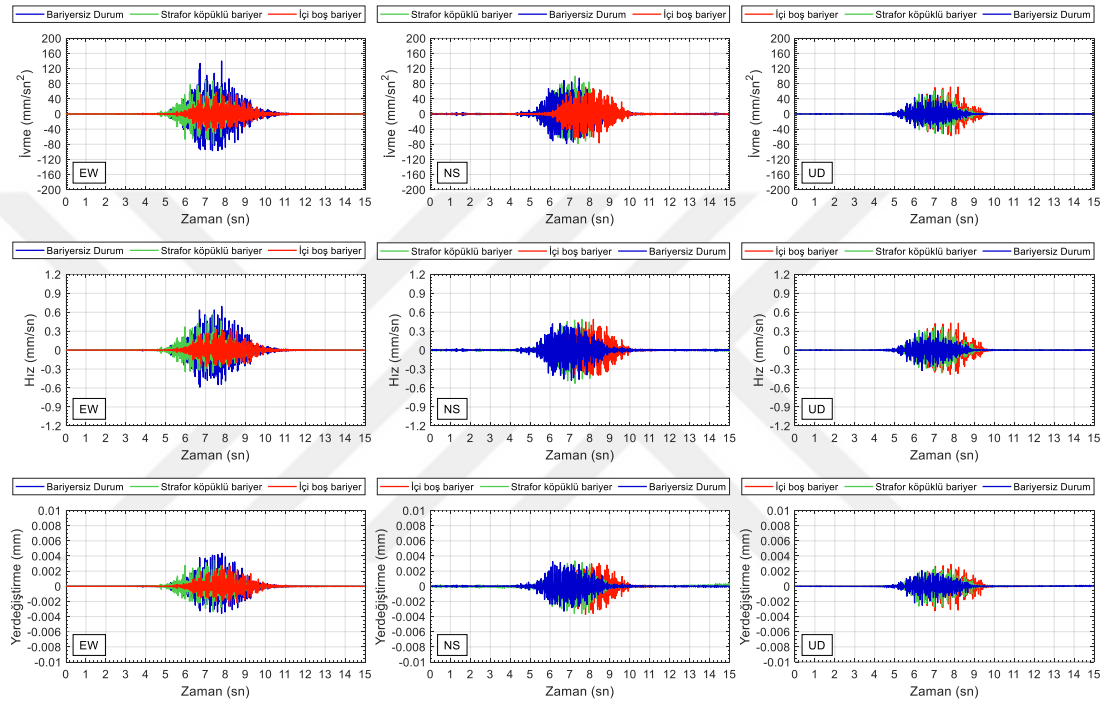
M150 ivmeölçerinden alınan kayıtlar incelendiğinde ise (Şekil 3.20) EW doğrultusunda strafor köpüklü bariyerin ivme genliklerini %63; hız genliklerini %68 ve yerdeğiştirme genliklerini %72 mertebelerinde azalttığı gözlenmiştir. En dikkat çekici sonuçlar tren hattına paralel doğu-batı doğrultusunda olsa da kuzey-güney doğrultusu ve düşey doğrultularda da genliklerde azalmalar elde edilmiştir. Örneğin kuzey-güney bileşeninde ivme ve hız bakımından bu değerler %50 mertebelerinde iken düşey doğrultuda sırasıyla %32 ve %21 civarındadır. Strafor köpüğün kullanıldığı bariyer tipi içi boş bariyerli durum ile kıyaslandığında ise özellikle EW doğrultusunda ivme, hız ve yerdeğiştirme genliklerinin yaklaşık %60 azaldığı görülecektir.



Şekil 3.20. Strafor dolgulu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

M157 ivmeölçerinin kaydettiği veriler strafor köpüklü bariyerin farklı doğrultular için farklı davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Örneğin EW doğrultusunda ivme bakımından bariyersiz duruma kıyasla %36 mertebelerinde bir azalma gözlenirken NS ve UD doğrultularında bu değerler sırasıyla %6 ve %24 artmıştır. Şekil 3.21'den görülebileceği üzere EW doğrultusu için hız bileşeni incelendiğinde ise strafor köpüklü bariyer, bariyersiz doğal saha koşullarına kıyasla ölçüm yapılan M157 kodlu

ivmeölçerin bulunduğu noktada %17'lik bir azalma sağlarken kuzey-güney ve düşey doğrultularında %10'luk bir artışa sebep olmuştur. Dolgu malzemesi olarak strafor köpüğün kullanıldığı bariyer tipi içi boş bariyer ile kıyaslandığında elde edilen genlik artışları özellikle EW yönünde ivme bakımından %55 hız bakımından ise %63 olup oldukça ilgi çekici düzeydedir. Ancak düşey doğrultuda bu eğilim değişmiş olup genliklerde içi boş bariyerli duruma kıyasla %15 mertebelerinde azalmalar tespit edilmiştir.



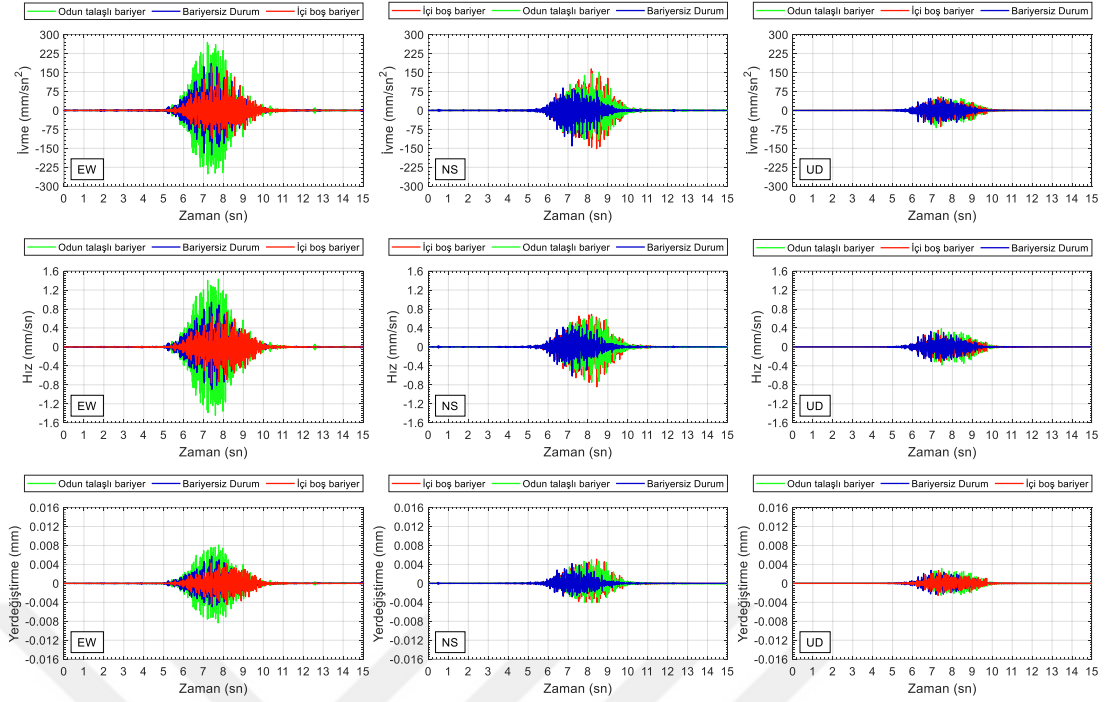
Şekil 3.21. Strafor dolgulu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında bariyerin içine odun talaşı doldurulmuştur (Şekil 3.22). Kereste fabrikasından geri dönüşüm amaçlı ayrılan talaşlar alınarak; gaz beton cidarlı bariyerde dolgu malzemesi olarak denenmiştir. Dalga bariyeri dolgu malzemesi olarak seçilen odun talaşının birim hacim ağırlığı oldukça küçük olup; 0.36-0.57 t/m³ değerleri arasındadır.



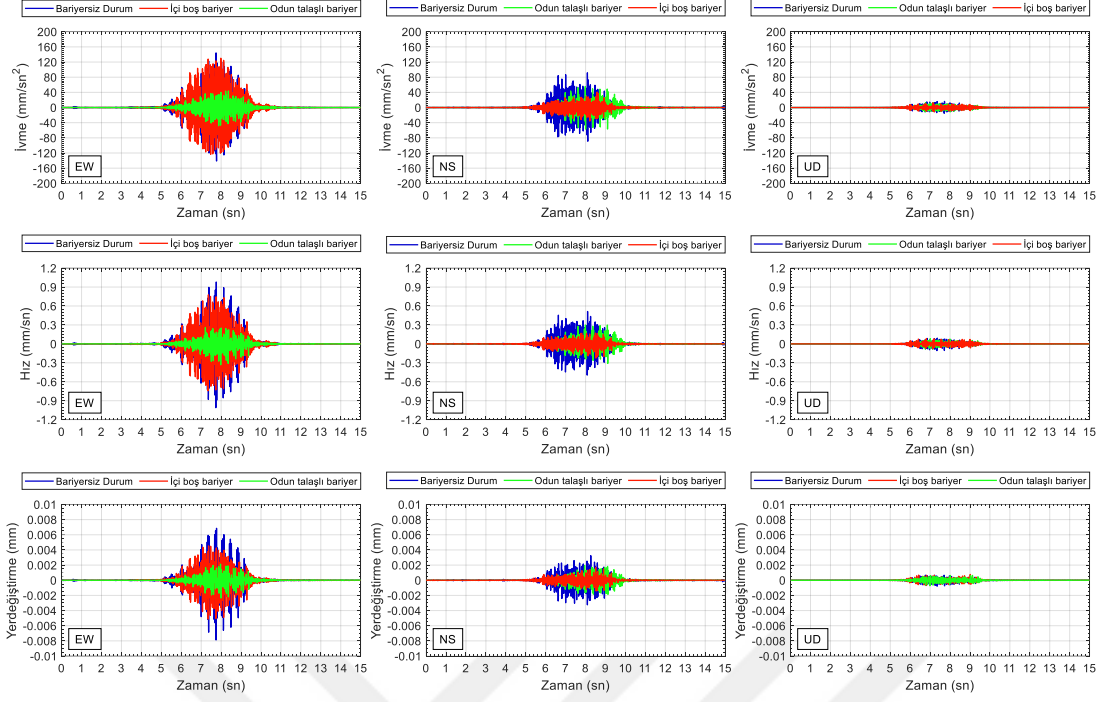
Şekil 3.22. Odun talaşlı bariyer modeli.

Bir önceki deneysel çalışmada olduğu gibi burada da odun talaşlı bariyer tipi farklı üç tren geçişinin arasından en elverişsiz titreşim genliklerini oluşturan seferlerin tasnif edilmesi suretiyle bariyersiz ve içi boş bariyerli durumlarla karşılaştırılmış ve grafik olarak Şekil 3.23-3.25’de her üç ivmeölçer için sunulmuştur. M129 ivmeölçerine ait grafikler incelendiğinde gerek içi boş bariyer tipi gerekse odun talaşlı bariyer tipi için bariyersiz duruma kıyasla ivme, hız ve yerdeğiştirme genlikleri oldukça artmıştır. Özellikle doğu-batı bileşeninde bu artış hız bakımından bariyersiz duruma göre %53 mertebelerindeyken içi boş bariyerli duruma göre %90 mertebelerindedir. Burada da strafor köpüklü bariyerde olduğu gibi M129 ivmeölçerinin bulunduğu noktada ölçülen titreşim genliklerinde büyümeler gözlenmiştir. NS bileşeninde ise odun talaşlı bariyer, bariyersiz durum ve içi boş bariyerli durumların her birine kıyasla farklı bir eğilim göstermiştir. Örneğin bariyersiz duruma göre hız genliğinde %21’lik bir artış olurken içi boş bariyerli durumda ise %11’lik bir azalma söz konusudur. Bariyerin yaklaşık 3.5 m arkasına yerleştirilen M150 ivmeölçerinin kaydettiği değerler incelendiğinde ise bariyersiz duruma kıyasla her üç doğrultuda da titreşim genliklerinde ciddi azalmalar saptanmıştır. İvme genlikleri bakımından bir değerlendirme yapılacak olursa EW bileşeni için bu azalmalar %66, NS için %50 ve UD için %20 mertebelerindeyken hız genlikleri bakımından ise sırasıyla %68, %55 ve %20’dir (Şekil 3.24). Odun talaşı ile doldurulmuş bariyer tipi, içi boş bariyerli durumla karşılaştırılacak olursa söz konusu azalmaların sadece doğu-batı bileşeni için elde edilmiş olup hız, ivme ve yerdeğiştirme genlikleri için bu değer yaklaşık %60 civarındadır.

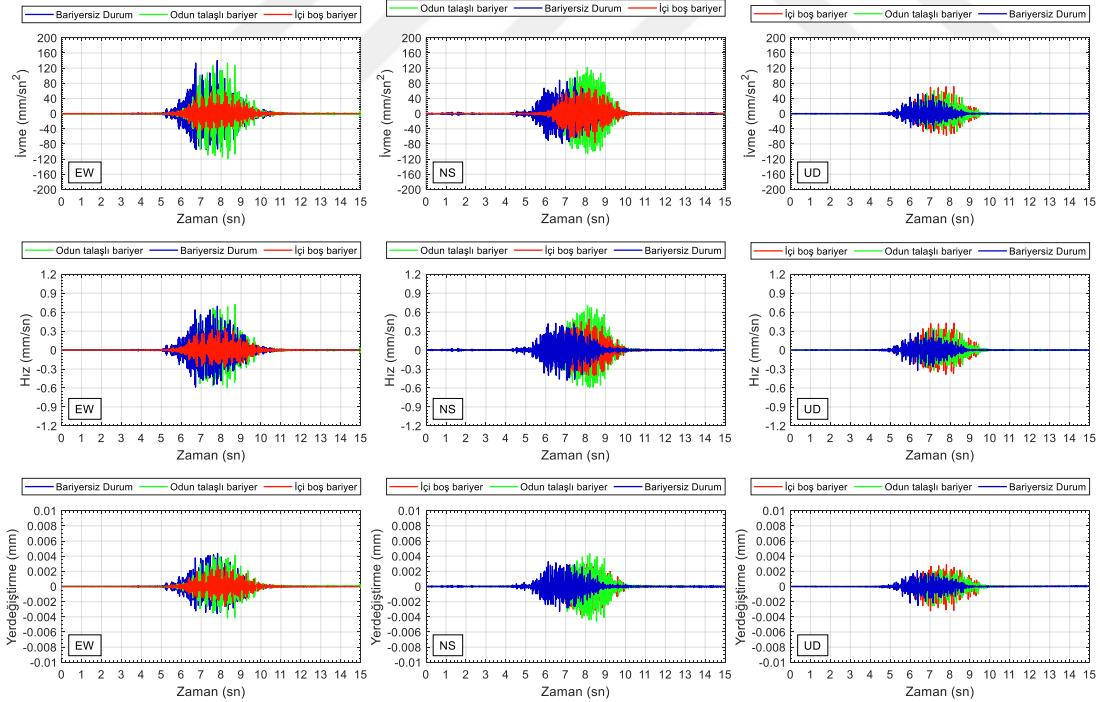


Şekil 3.23. Odun talaş dolgulu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Bariyerin önünde konumlandırılan M157 ivmeölçerinin kaydettiği titreşimler incelendiğinde ise özellikle içi boş bariyerli duruma kıyasla odun talaşlı bariyerin titreşim genliklerini büyüttüğü gözlenmiştir. Bu artış tren hattına paralel olan doğu-batı doğrultusunda daha çarpıcı düzeyde olup ivme bakımından %129 mertebelerine kadar çıkmıştır. Bariyersiz durum ile bir kıyaslama yapıldığında ise yine odun talaşının M157 kodlu ivmeölçerin bulunduğu noktada özellikle NS yönünde hız ve yerdeğiştirme genliklerini %40 mertebelerinde arttırdığı söylenebilir. Bir önceki bölümde anlatılan strafor köpüklü bariyerden de hatırlanacağı üzere her bir bariyer tipi farklı doğrultularda efektif sonuçlar vermiştir. Bu sonuç genel bir değerlendirme yapmayı zorlaştırır da bina varlığının göz önünde bulundurulacağı bölümde görülebileceği üzere binanın yatay ötelenme rijitliği dikkate alınarak belirlenen kuvvetli yönü, seçilecek dolgu malzemesi ve bariyerin sahada konumlandırılması üzerinde oldukça etkilidir.



Şekil 3.24. Odun talaş dolgulu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.



Şekil 3.25. Odun talaş dolgulu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Benzer şekilde bariyer arkasında serbest zemin yüzeyinde konumlandırılan M150 ivmeölçerinin kaydettiği titreşim genliklerinin azalması da daha genel bir

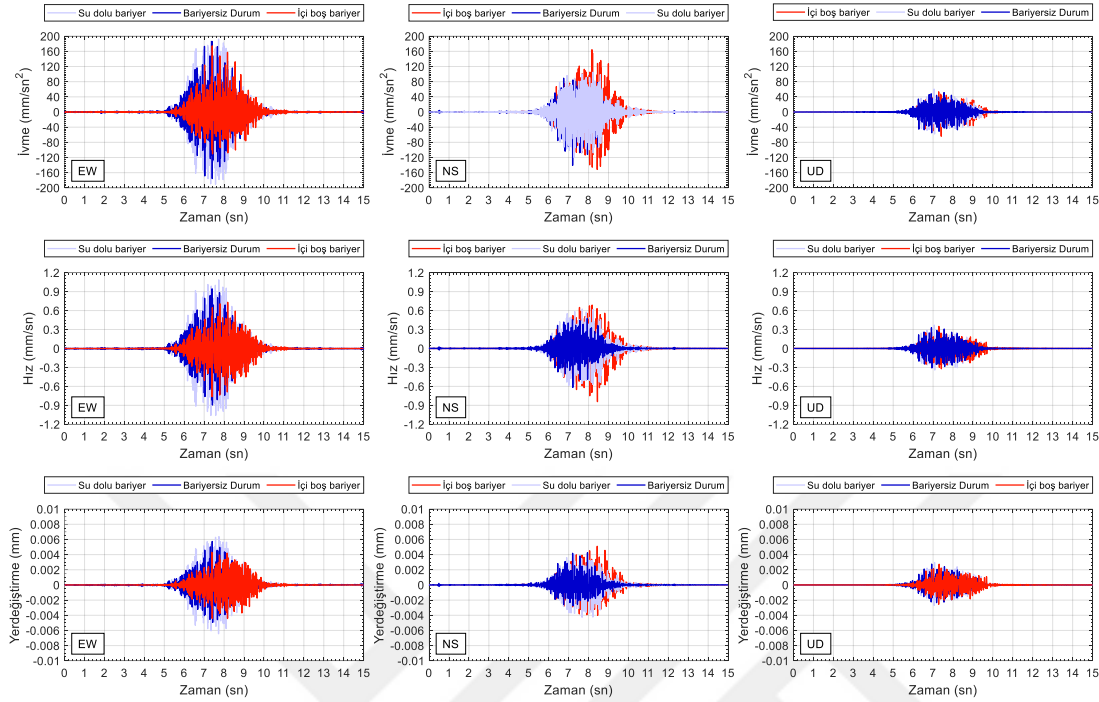
değerlendirme olarak ifade edilebilir. Dördüncü aşamada gaz beton cidarlı bariyerin içi su ile doldurularak; suyun dalga yalıtım performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmış ve 2 m derinliğindeki gaz beton cidarlı bariyerin tamamı su ile doldurulmuştur. Suyun birim hacim ağırlığı 1 t/m^3 dür (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Su dolu bariyer.

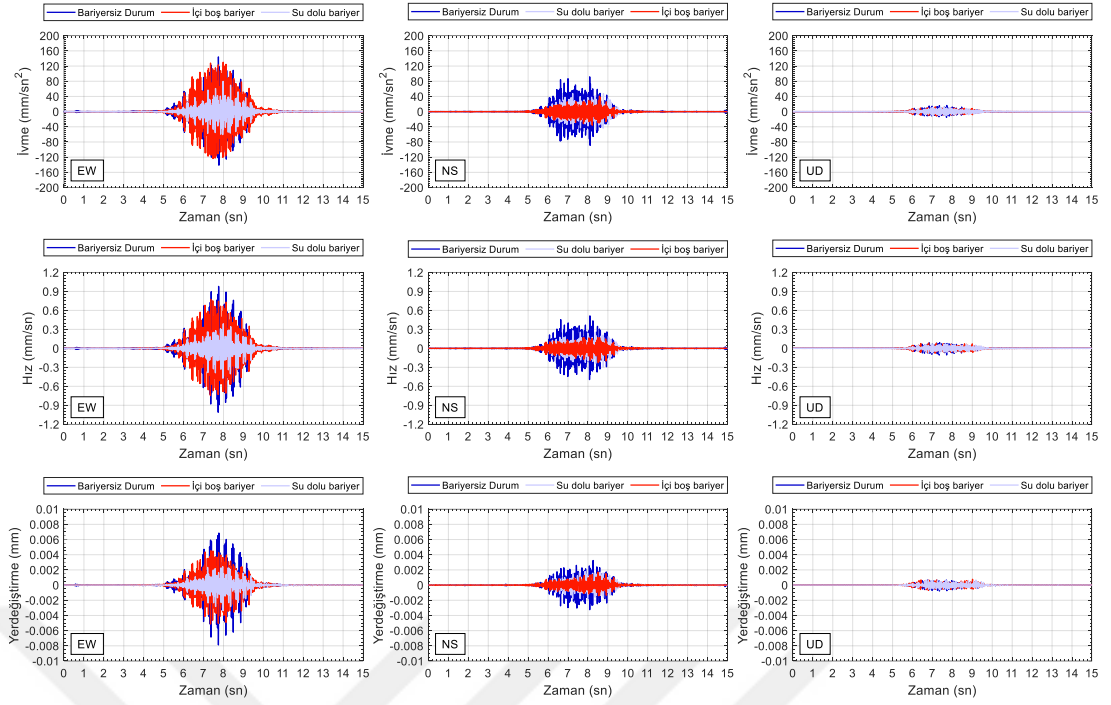
Su dolu bariyerin dalga yalıtım performansı üzerine etkisi M129 numaralı ivmeölçerin yerleştirildiği nokta için bariyersiz durumla karşılaştırılacak olursa titreşim genliklerinde EW doğrultusunda ivme bakımından %3, hız bakımından %15, yerdeğiştirme bakımından ise %12'lik bir artış meydana gelmiştir (Şekil 3.27). Bu kıyaslama içi boş bariyerli durum için yapıldığında ise söz konusu genlik artışları daha dikkat çekici düzeyde olup EW doğrultusu için hız ve yerdeğiştirme bakımından %45 mertebelerindedir. Kuzey-güney doğrultusunda su dolu bariyer farklı bir davranış sergileyerek ivme genliklerinde bariyersiz duruma kıyasla %15; içi boş bariyerli duruma göre ise %27 mertebelerinde azalış sağlamıştır. İvme, hız ve yerdeğiştirme genliklerinde meydana gelen artış veya azalışlar düşey doğrultu için dikkat çekici düzeyde değildir. Bariyerin arkasına yerleştirilen M150 ivmeölçerinin kaydettiği titreşim genlikleri incelendiğinde (Şekil 3.28) gerek bariyersiz durum gerekse içi boş bariyerli durumlara kıyasla su dolu bariyerin genlikleri azalttığı görülecektir. Tren hattına paralel doğu-batı bileşeni için bu azalma miktarı bariyersiz ve içi boş bariyerli durumlara nazaran ivme bakımından sırasıyla %45 ve %40 düzeyindedir. NS bileşeni incelendiğinde ise su dolu bariyerin titreşim genliklerini EW doğrultusunda olduğu gibi gerek ivme gerekse hız ve yerdeğiştirme bakımından düşürdüğü sonucuna varılır.

Bu doğrultuda elde edilen azalım oranları daha dikkat çekici seviyede olup incelenen her üç büyüklük için (ivme, hız, yerdeğiştirme) yaklaşık %57 civarındadır.

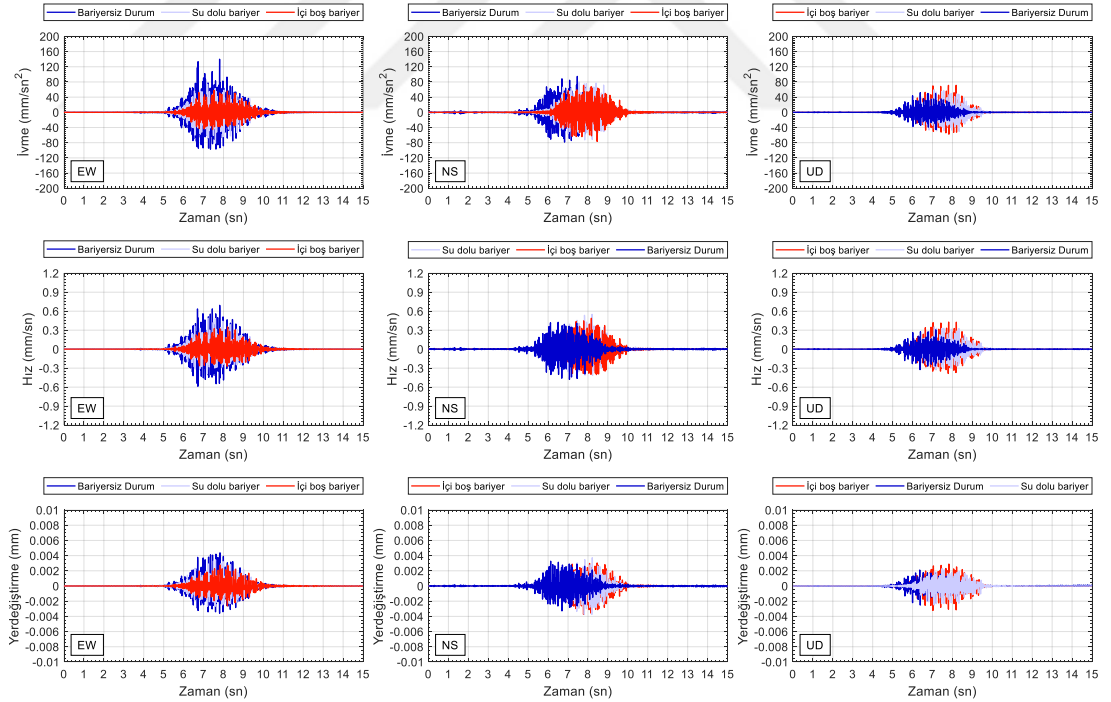


Şekil 3.27. Su dolu bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Şekil 3.29’da verildiği üzere serbest zemin yüzeyinde bariyerin önüne konumlandırılan bir diğer ivmeölçerin (M157) ölçtüğü titreşimlere bakılacak olursa titreşim genliklerindeki değişimlerin farklılık gösterdiği görülecektir. Söz konusu titreşimler EW ve NS doğrultularında bariyersiz duruma göre ivme bakımından azalım gösterirken içi boş bariyerli durum ile bir kıyaslama yapıldığında ise genliklerde artış olduğu anlaşılabacaktır. EW doğrultusunda bariyersiz duruma kıyasla ivmedeki artış %42, NS doğrultusunda ise %16 mertebelerindedir.



Şekil 3.28. Su dolu bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.



Şekil 3.29. Su dolu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Son olarak bariyerin içine dolgu malzemesi olarak yerleştirmek üzere; yüksek hacim ve düşük yoğunlukları nedeniyle çeşitli yalıtım sıvalarında ham madde olarak

kullanılan cam kürecik malzemesi seçilmiştir (Şekil 3.30-3.31). Birim hacim ağırlığı 0.6 t/m^3 olan cam kürecik malzemesinin ortalama elastisite modülünün 7750 MPa olduğu bilinmektedir.



Şekil 3.30. Geri dönüştürülmüş malzemeden üretilmiş genleştirilmiş cam kürecik.

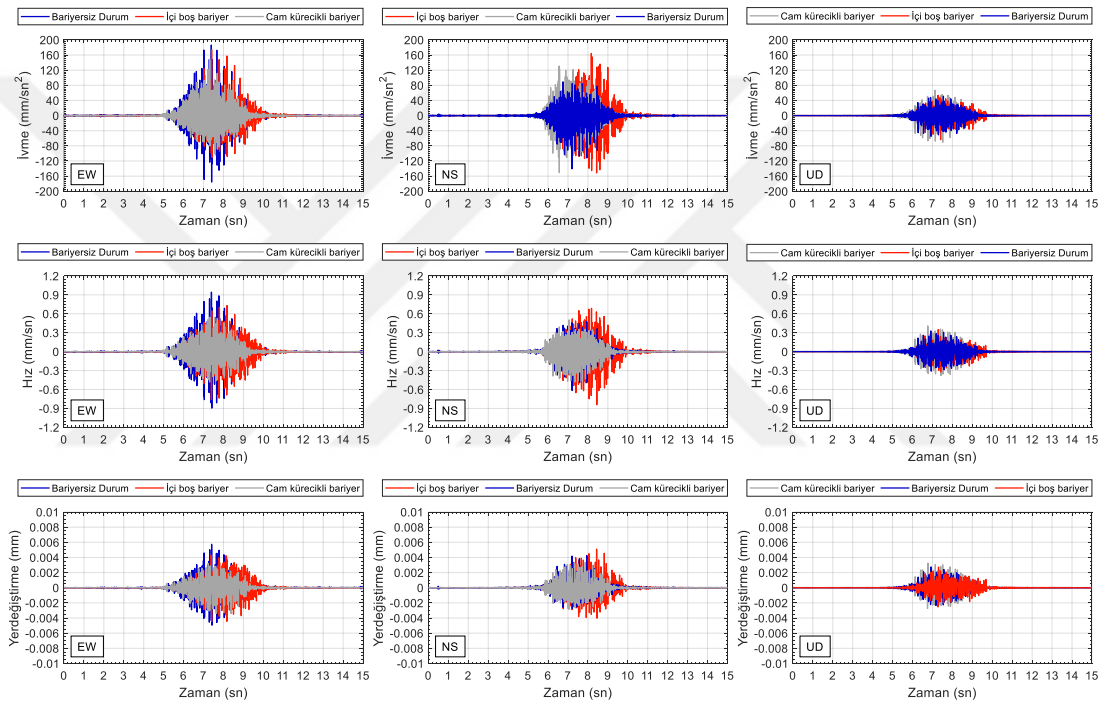


Şekil 3.31. Cam kürecikli bariyer uygulaması.

Granüler cam kürecik geri kazanılabilirlik, yüksek akustik sönümleme, yüksek ısı direnci, küf geçirmez-buhar geçirgenliği, düşük su emme (su itici), ilave stabilite direnci ve düşük empedans değeri vasıtasıyla düşük enerji geçirgenlik katsayısı gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır. Dalga bariyerinin içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanılan cam küreciğe dair bazı teknik katalog özellikleri Tablo 3.9’da verilmiştir. Cam kürecik dolgulu bariyer durumu için de üç eksenli ivmeölçerlerin kaydettiği ham veriler işlendikten sonra her bir kaydın her bir doğrultusu için ivme-zaman, hız-zaman, yerdeğiştirme-zaman ilişkileri çizdirilmiştir. Bahsi geçen grafikler üç doğrultu için en elverişsiz sonuçlar göz önünde bulundurularak verilmiştir (Şekil 3.32).

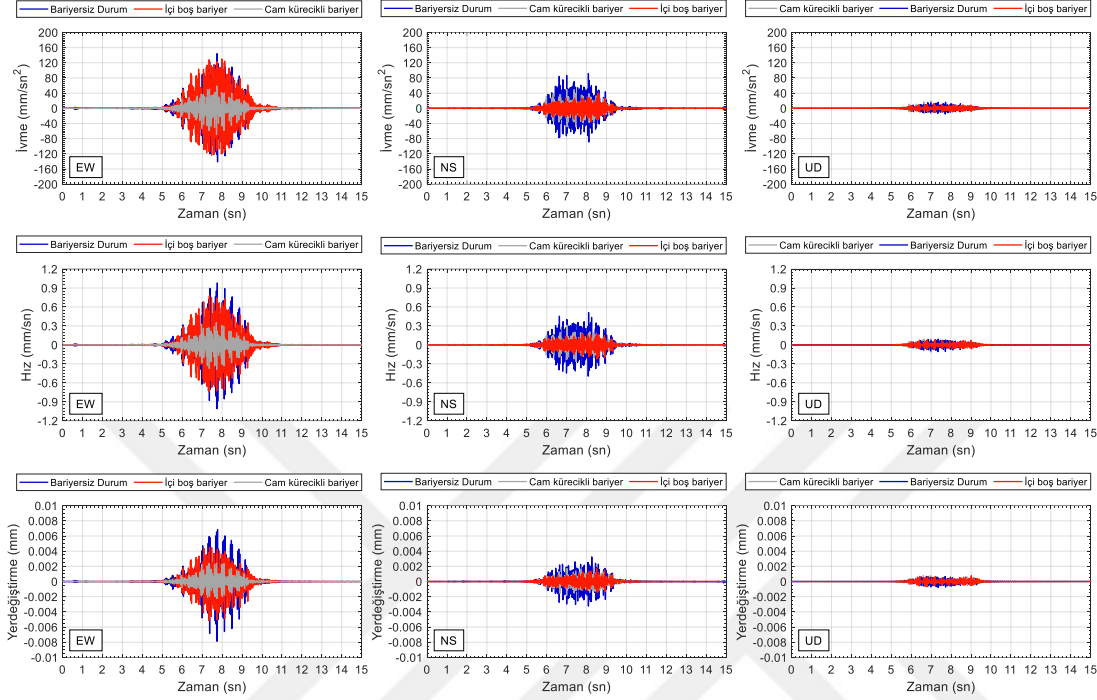
Tablo 3.9. Cam kürecik malzeme özellikleri.

Malzeme Özelliği	Birim	Değer
Ortalama Elastisite Modülü	MPa	7750
Isıl İletkenlik Katsayısı	W/Mk	0.0631
Birim Hacim Ağırlık	t/m ³	0.60
Basınç Dayanımı	MPa	2.71
Eğilme Dayanımı	MPa	1.50

**Şekil 3.32.** Cam kürecik dolgulı bariyer için M129 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

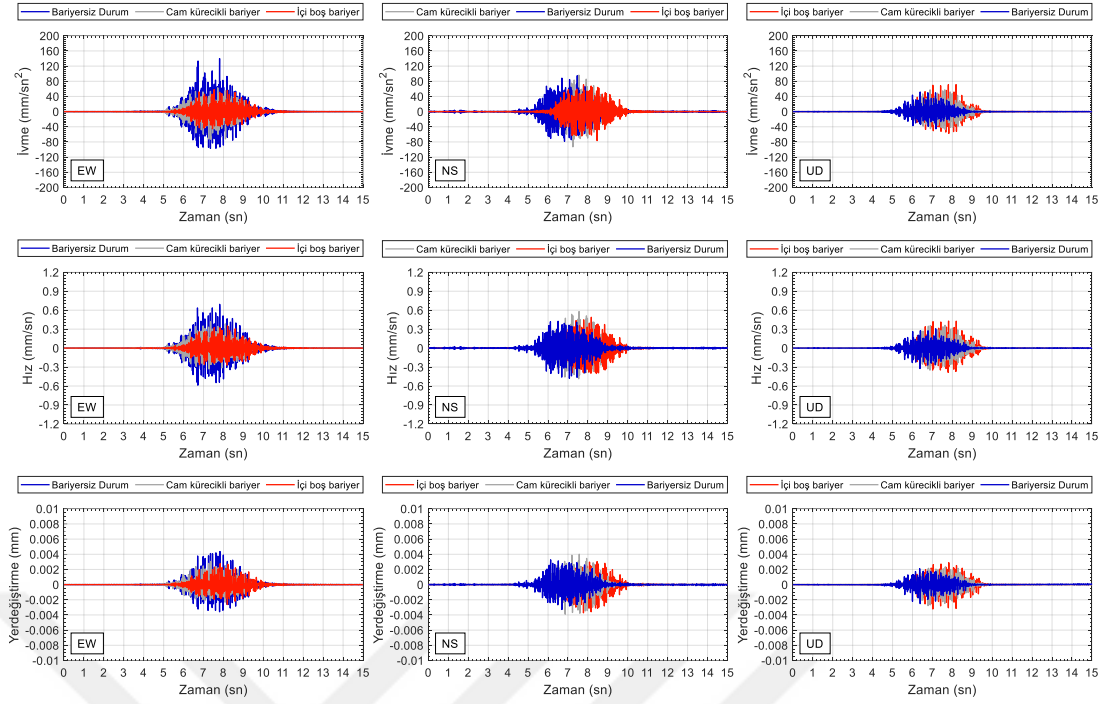
Şekil 3.32’den görülebileceği üzere cam kürecikli bariyer, bariyersiz ve içi boş bariyerli durumlara göre ivme genliklerini EW doğrultusunda sırasıyla %20 ve %15 mertebelerinde azaltırken hız genliklerindeki azalış daha dikkat çekici düzeyde olup %41 ve %27’dir. Düşey doğrultuda cam kürecikli bariyerin etkisi gerek bariyersiz gerekse içi boş bariyerli durumlarla kıyaslandığında titreşim genliklerinin arttığı ancak bu artışın çok önemli derecede olmadığı görülmüştür. Bariyerin arkasına yerleştirilen M150 numaralı ivmeölçerden elde edilen veriler incelendiğinde (Şekil 3.33) özellikle EW doğrultusunda cam kürecik dolgu malzemesinin ivme, hız ve yer değiştirme genliklerinin tamamını ilgi çekici düzeyde azalttığı görülmüştür. Bariyersiz duruma

kıyasla cam kürecikli bariyer EW ve NS doğrultularında titreşim genliklerini ivme bakımından %52 civarında düşürürken içi boş bariyerli duruma kıyasla kuzey-güney doğrultusunda hız bakımından %37'lik bir artış elde edilmiştir.



Şekil 3.33. Cam kürecik dolgulı bariyer için M150 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

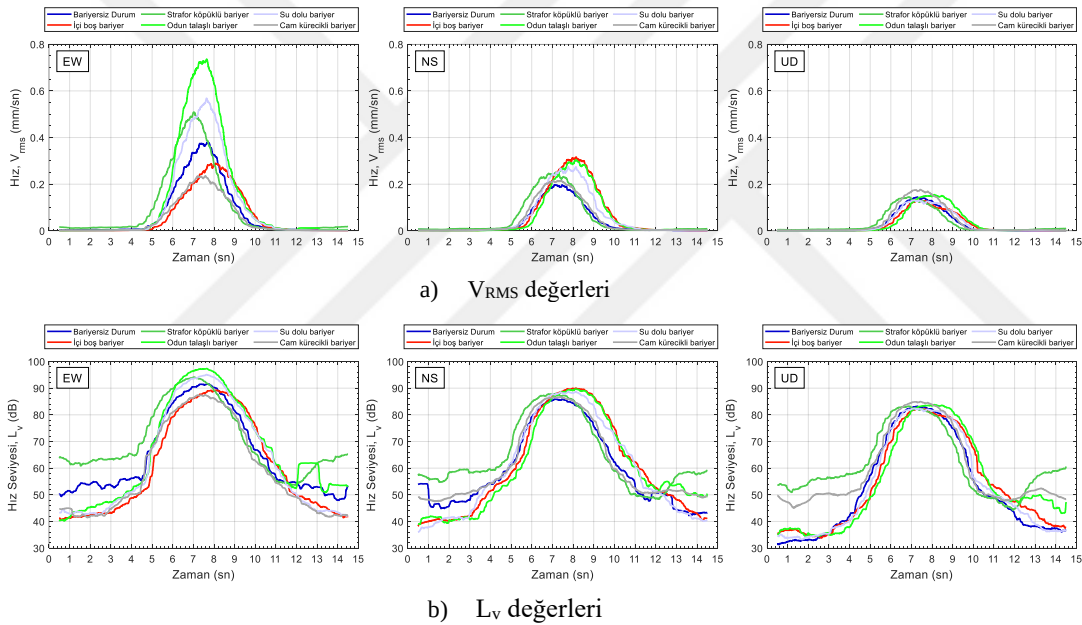
M157 numaralı ivmeölçer incelendiğinde (Şekil 3.34) ise cam kürecik dolgu malzemesinin bariyersiz duruma göre ivme genliklerini %48, hız genliklerini %40, yer değiştirme genliklerini ise %27 civarında azalttığı sonucuna varılabilir. İçi boş bariyerli durum ile bir kıyaslama yapıldığında genliklerin arttığı ancak bu artışın önemli seviyelerde olmadığı söylenebilir.



Şekil 3.34. Cam kürecik dolgulu bariyer için M157 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Yüksek hızlı demiryolu güzergâhının yakınındaki test binasının önüne açılan gaz beton duvarlı hendek tipi pasif dalga bariyer modelinde kullanılan iç dolgu malzemesinin yer hareketi dalgalarını iletme ve yansıtma kapasitesini veya titreşim enerjisi soğurma performansını insan algısı ve hassas cihazların çalışmasına etkisi açısından daha anlaşılabilir ve birbiriyle kolay kıyaslanabilir bir şekilde gösterebilmek için, bariyerin önüne ve arkasına ardışık olarak yerleştirilen ivmeölçerlerle kaydedilen yüzey titreşim hareketleri V_{RMS} (Hızın kuadratik ortalaması) ve L_v (Hız seviyesi) olmak üzere iki farklı değerlendirme ölçütüyle ele alınmıştır. Burada titreşim sensörleri tarafından algılanan sinyallerdeki değişim miktarlarının büyüklüğünün ölçülmesinde ortalama karekök (RMS, karelerinin ortalamasının karekökünün alınması) yöntemi yani kuadratik ortalama kullanılmıştır. Serbest zemin yüzey titreşim sinyallerinden elde edilen parçacık hız verilerine yukarıda belirtilen yaklaşımla genlik dönüşümü uygulanarak değişimin artı ve eksi yönde olduğu dalgalar sıfır sınır çizgisinin üzerine taşınmıştır ve ilgili ölçüm noktasının her bir yumuşatılmış titreşim genliklerinden V_{RMS} zaman geçmiş eğrileri her bir titreşim doğrultusu için elde edilmiştir. Ayrıca kaydedilen sinyallerin V_{RMS} 'ye dönüştürülmüş verilerinden referans hız sabitine göre logaritmik ölçekte desibel cinsinden hesaplanan hız seviyelerinin (L_v) zamana bağlı değişimi de hesaplanmıştır.

Pasif titreşim yalıtım bariyerinde kullanılan iç dolgu malzemesinin bariyer önündeki serbest zemin titreşim hareketine etkisi doğrudan zemin yüzeyine yerleştirilen M129 ve M157 kodlu ivmeölçerlerden alınan kayıtlara göre değerlendirilmiştir. Bahsi geçen ivmeölçerler bariyerin önüne eşit uzaklıkta ($L=3.4$ m) fakat bariyer uzunluğunca farklı noktalara konuşlandırılmışlardır. Bunun amacı kullanılan bariyer iç dolgu malzemesinin yüzey titreşim dalgalarının yayılımına etkisini bariyerin önüne ve arkasına eşit uzaklıkta yerleştirilen ivmeölçerler ile aynı anda binalı ve binasız durumlar için ölçebilmektir. Burada M157 kodlu ölçüm noktasının 7 m arkasında test binasının zemin yüzeyine oturmuş temel plağı bulunurken, M129 kodlu ölçüm noktasının aynı uzaklıkta arkasında zemin yüzeyinde herhangi bir rijit yapı bulunmamaktadır (serbest zemin).



Şekil 3.35. M129 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.

Pasif yalıtım durumunda kullanılan dolgu malzemelerinin bariyer önündeki zemin titreşimlerine etkisi M129 kodlu ivmeölçerden elde edilen maksimum hız genlikleri ($\max V_{RMS}$) dikkate alınarak değerlendirildiğinde (Şekil 3.35a);

- Doğu-batı titreşim yayılma doğrultusunda bariyersiz saha durumuna göre %40 civarında zemin yüzeyindeki titreşim genliklerinde bir azalma cam kürecik esaslı bariyer iç dolgu malzemesiyle sağlanmıştır. Gaz beton duvarlı bariyerin içinin boş olması durumunda bile hız büyüklüklerinde %25 civarında bir azalma

gözlemlenmiştir. Bariyerin iç malzemesinin odun talaşı olması durumunda ise bariyer önünde yüzey titreşim dalgalarının hız genlikleri %100'e yakın artış göstermiştir.

- Kuzey-güney titreşim yayılma doğrultusunda ise yalıtımda kullanılan tüm iç dolgu malzemeleri yansıyan dalgaların genliklerini bariyerin önündeki yakın alanda büyötmüştür. Cam kürecik esaslı dolgu malzemesiyle yapılan yalıtım uygulamasında bariyersiz sahaya göre hız genliklerindeki artış %10'nun altında kalarak titreşim dalgalarını yansıtarak büyötmeye etkisi diğer malzemelere göre daha az olmuştur. İçi boş dalga bariyeri uygulamasında ise söz konusu yayılım doğrultuda zemin titreşimleri %60 oranında artarak en büyük yansıyan dalga hız genliklerine ulaşmıştır.

- Düşey doğrultudaki titreşim kayıtları doğal saha koşullarında yapılan ölçümlerle karşılaştırılarak incelendiğinde, içi boş gaz beton duvarlı bariyer ölçüm noktasındaki yer titreşimlerinin hız genliklerini %10 azaltmıştır. Bariyersiz duruma göre hız değerlerinde %20 civarında bir büyötmeye etkisiyle en kötü performansı bu titreşim doğrultusunda cam kürecik dolgu malzemeli bariyer uygulaması göstermiştir.

Aynı ivmeölçerden elde edilen titreşim kayıtları bariyersiz ve bariyerli durumun farklı dolgu malzemeli uygulamaları için desibel cinsinden hız seviyeleri karşılaştırıldığında (Şekil 3.35b);

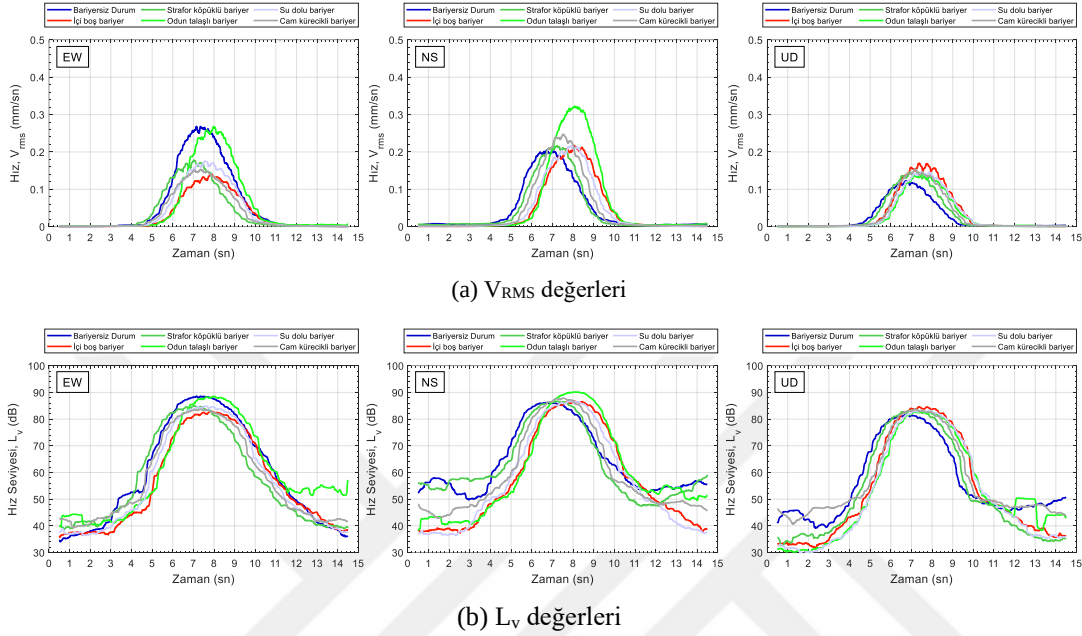
- Doğu-batı titreşim yayılma doğrultusunda cam kürecik malzemeli yalıtım bariyeri ile zemin titreşimlerinin hız seviyesinde 4.2 desibellik bir düşüş sağlanmıştır. Gaz beton duvarlı bariyerin içinin boş olması durumunda aynı ölçüm noktası için elde edilen yalıtım performansı 2.4 desibellik bir azalmaya karşı gelmektedir.

- Kuzey-güney titreşim yayılma doğrultusunda diğer dolgu malzemelerine göre hız seviyesinde en küçük büyöme 0.8 desibel ile yine cam kürecik esaslı malzemeyle sağlanmıştır.

- Düşey doğrultudaki titreşimlerin hız seviyelerinde 0.9 desibellik azalma içi boş dalga bariyer modeliyle elde edilirken, en kötü performansı hız seviyesinde 1.8 desibellik bir yükselişe neden olan içi cam kürecik malzemeyle dolu bariyer göstermiştir.

Literatürdeki insan yapısı titreşim kaynaklarının yalıtımıyla ilgili öncül eserlerde (Wood, 1968; Dolling, 1970; Haupt, 1995) dalga kaynağından uzak sahalarda en az dalga boyu derinliğinde açılan hendeklerin hemen arkasındaki alandaki serbest zeminin yüzey titreşim genliklerinde %80 varan bir azalma meydana gelebileceği

vurgulanmıştır. Ancak, hendeğin önünde ve yan tarafında gelen yüzey dalgalarının hendeğin açık tarafında yansımalarından ve birbiriyle girişiminden dolayı serbest zemin titreşim genliklerinde en az %25'e varan bir artış bekleneceği de açıkça belirtilmiştir.



Şekil 3.36. M157 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.

Seçilen dolgu malzemelerinin bariyer önündeki zemin titreşimlerine etkisi M157 kodlu ivmeölçerden elde edilen maksimum hız genlikleri ($\max V_{RMS}$) açısından bariyersiz saha durumunda kaydedilen verilerle karşılaştırıldığında (Şekil 3.36a),

- Doğu-batı titreşim doğrultusunda içi odun talaşı ile dolu bariyer dışında diğer bariyer uygulamalarında %35 ile %45 arasında titreşim genliklerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Dolgu malzemesinin odun talaşı seçilmesi yansıyan dalgaların yayılım genliklerini bariyersiz saha koşuluna göre hiç değiştirmemiştir. Gaz beton duvarlı bariyerin içinin boş bırakılması durumunda hız büyüklüklerinde %45 civarında bir azalmayla en başarılı bariyer önü yalıtım performansı elde edilmiştir.
- Kuzey-güney titreşim doğrultusunda ise yalıtımda kullanılan tüm iç dolgu malzemeleri yansıyan dalgaların genliklerini bariyerin önündeki yakın ölçüm noktasında büyötmüştür. İçi boş dalga bariyeri uygulamasında ise söz konusu yayılım doğrultusunda zemin titreşim genlikleri sadece %5 artarak, strafor köpüklü ve içi su dolu bariyer uygulamalarıyla aynı derecede etki göstermiştir. Odun talaşlı dolgu

malzemesiyle yapılan yalıtım uygulamasıyla hız genliklerinde %55 artış ile diğer malzemelere göre en olumsuz titreşim davranışı elde edilmiştir.

- Düşey titreşim doğrultusunda bariyersiz durumdaki saha koşulunda elde edilen verilere göre bariyer önündeki yayılma alanında hız genliklerinin tüm bariyer uygulamalarında %20 ile %40 arasında büyüdüğü gözlemlenmiştir. Dolgusuz gaz beton duvarlı bariyerin içi su veya strafor köpük ile doldurularak gerçekleştirilen titreşim testlerinde yansıyan dalga genliklerinin büyümesindeki değişim %40'tan %20'e küçülerek neredeyse yarı yarıya azaltılmıştır. Bariyersiz duruma göre hız değerlerinde %15 civarında bir büyültme en iyi olumsuz etkiyi bu titreşim doğrultusunda odun talaşı göstermiştir.

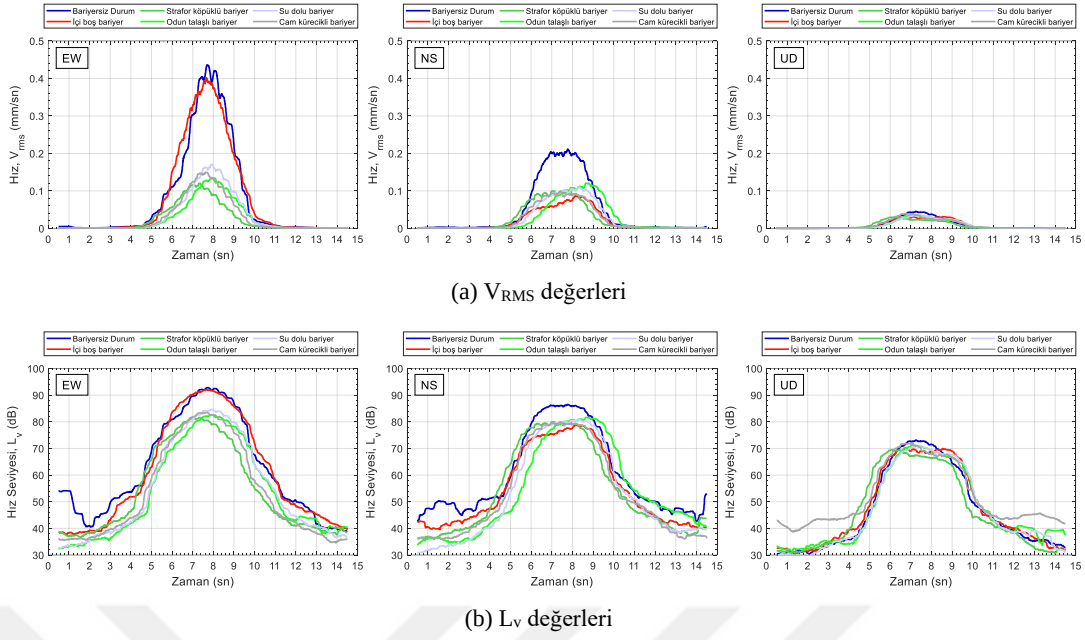
Bariyersiz ve bariyerli saha koşulları için aynı gözlem noktasında serbest zemin titreşimlerinden edilen maksimum hız seviyelerinin değişimi bariyerli durumda dolgu malzemesinin etkileri de dikkate alınarak değerlendirildiğinde,

- Gaz beton duvarlı bariyerin içinin boş kullanılması durumunda doğu-batı doğrultusundaki titreşimlerin hız seviyesinde 5.6 desibellik bir düşüş elde edilmiştir. Bariyer için farklı yoğunlukta dolgu malzemelerin seçilmesi yansıyan titreşim dalgalarının soğurmasına yukarıda bahsedilen değerden daha büyük bir katkı verememiştir.
- Bariyerin boş kullanılması durumuyla, içinin strafor köpük malzeme ve su ile doldurulmasıyla elde edilen ölçüm sonuçları titreşimlerin kuzey-güney yayılma doğrultusunda aynı çıkmıştır ve her üç deney koşulunda hız seviyelerinde 0.4 desibellik çok küçük bir artış meydana gelmiştir. Odun talaşlı bariyer uygulamasında ölçüm noktasındaki zemin titreşimlerinde 3.9 desibellik bir artışla en elverişsiz sonuç elde edilmiştir.
- Düşey doğrultudaki titreşimlerin hız seviyelerinde en küçük artış 1.1 desibel ile odun talaşlı dalga bariyer modeliyle elde edilirken, en kötü performansı 2.8 desibellik bir hız artışına neden olan içi boş bariyer uygulaması göstermiştir. Bariyer için kullanılan tüm dolgu malzemeleri ölçüm noktasındaki zemin titreşim genliklerinin daha da büyümesine engel olmuştur.

Pasif titreşim yalıtım bariyerinde kullanılan iç dolgu malzemesinin bariyer arkasındaki zemine titreşim dalgalarını aktarma özelliği yani titreşim enerjisini soğurma performansı doğrudan zemin yüzeyine yerleştirilen M150 kodlu ivmeölçer ile test

edilmiştir. Bahsi geçen ivmeölçer bariyerin arkasına $L=3.0$ m uzaklıkta konuşlandırılmıştır. Bariyerli ve bariyersiz saha durumlarında yumuşatılmış hız-zaman ilişkisi eğrilerinden elde edilen maksimum tepe noktaları ($\text{maks}V_{\text{RMS}}$) ve bu maksimum değerlere karşı gelen desibel cinsinden hız seviyeleri L_v her bir titreşim doğrultusu için değerlendirilmiştir (Şekil 3.37). Pasif yalıtım durumunda kullanılan dolgu malzemelerinin bariyer arkasındaki zemin titreşimlerine etkisi M150 kodlu ivmeölçerden elde edilen maksimum hız genliklerine ($\text{maks}V_{\text{RMS}}$) göre değerlendirildiğinde (Şekil 3.37a),

- İçi boş gaz beton duvarlı bariyer uygulamasıyla titreşim dalgalarının doğu-batı yayılma doğrultusundaki genliklerinde ancak %10 civarında bir yalıtım sağlanmıştır. Bariyer için test edilen tüm dolgu malzemeleri titreşim genliklerinin azaltılmasında %60'ın üzerinde bir katkı sağlamıştır. Strafor köpüklü dalga bariyer modeliyle hız genliklerinde %72'e varan bir değişim ile oldukça büyük bir yalıtım performansı elde edilmiştir.
- Kuzey-güney titreşim yayılma doğrultusunda ise bariyerli yalıtımda kullanılan tüm iç dolgu malzemeleri dalgaların genliklerini bariyerin arkasındaki ölçüm noktasında %40 ile %55 arasında küçültmüştür. Cam kürecik esaslı dolgu malzemesiyle yapılan yalıtım uygulamasında bariyersiz sahaya göre hız genliklerindeki azalma %55'e ulaşarak dalga iletkenliği diğer test edilen malzemelere göre daha az olmuştur. Söz konusu ölçüm noktası için en büyük yalıtım performansı zemin titreşim genliklerinin %60 civarında azaltılmasıyla içi boş dalga bariyeri durumunda elde edilmiştir.



Şekil 3.37. M150 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması

- Düşey doğrultudaki titreşim kayıtları doğal saha koşullarında yapılan ölçümlerle karşılaştırılarak incelendiğinde, bariyer içinin strafor köpük ile doldurulmasıyla hız genliklerindeki azalma eğilimindeki değişim dolgu bariyer durumuna göre %5 artarak yalıtım performansı %33'e çıkmıştır. En düşük yalıtım performansını bu titreşim doğrultusunda cam kürecik dolgu malzemeli bariyer uygulaması titreşim genliklerini ancak %14 küçülterek göstermiştir.

Aynı ivmeölçerden elde edilen titreşim kayıtları bariyersiz ve bariyerli durumun farklı dolgu malzemeli uygulamaları için desibel cinsinden hız seviyeleri karşılaştırıldığında (Şekil 3.37b),

- Gaz beton duvarlı bariyerin içinin boş kullanılması durumunda doğu-batı doğrultusundaki titreşimlerin hız seviyesinde bariyersiz saha koşuluna göre 0.7 desibellik bir düşüş ile küçük bir yalıtım elde edilmiştir. Strafor köpüğün bariyerde dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda hız seviyesindeki 11.2 desibellik azalmayla en büyük yalıtım performansı elde edilmiştir. Diğer dolgu malzemeleriyle de bariyer arkasındaki serbest zemin yüzeyinde 8 desibelin üzerinde önemli derecede bir titreşim yalıtımı sağlanmıştır.
- Kuzey-güney doğrultusundaki titreşimlerin hız seviyelerinde 7.8 desibellik bir azaltma yaparak en büyük yalıtım performansı içi boş dalga bariyer modeliyle elde

edilmiştir. Bariyer için kullanılan farklı yoğunluklu dolgu malzemeleri ölçüm noktasındaki titreşim genliklerinin en az 4.8 desibel küçülmesine neden olmuştur.

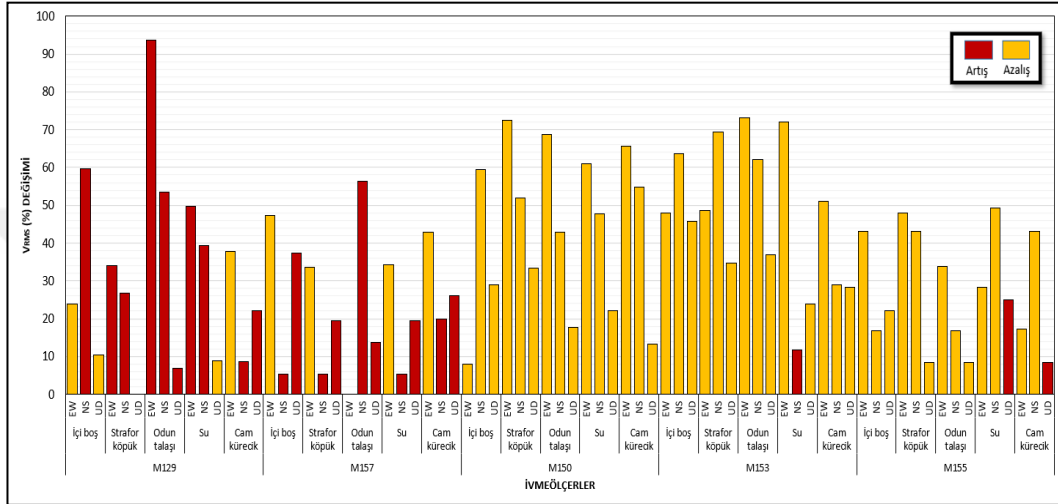
- Düşey doğrultudaki titreşimlerde en büyük yalıtım performansı strafor köpüklü dalga bariyer durumunda 3.7 desibellik bir katkı ile elde edilmiştir. İçi boş bariyer uygulaması da 3 desibellik bir titreşim yalıtımı sağlamıştır.

Hızlı tren kaynaklı geçişlerin yakın çevrede üretmiş olduğu en elverişsiz titreşimler bariyersiz ve bariyerli saha koşullarına göre karşılaştırılarak nihai bir değerlendirme yapıldığında, bariyer arkasında serbest zeminde seçilmiş bir ölçüm noktasında insan algısı ve hassas cihazlara etkisi açısından en iyi titreşim yalıtım performansı hız seviyesinde yaklaşık olarak 13.4 desibellik bir değişime neden olan strafor köpüklü dalga bariyer modeli göstermiştir. Gaz beton duvarlı dalga bariyer modeli mevcut durumuyla yani içi boş olarak kullanılmasıyla 8.4 desibellik bir titreşim yalıtımı sağlanmıştır. Strafor köpük dolgu malzemesiyle boş dalga bariyer uygulamasına göre yalıtımda 5 desibellik ilave bir kazanç elde edilmiştir. İkinci ve üçüncü başarılı titreşim yalıtım performansı gösteren dolgu malzemeleri cam kürecik ve odun talaşı şeklinde sıralanmaktadır. Cam kürecik dolgu malzemesiyle boş bariyer durumuna göre 3.2 desibellik bir ilave yalıtım elde edilirken, odun talaşlı durumda yalıtım kazancı 2.9 desibel olmuştur.

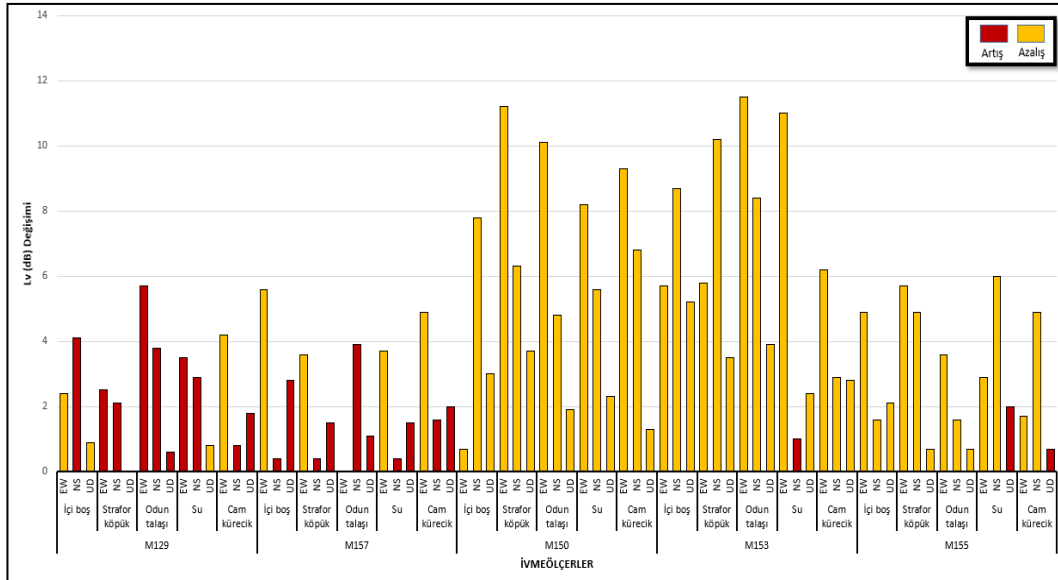
Harmonik türden dinamik yük üreten titreşim kaynağından belli uzaklıkta en az dalga boyu derinliğinde açılan hendeklerin hemen arkasındaki alandaki serbest zeminin yüzey titreşim genliklerinde %80 varan bir azalma meydana gelebileceği bilinmektedir (Wood, 1968; Dolling, 1970; Haupt, 1995). Zemine uygulanan yalıtımla genliklerin hız seviyesinde %80 varan bir azalmanın karşılığı tüm titreşim doğrultuları dikkate alınarak hesaplandığında yaklaşık 24 desibeldir. Dalga boyunun yarı derinliğinde açılan gaz beton duvarlı hendek türünden dalga bariyer uygulamasından elde edilen titreşim verileri bu açıdan değerlendirildiğinde oldukça başarılı bir yalıtım performansı göze çarpmaktadır.

Ölçüm yapılan cihaz sayısı ve farklı deney senaryoları düşünüldüğünde sonuçların Şekil 3.35-3.37’de verilen her bir grafik üzerinden ayrı ayrı değerlendirilebilmesi karmaşık olabileceğinden bariyerli saha durumlarının her bir farklı uygulaması için tüm ivmeölçerlerin gösterildiği tek bir grafikte yukarıda anlatılanlar özetlenmeye çalışılmıştır. Söz konusu noktalarda kaydedilen partikül hız verilerinin RMS

yöntemiyle işlenmesinden elde edilen yumuşatılmış hız-zaman ilişkisi eğrilerinin maksimum tepe noktalarının ($\text{maks}V_{\text{RMS}}$) bariyersiz saha durumlarına göre yüzdelik değişimleri ve bu maksimum değerlere karşı gelen desibel cinsinden hız seviyeleri L_v değerlerinin bariyersiz duruma göre değişimleri; her bir titreşim doğrultusu için karşılaştırılmıştır. Şekil 3.38 ve 3.39'dan görülebileceği üzere bina üzerine yerleştirilen M153 ve M155 ivmeölçerleri de bu grafik üzerinde gösterilmiş olmasına rağmen bu cihazlara dair değerlendirmeler bir sonraki bölümde yapılacaktır.



Şekil 3.38. Serbest zemindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için $\text{maks}V_{\text{RMS}}$ değerlerinin (%) değişimi.



Şekil 3.39. Serbest zemindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için L_v (dB) değerlerinin (%) değişimi.

3.5.2. Bina titreşimlerinin ölçülmesi

Sakarya'nın Pamukova ilçesine bağlı Yenice mevkiinde test sahasında hızlı tren kaynaklı zemin titreşimlerini korunacak yapı çevresinde azaltmayı hedefleyen farklı bariyer türlerinin deneysel olarak incelenebilmesi için deney sahasına tek katlı ve yatay ötelenme rijitliği her iki yönde de aynı olan kare bir betonarme yapı inşa edilmiştir (Şekil 3.40). Betonarme yapı tasarlanırken, yapı karkas olarak kalacağı için gerçek yapı sistemlerindeki ilave kütle etkilerini de (dolgu duvar vb.) dikkate almak amacıyla dinamik davranış üzerinden bir eşleştirme yapılmıştır. Bu doğrultuda tek katlı betonarme yapılar için öngörülen yaklaşık 0.1 s'lik hâkim titreşim periyodu değeri esas alınarak döşeme kalınlığı üzerinden yapı kütlesi belirlenmiştir. Yapı kolon, kiriş ve temel kesit ve donatı özellikleri geçmiş yapıları da temsil etmesi açısından TS500-Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kurallarında ve 1975 Deprem Yönetmeliğinde tanımlı minimum kriterler de dikkate alınarak seçilmiştir. Söz konusu yapının kolonları 25x25 cm; kullanılan boyuna donatılar 4ø14, kirişleri ise 25x30 cm ve donatıları 4ø12'dir. Döşeme yüksekliği 12 cm olan model binanın kat yüksekliği yaklaşık olarak 2.8 m, çerçeve açıklığı ise 3 m'dir. Kullanılan beton ve donatı sınıfı C25/S420'dir.

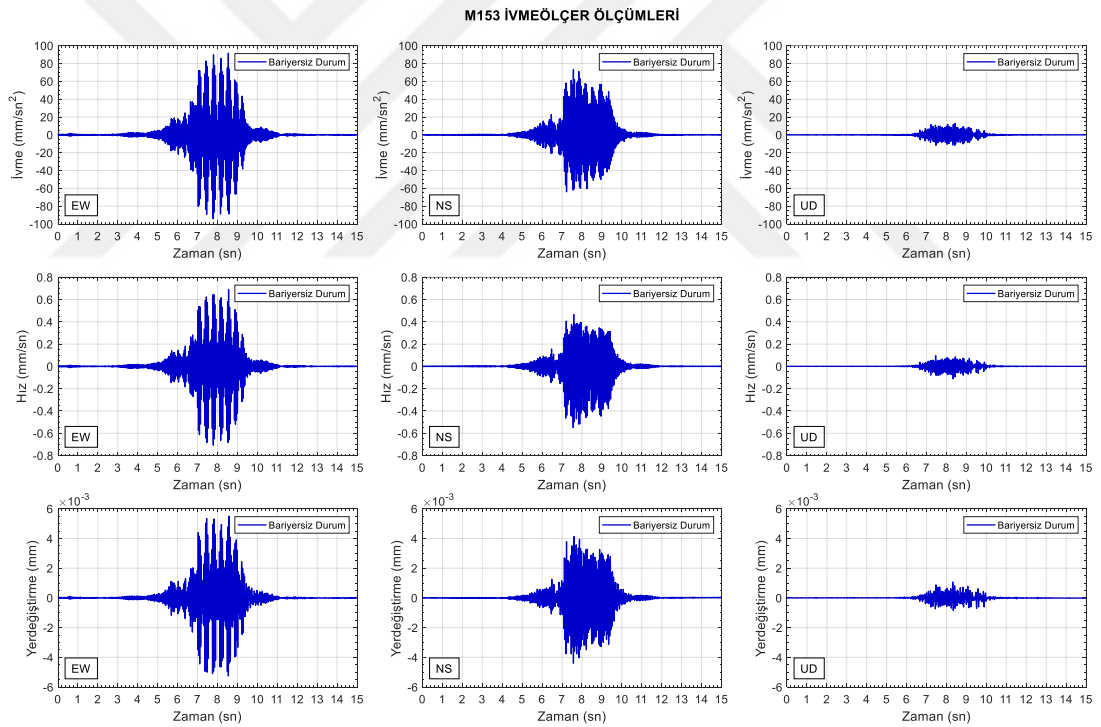


Şekil 3.40. Bina yapım süreci.

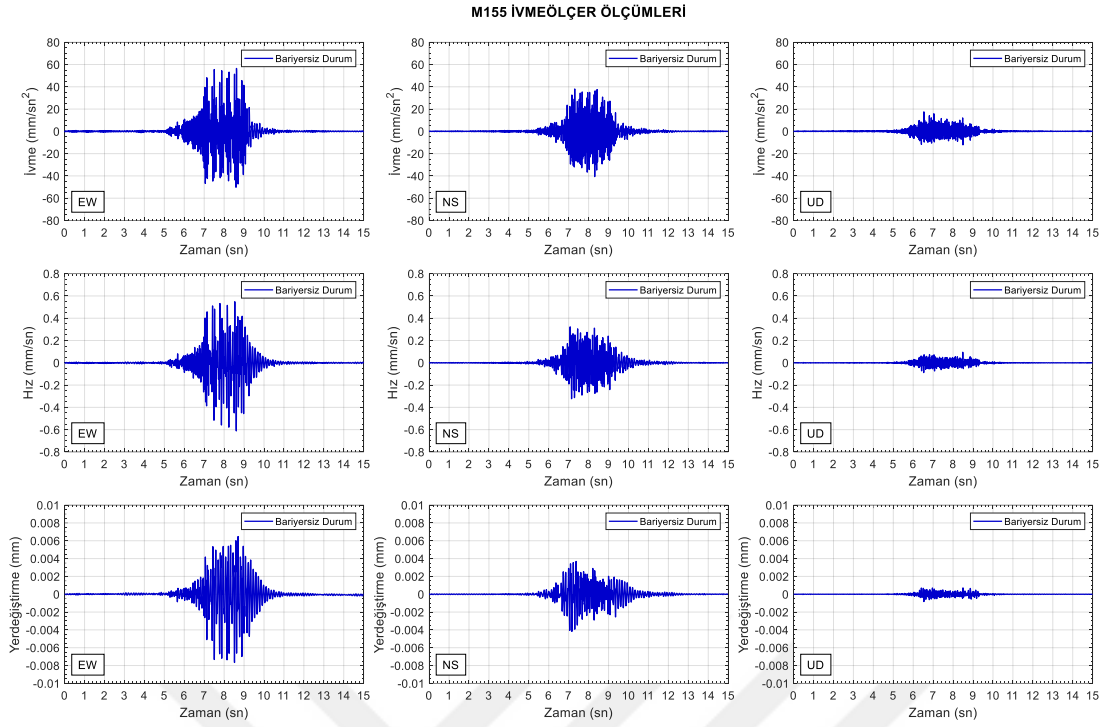
Kullanılan beton sınıfı için 7 günlük ve 28 günlük beton basınç dayanımı testleri yapılmış ve 7 günlük ortalama beton basınç dayanımı 24.1 MPa, 28 günlük ortalama basınç dayanımı ise 34 MPa' olarak belirlenmiştir.

3.5.2.1. Yalıtım bariyersiz test sahasında bina titreşimlerinin analizi

Bu bölümde ilk olarak zeminde herhangi bir hendek açılmadan bina üzerinde alınan titreşim ölçümleri değerlendirilmiş ve bu değerlendirmeler “bariyersiz durum” olarak tanımlanmıştır. Daha sonra ise aynı noktalardan alınan ölçümler farklı tipte bariyer dolgu malzemeleri için araştırılmış ve bu araştırmalarda “bariyerli durum” olarak ifade edilmiştir. Bariyersiz ve bariyerli durumlar için titreşim ölçüm sahasına ve ölçüm noktalarına ait bilgiler Bölüm 3.5.1’de verilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında binanın zemin ve üst katlarında 2 adet ivmeölçer kullanılarak ölçülen bina titreşimleri bariyersiz analiz edilmiştir. Bu ivmeölçerlerden M153 binanın zemin katında ve M155 ivmeölçerleri binanın üst katına kat döşemelerinin ortasına hizalanacak şekilde yerleştirilmiştir. Üç eksenli ivmeölçerlerin kaydettiği ham veriler işlendikten sonra her bir kaydın her bir doğrultusu için ivme-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman ilişkileri çizdirilmiştir.



Şekil 3.41. Bariyersiz durumda M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yer değiştirme-zaman ilişkileri.



Şekil 3.42. Bariyersiz durumda M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Şekil 3.41’den görülebileceği üzere bariyersiz durumda bina zemin katına yerleştirilen M153 kodlu cihazın ölçtüğü maksimum ivme değeri 94 mm/s^2 iken binanın üst katında bu değer 56.5 mm/s^2 olarak kaydedilmiştir.

Tablo 3.10. Bariyersiz durumda binadaki ölçüm noktalarından elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

İvmeölçer	Bariyer Tipi	Doğrultu	İvme (mm/s^2)	Hız (mm/s)	Yerdeğiştirme (mm)
M153	Bariyersiz Durum	EW	93.93	0.707	0.00551
		NS	73.12	0.550	0.00439
		UD	12.86	0.112	0.00107
M155	Bariyersiz Durum	EW	56.50	0.610	0.00766
		NS	40.63	0.323	0.00417
		UD	17.50	0.950	0.00082

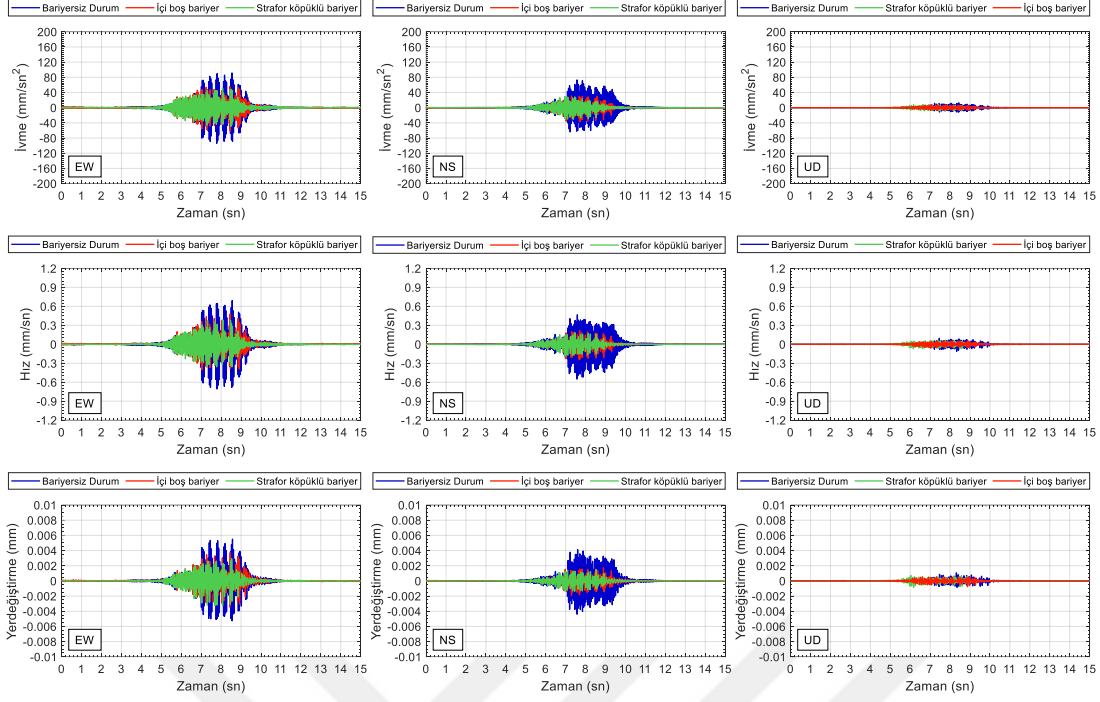
3.5.2.2. Yalıtım bariyerli test sahasında bina titreşimlerinin analizi

Bu bölümde de Bölüm 3.5.1.2’de olduğu gibi sırasıyla strafor köpüklü, odun talaşlı, su dolu ve cam kürecikli farklı bariyer türlerinin dalga yalıtım performansı binanın üzerinde bulunan iki ivmeölçer (M153 ve 155) için araştırılmıştır (Şekil 3.43). Söz konusu dolgu malzemelerine ait özellikler bir önceki bölümde anlatıldığı için burada yinelenmeyecek olup yalnızca elde edilen sonuçlar grafik olarak sunulmuştur.



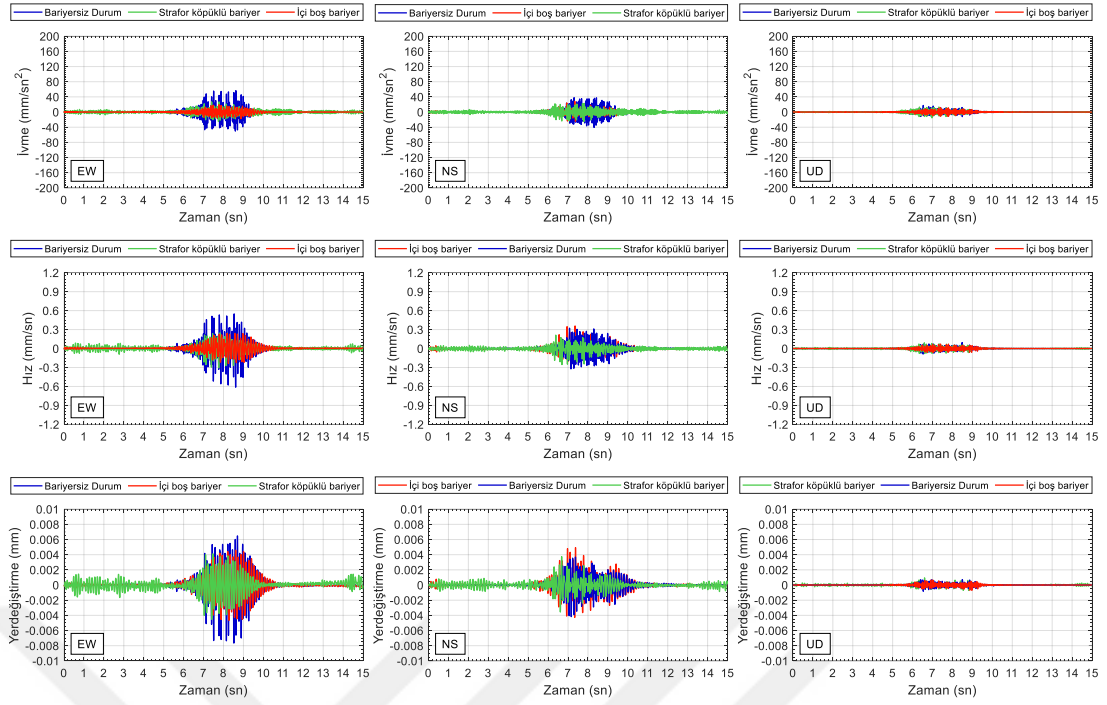
Şekil 3.43. Bariyerli durumda bina titreşim ölçümleri için test edilen farklı dolgu malzemeli dalga bariyerleri

Hatırlanacağı üzere test edilen ilk dolgu malzemesi strafor köpük olmuştur. Kaydedilen titreşimler binanın zemin katında bulunan M153 ve M155 ivmeölçerleri için sırasıyla verilmiştir (Şekil 3.44). Grafikler incelendiğinde özellikle EW ve NS doğrultuları için binanın zemin katında tren titreşimlerinin etkisiyle oluşan ivme, hız ve yer değiştirme genlikleri bariyer dolgu malzemesi olarak strafor köpük kullanılması durumunda gerek bariyersiz gerek içi boş bariyerli duruma göre azalmış olup bu düşüş bariyersiz duruma kıyasla oldukça dikkat çekicidir. Hız genliği bakımından bir kıyaslama yapılacak olursa bariyersiz duruma göre doğu-batı doğrultusunda %45, kuzey-güney doğrultusunda ise %64 seviyelerinde bir genlik azalışı sağlanmıştır.



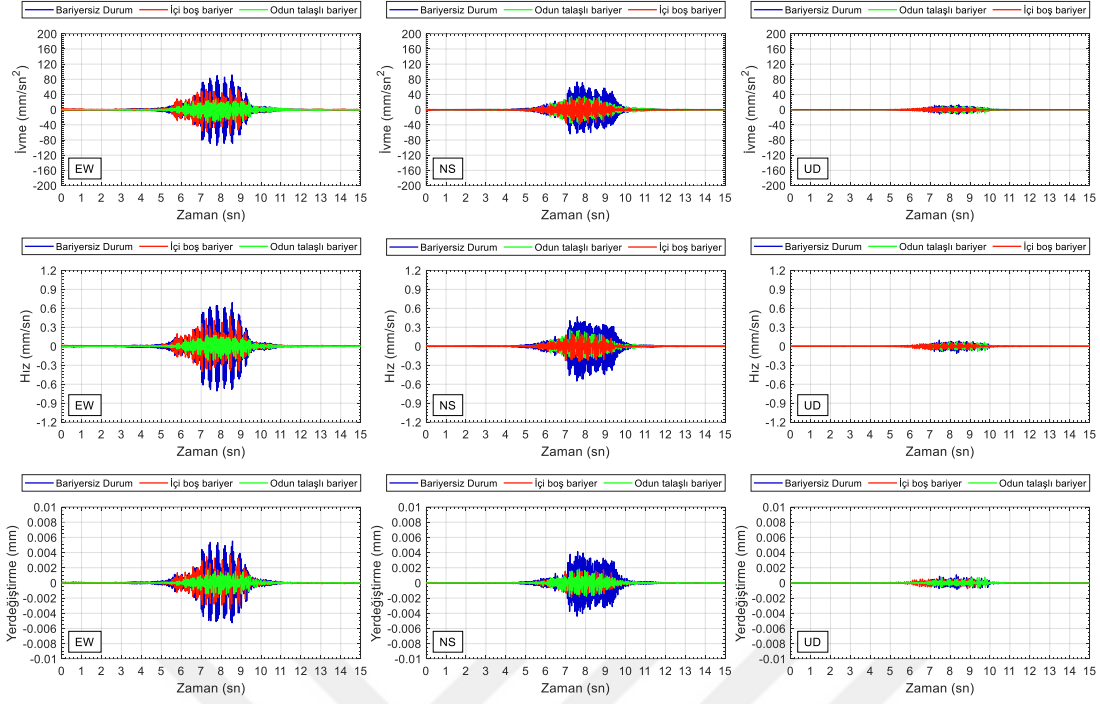
Şekil 3.44. Strafor dolgulu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Binanın üst katına yerleştirilen M155 kodlu ivmeölçerin kaydettiği titreşimler incelendiğinde özellikle EW doğrultusunda bariyersiz duruma göre strafor köpüklü bariyerin ivme ve hız genliklerinin düşürülmesi bakımından %50 civarında bir katkı sağladığı söylenebilir (Şekil 3.45). Örneğin bariyersiz durumda kaydedilen en elverişsiz pik ivme değeri 56.5 mm/s^2 iken strafor köpüklü bariyer ile ölçülen değer 27 mm/s^2 civarındadır.

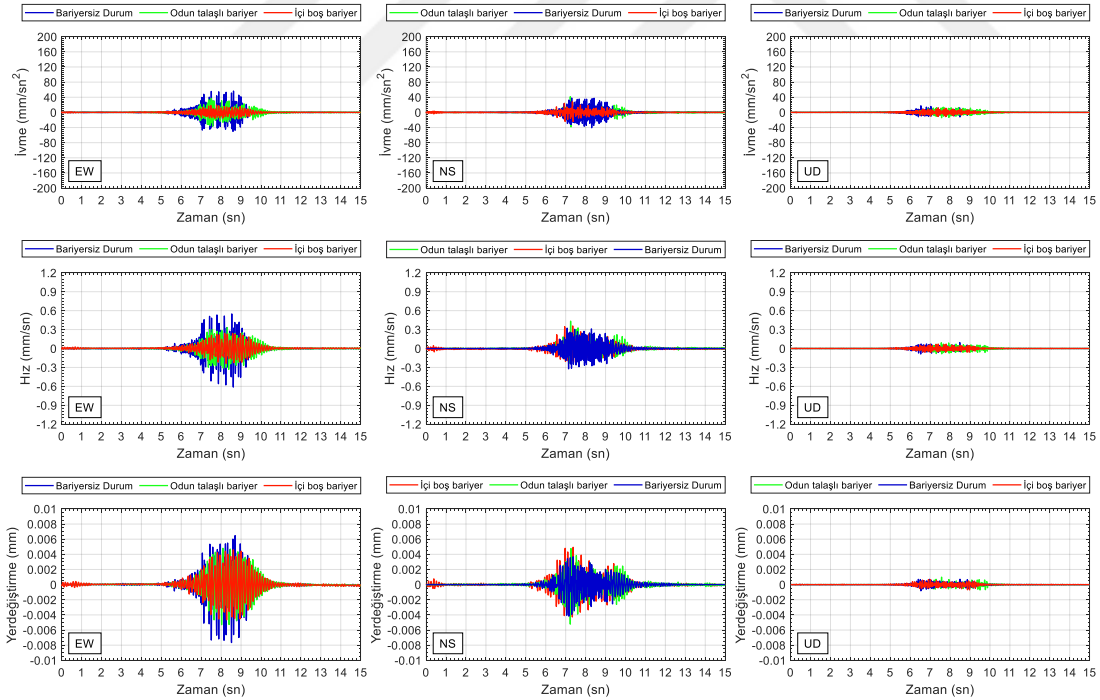


Şekil 3.45. Strafor dolgulu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Benzer şekilde kuzey- güney doğrultusu için de 40 mm/s^2 seviyelerinde kaydedilen ivme değeri 25 mm/s^2 seviyelerine düşmüş olup dolgu malzemeli bariyer ile %38 mertebelerinde yalıtım performansı elde edilmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında odun talaşlı bariyer test edilmiş ve elde edilen sonuçlar M153 ve M155 ivmeölçerleri için sırasıyla verilmiştir (Şekil 3.46-3.47). Zemin katta bulunan M153 kodlu cihazın ölçtüğü pik ivme, hız ve deplasman değerleri incelendiğinde odun talaşlı bariyerin bariyersiz duruma kıyasla titreşim genliklerini EW doğrultusunda %63 (ivme) ile %68 (hız ve yer değiştirme) arasında azalttığı; NS doğrultusunda ise bu azalma miktarının %48 ile %58 seviyelerinde değiştiği gözlenmiştir. Düşey doğrultu dikkate alındığında da genliklerde küçülmeler olduğu görülmekte ancak diğer iki bileşende olduğu kadar dikkat çekici seviyelerde olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca odun talaşlı bariyer binanın üst noktasında kaydedilen titreşim genliklerini özellikle EW ve UD doğrultularında maksimum hız bakımından sırasıyla %45 ve %90 mertebelerinde düşürmüştür (Şekil 3.47). Özellikle düşey doğrultuda kaydedilen hız değerleri çok küçük olduğu için ilgili azalma miktarını grafik üzerinden yorumlayabilmek güç olduğundan sayısal değerlere bakmakta fayda vardır.



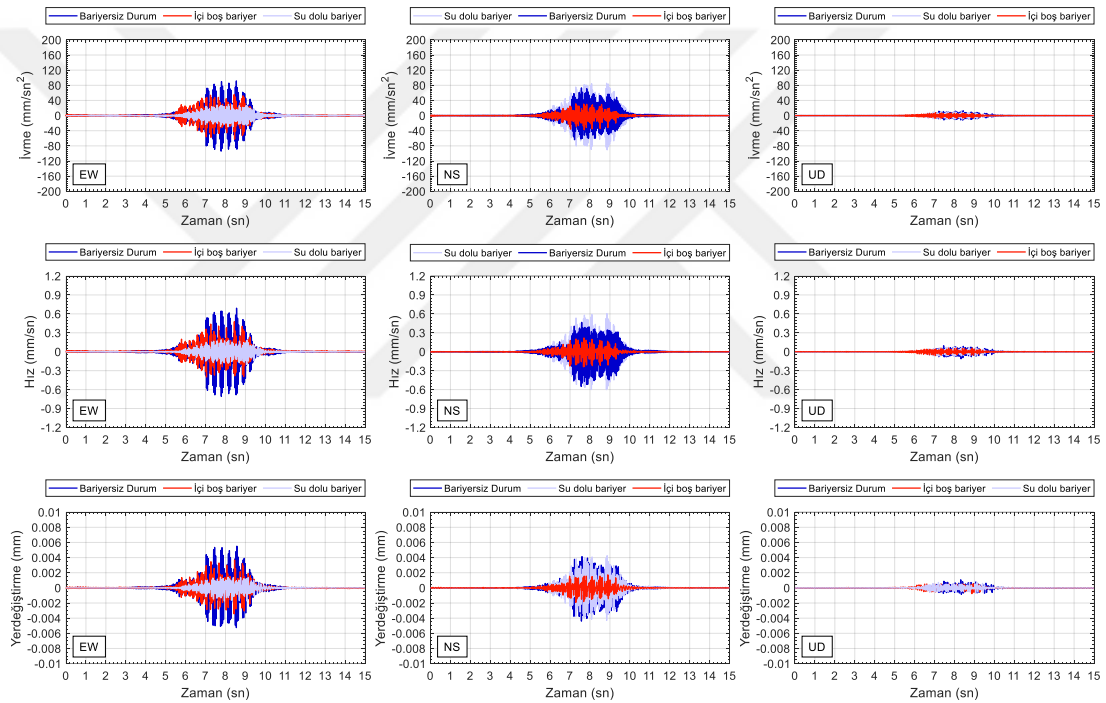
Şekil 3.46. Odun talaş dolgulu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.



Şekil 3.47. Odun talaş dolgulu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ait ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Örneğin UD doğrultusunda bariyersiz durum dikkate alınırsa 0.95 mm/s olarak kaydedilen pik hız değerinin odun talaşlı bariyer kullanılması durumunda 0.091 mm/s

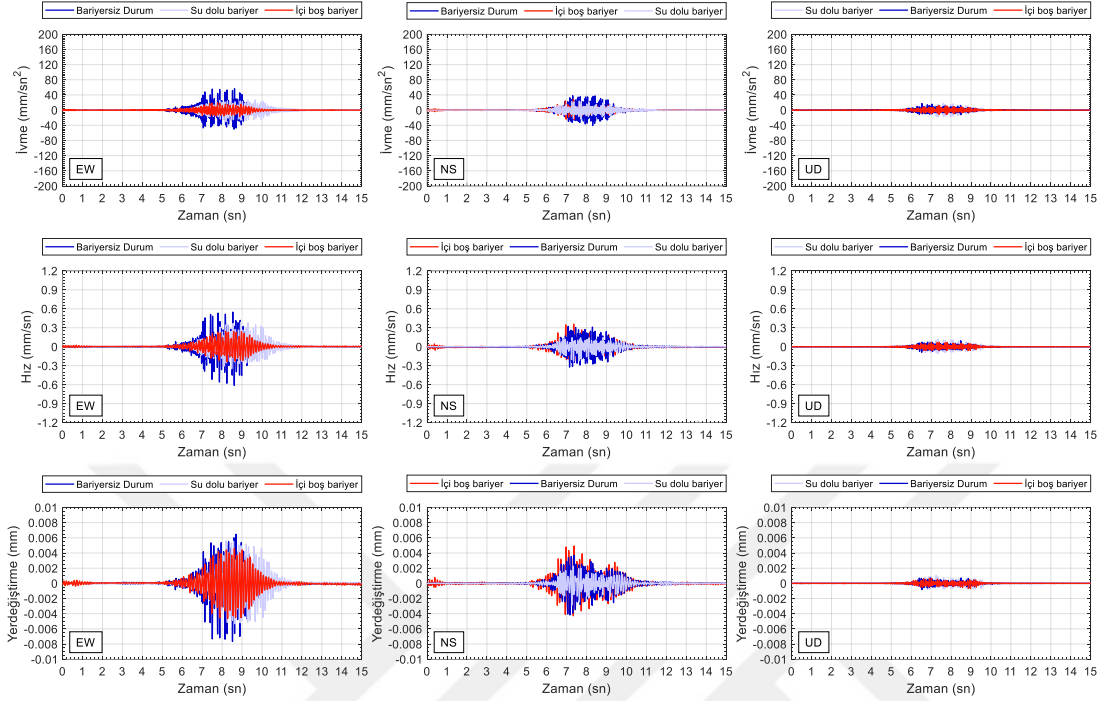
mertebelerine düştüğü görülmektedir. Dördüncü aşamada test sahasına açılan ve derinliği 2 m olan açık hendek tipi dalga bariyeri tamamen su ile doldurulmuş ve suyun titreşim genliklerine etkisi araştırılmıştır. Binanın zemin katında kayıt alan M153 ivmeölçeri ve binanın üst katında kayıt alan M155 ivmeölçerlerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri aşağıda sırasıyla gösterilmiştir (Şekil 3.48-3.49). İlk olarak M153 kodlu ivmeölçere bakılacak olursa tren hattına paralel olan EW yönünde titreşim genliklerinin %69 mertebelerinde azaldığı fark edilecektir. Örneğin bariyersiz durumda 94 mm/s² olarak kaydedilen pik yer ivmesi değeri, söz konusu bariyerin su ile doldurulmasının ardından gerçekleştirilen deneylerde 30 mm/s² düzeyine inmiştir.



Şekil 3.48. Su dolu bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

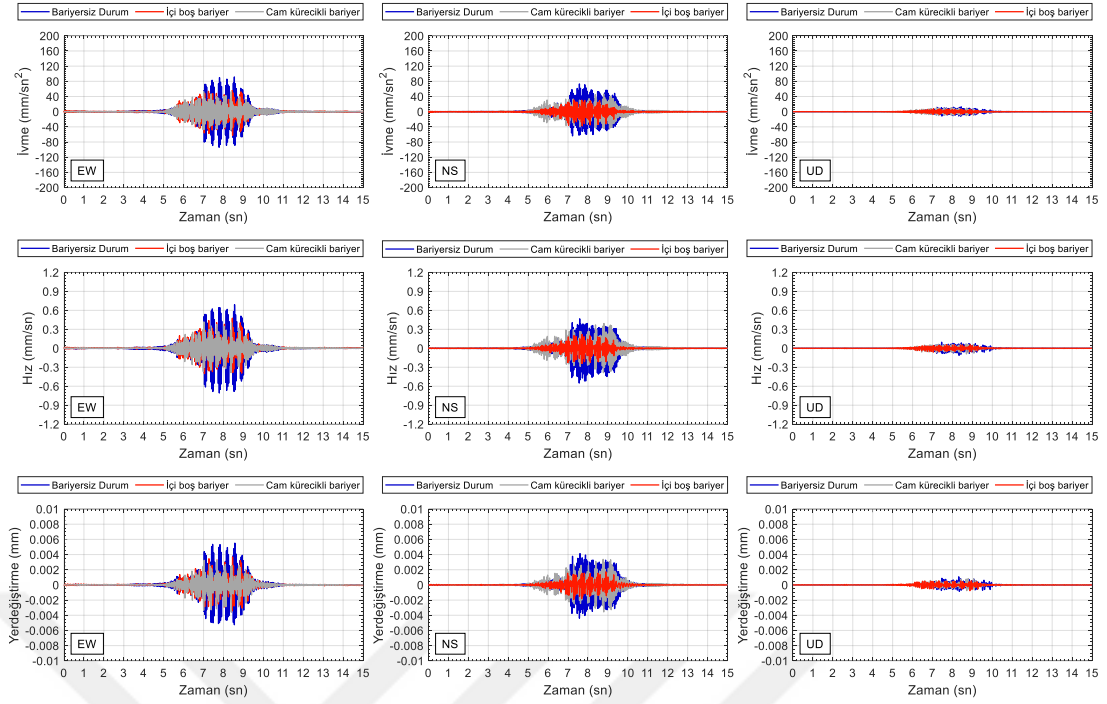
Benzer şekilde düşey doğrultuda da özellikle pik yer hızı değeri incelenecek olursa bariyersiz durumda 0.112 mm/s olan PGV değerinin su dolu bariyerli durumda 0.073 mm/s seviyelerinde olduğu ve ilgili yalıtım bariyerin bu yönde %35 katkı sağladığı gözlenmiştir. NS doğrultusunda ise su dolu bariyer titreşim genliklerini azaltmamış aksine büyümüştür. Binanın üst katına yerleştirilen M155 ivmeölçeri için sonuçlar irdelenecek olursa su dolu bariyerin genel olarak her üç doğrultuda da gerek ivme gerek hız gerekse yerdeğiştirme genliği bakımından genlikleri düşürdüğü söylenebilir. Örneğin doğu-batı doğrultusu için ivme genliklerine bakılırsa bariyersiz durumda 56.5

mm/s² olan PGA değeri 30.8 mm/s² seviyelerine gerilediği ve dolayısıyla su dolu bariyerin bina üst katı için yaklaşık %46 düzeyinde katkı sağladığı görülmektedir.

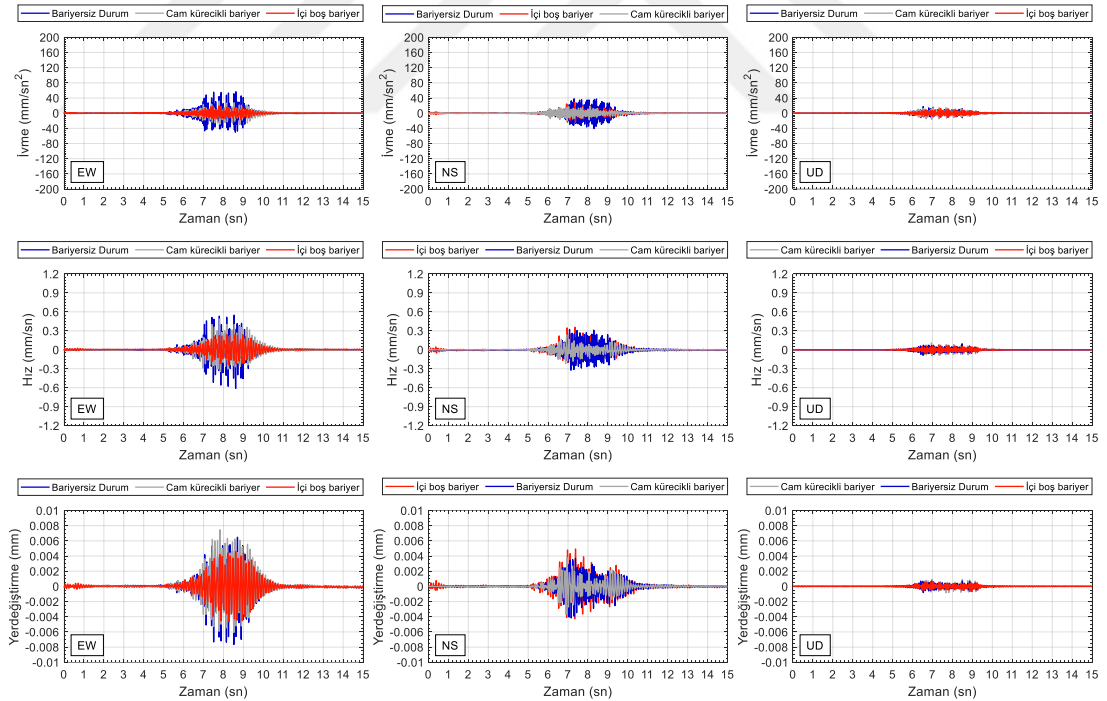


Şekil 3.49. Su dolu bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Son olarak cam kürecik dolgu malzemesi için, söz konusu hafif malzemenin dalga yalıtım performansına etkisinin binanın zemin ve üst katları için araştırıldığı bu bölümde elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri Şekil 3.50’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde bina zemin katı için özellikle EW doğrultusunda cam kürecik dolu bariyerin bariyersiz duruma kıyasla genlikleri yaklaşık %40 civarında azalttığı söylenebilir. M155 kodlu ivmeölçerin kaydettiği veriler incelendiğinde cam kürecik dolu bariyerin özellikle ivme bakımından NS bileşeninde oldukça etkili olduğu ve dalga yalıtım performansını bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %51 iyileştirdiği ve böylelikle dalga bariyersiz durumda 40.6 mm/s² ölçülen pik yer ivmesi değeri 19.7 mm/s²’e düştüğü görülmüştür.



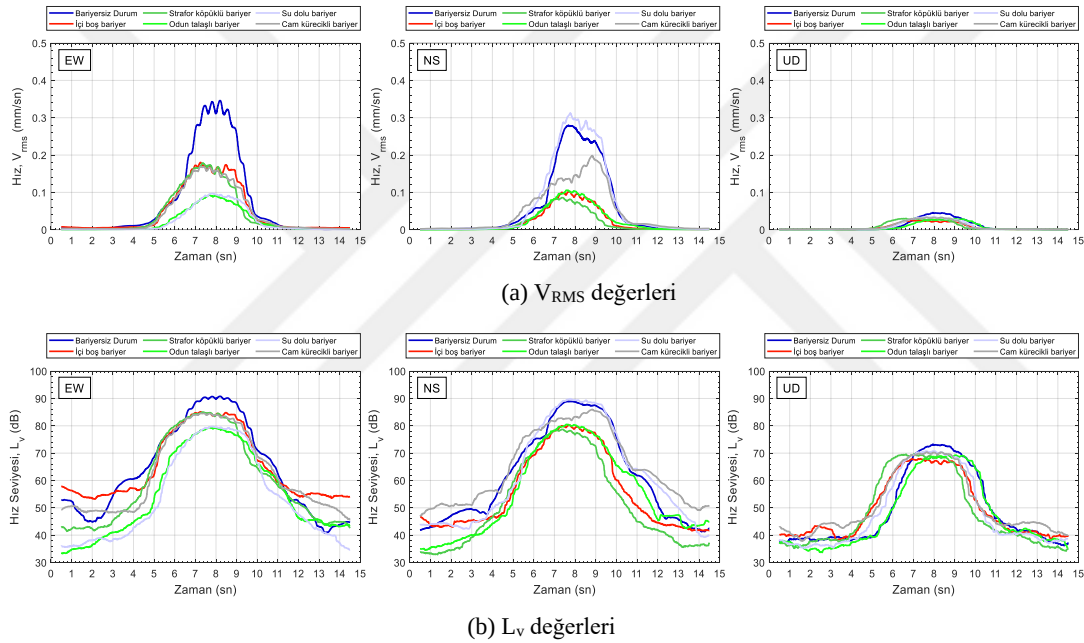
Şekil 3.50. Cam kürecik dolgulı bariyer için M153 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.



Şekil 3.51. Cam kürecik dolgulı bariyer için M155 ivmeölçerinden elde edilen ivme, hız ve yerdeğiştirme-zaman ilişkileri.

Yüksek hızlı demiryolu güzergâhının yakınındaki test binasının önüne açılan gaz beton duvarlı hendek tipi pasif dalga bariyer modelinde kullanılan iç dolgu malzemesinin yer hareketi dalgalarını iletme ve yansıtma kapasitesini veya titreşim

enerjisi soğurma performansını insan algısı ve hassas cihazların çalışmasına etkisi açısından daha anlaşılabilir ve birbiriyle kolay kıyaslanabilir bir şekilde gösterebilmek için, bariyerin önüne ve arkasına ardışık olarak serbest zemin üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerden kaydedilen yüzey titreşim hareketleri V_{RMS} (Hızın kuadratik ortalaması) ve L_v (Hız seviyesi) olmak üzere iki farklı değerlendirme ölçütüyle ele alınmıştır. Bina içi titreşim sinyallerinden elde edilen partikül hız verilerine ortalama karekök (RMS) yaklaşımıyla genlik dönüşümü uygulanarak değişimin artı ve eksi yönde olduğu dalgalar sıfır sınır çizgisinin üzerine taşınmıştır ve ilgili ölçüm noktasının her bir yumuşatılmış titreşim genliklerinden V_{RMS} zaman geçmiş eğrileri her bir titreşim doğrultusu için elde edilmiştir (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. M153 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.

Ayrıca Tablo 3.11’de maksimum yumuşatılmış hız genliği (V_{RMS}) ile bu değere karşı gelen hız etki seviyeleri (L_v) titreşim yalıtım davranışı test edilen tüm dalga bariyer modelleri için ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 3.11. Tüm bariyer tipleri için M153 kodlu ivmeölçerden elde edilen V_{RMS} ve L_v değerleri.

İvmeölçer	Bariyer Tipi	Doğrultu	Hız, V_{RMS} (mm/s)	Hız Seviyesi, L_v (dB)
M153	Bariyersiz Durum	EW	0.346	90.8
		NS	0.280	88.9
		UD	0.046	73.2
	İçi Boş Bariyerli Durum	EW	0.180	85.1
		NS	0.102	80.2
		UD	0.025	68.0
	Strafor Köpüklü Bariyer	EW	0.178	85.0
		NS	0.086	78.7
		UD	0.030	69.7
	Odun Talaşlı Bariyer	EW	0.093	79.3
		NS	0.106	80.5
		UD	0.029	69.3
	Su Dolu Bariyer	EW	0.097	79.8
		NS	0.313	89.9
		UD	0.035	70.8
	Cam Kürecikli Bariyer	EW	0.169	84.6
		NS	0.199	86.0
		UD	0.033	70.4

Bariyerde kullanılan dolgu malzemelerinin bina zemin titreşimlerine etkisi M153 kodlu ivmeölçerden elde edilen maksimum hız genliklerine ($\max V_{RMS}$) göre değerlendirildiğinde;

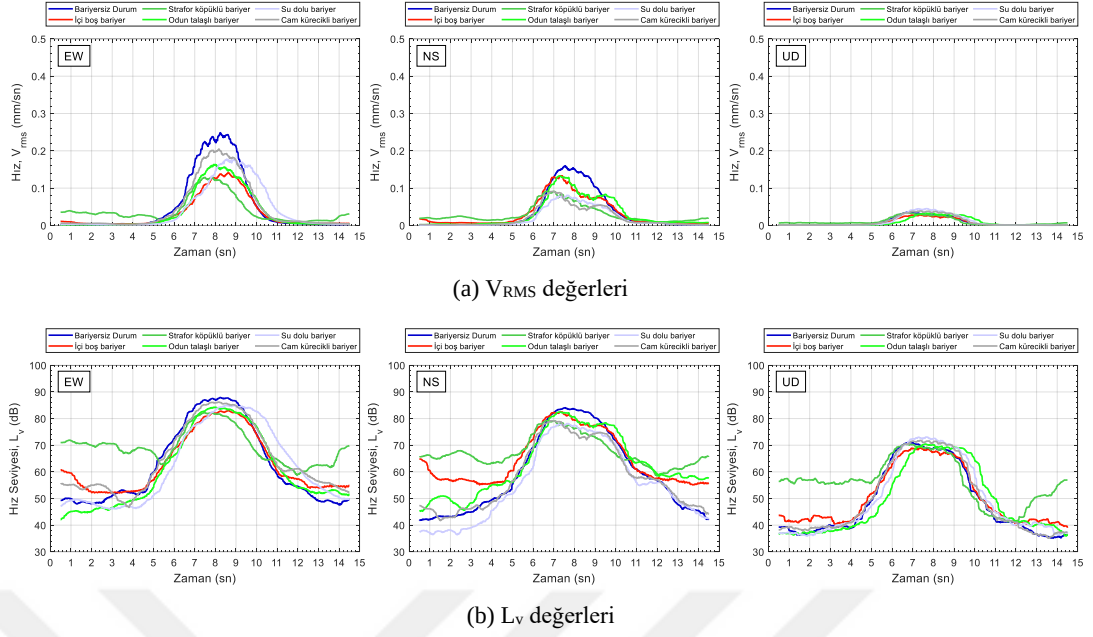
- İçi boş gaz beton duvarlı bariyer uygulamasıyla doğu-batı yayılma doğrultusundaki titreşim genliklerinde %50 civarında bir yalıtım sağlanmıştır. Bariyer için test edilen tüm dolgu malzemeleri titreşim genliklerinin azaltılmasında %50'in üzerinde bir katkı vermiştir. İçi odun talaşlı ve su dolu dalga bariyer uygulamalarıyla hız genliklerinde %70'in üzerinde oldukça büyük bir yalıtım performansı elde edilmiştir.
- Kuzey-güney titreşim yayılma doğrultusunda ise bariyerli yalıtımda kullanılan su haricindeki tüm iç dolgu malzemeleri dalgaların genliklerini bariyerin arkasındaki bina zemininde %30 ile %70 arasında küçültmüştür. Strafor köpüklü dolgu malzemesiyle yapılan yalıtım uygulamasında bariyersiz sahaya göre hız genliklerindeki azalma %70'e ulaşarak dalga iletkenliği diğer test edilen malzemelere göre daha az olmuştur. Bu uygulamayla boş bariyer durumuna göre %5'e varan bir yalıtım kazancı elde edilmiştir.
- Düşey doğrultudaki titreşim kayıtları doğal saha koşullarında yapılan ölçümlerle karşılaştırılarak incelendiğinde, bina zeminindeki titreşim genliklerinin boş

bariyer modeliyle %45 azalarak en büyük yalıtımın bu şekildeki uygulamayla sağlandığı tespit edilmiştir. Titreşim genliklerini %30 civarında küçülterek en düşük yalıtım performansını cam kürecik dolgu malzemeli bariyer uygulaması göstermiştir.

Aynı ivmeölçerden elde edilen titreşim kayıtları bariyersiz ve bariyerli durumun farklı dolgu malzemeli uygulamaları için desibel cinsinden hız seviyeleri karşılaştırıldığında,

- İçi boş bariyer ile bina zemininin doğu-batı doğrultusundaki titreşimlerinde 5.7 desibellik yalıtım sağlanmıştır. Odun talaşının bariyerde dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda hız seviyesindeki 11.5 desibellik azalmayla en büyük yalıtım performansı elde edilmiştir. Deneylerde su dolu bariyer uygulamasının 11 desibellik gösterdiği yalıtım performansı da dikkat çekicidir.
- Kuzey-güney doğrultusunda yayılan titreşimlerin hız seviyelerini 10.2 desibel azaltarak en büyük yalıtım performansını strafor köpüklü dalga bariyer modeli göstermiştir. Bu malzeme sayesinde boş bariyer durumuna göre 1.5 desibellik bir yalıtım kazancı elde edilmiştir. Su dolu bariyer modeliyle bir yalıtım elde edilemediği görülmektedir. Bu yayılım doğrultusunda basınç dalgalarının su kütlesinden geçmesinden dolayı titreşim genlikleri beklenilenin aksine bina zemininde büyümüştür.
- Bina zemininin düşey doğrultudaki titreşimlerinde en büyük yalıtım performansını 5.2 desibellik değişim ile içi boş bariyer uygulaması göstermiştir. Diğer dolgu malzemeleri ölçüm noktasının hız seviyelerini 2.5 desibel ile 4 desibel arasında azaltmıştır.

Seçilen dolgu malzemelerinin bina üst katındaki titreşimlere etkisi M155 kodlu ivmeölçerden elde edilen maksimum hız genlikleri ($\text{maks}V_{\text{RMS}}$) açısından bariyersiz saha durumunda kaydedilen verilerle karşılaştırıldığında (Şekil 3.53a),



Şekil 3.53. M155 kodlu ivmeölçere ait V_{RMS} ve L_v değerlerinin tüm bariyer tipleri için karşılaştırılması.

Tablo 3.12. Tüm bariyer tipleri için M155 kodlu ivmeölçerden elde edilen V_{RMS} ve L_v değerleri.

İvmeölçer	Bariyer Tipi	Doğrultu	Hız, V_{RMS} (mm/s)	Hız Seviyesi, L_v (dB)
M155	Bariyersiz Durum	EW	0.248	87.9
		NS	0.160	84.1
		UD	0.036	71.1
	İçi Boş Bariyerli Durum	EW	0.141	83.0
		NS	0.133	82.5
		UD	0.028	69.0
	Strafor Köpüklü Bariyer	EW	0.129	82.2
		NS	0.091	79.2
		UD	0.033	70.4
	Odun Talaşlı Bariyer	EW	0.164	84.3
		NS	0.133	82.5
		UD	0.033	70.4
	Su Dolu Bariyer	EW	0.178	85.0
		NS	0.081	78.1
		UD	0.045	73.1
	Cam Kürecikli Bariyer	EW	0.205	86.2
		NS	0.091	79.2
		UD	0.039	71.8

- Yalıtımda kullanılan tüm iç dolgu malzemeleri dalgaların doğu-batı yayılma doğrultusundaki genliklerini bina üst katında yaklaşık olarak %15 ile %50 arasında küçültmüştür. İçi boş gaz beton duvarlı bariyer uygulamasıyla titreşim genliklerinde %45 civarında bir yalıtım sağlanmıştır. Strafor köpük malzemeli dalga bariyer

uygulamalarıyla boş bariyer durumuna göre %5'e varan bir yalıtım kazancı elde edilmiştir.

- Kuzey-güney titreşim doğrultusunda ise bariyer içinde kullanılan su ve strafor köpük hız genliklerini yaklaşık olarak %50 düşürerek tüm bariyer uygulamaları içerisinde yalıtımda en büyük performansı göstermişlerdir. Bu malzemelerin dolgu olarak kullanılması boş bariyer uygulamasıyla yapılan yalıtım etkisini en az %30 artırmıştır.

- Bina üst katında düşey doğrultudaki titreşim kayıtları bariyersiz saha koşullarındaki ölçüm verileri ile karşılaştırıldığında en büyük yalıtımın boş bariyer uygulamasıyla genlikleri yaklaşık olarak %20 küçülterek sağlandığı görülmektedir. Titreşim genliklerini %10 civarında küçülterek en düşük yalıtım performansını strafor köpük ve odun talaşı malzemelerinin kullanıldığı bariyer uygulamaları göstermiştir. Su ve cam kürecik dolgulu bariyerler bina üst kat titreşimlerini aksine büyötmüştür.

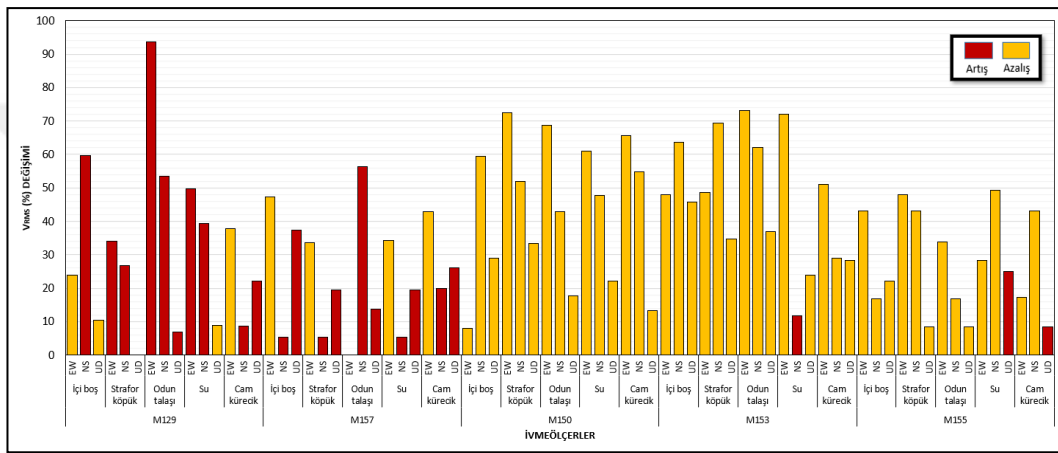
Aynı ivmeölçerden elde edilen titreşim kayıtları bariyersiz ve bariyerli durumun farklı dolgu malzemeli uygulamaları için desibel cinsinden hız seviyeleri incelendiğinde (Şekil 3.53b),

- İçi boş bariyer ile bina zemininin doğu-batı doğrultusundaki titreşimlerinde 4.9 desibellik yalıtım sağlanmıştır. Strafor köpük malzemeli dalga bariyer uygulamalarıyla boş bariyer durumuna göre 0.8 desibellik bir yalıtım kazancı elde edilmiştir.

- Kuzey-güney doğrultusunda yayılan titreşimlerin hız seviyelerini 6 desibel düşürerek en büyük yalıtım performansını içi su dolu dalga bariyer modeli göstermiştir. Bu malzeme sayesinde boş bariyer durumuna göre 4.4 desibellik bir yalıtım kazancı elde edilmiştir. Cam kürecik ve strafor köpüklü malzemeli bariyer uygulamaları ile de kat döşemesi titreşimlerinde 4.9 desibele varan bir yalıtım performansı elde edilmiştir.

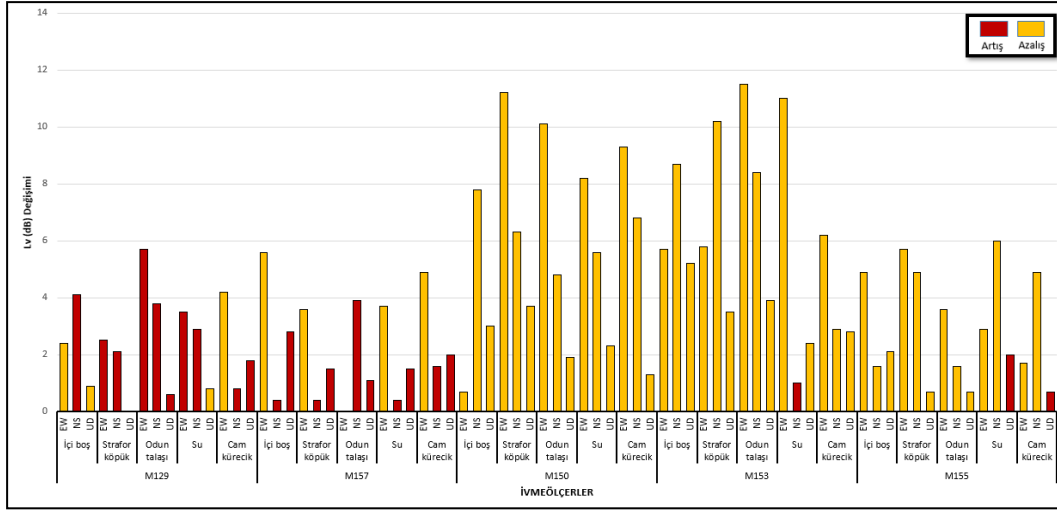
- Bina katının düşey doğrultudaki titreşimlerinde en büyük yalıtım performansını 2.1 desibellik değişim ile içi boş bariyer uygulaması göstermiştir. Strafor köpük ve odun talaşı ölçüm noktasının hız seviyelerini 0.7 desibel azaltmıştır. Su ve cam kürecik dolgulu bariyerler bina üst kat titreşimlerini sırasıyla 2 ve 0.7 desibel büyötmüştür. Hızlı tren kaynaklı geçişlerin yakın çevrede üretmiş olduğu en elverişsiz titreşimler bariyersiz ve bariyerli saha koşullarına göre karşılaştırılarak nihai

bir değerlendirme yapıldığında, bariyer arkasında bina üst katında seçilmiş bir ölçüm noktasında insan algısı ve hassas cihazlara etkisi açısından en iyi titreşim yalıtım performansı hız seviyesinde yaklaşık olarak 7.5 desibellik bir değişime neden olan strafor köpüklü dalga bariyer modeli göstermiştir. Gaz beton duvarlı dalga bariyer modeli mevcut durumuyla yani içi boş olarak kullanılmasıyla 5.5 desibellik bir titreşim yalıtımı sağlanmıştır. Bariyer için su ile doldurulmasıyla boş dalga bariyer uygulamasına göre yalıtımda 1.1 desibellik ilave bir kazanç elde edilmiştir. Üst kat titreşimlerinin yalıtımında su ve cam kürecik dolgu malzemesinin etkili olmadığı da dikkate alınmalıdır.



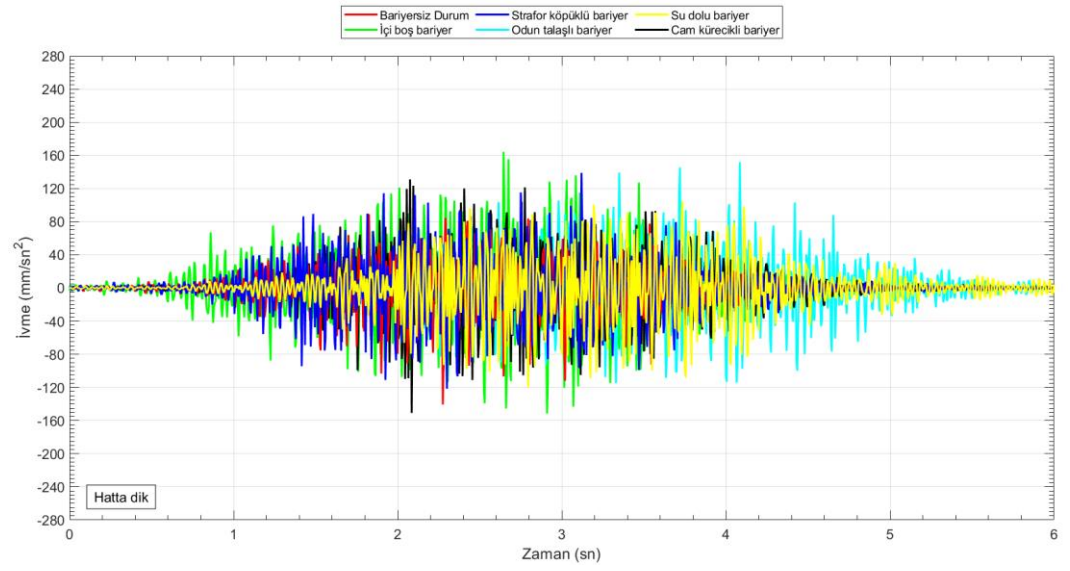
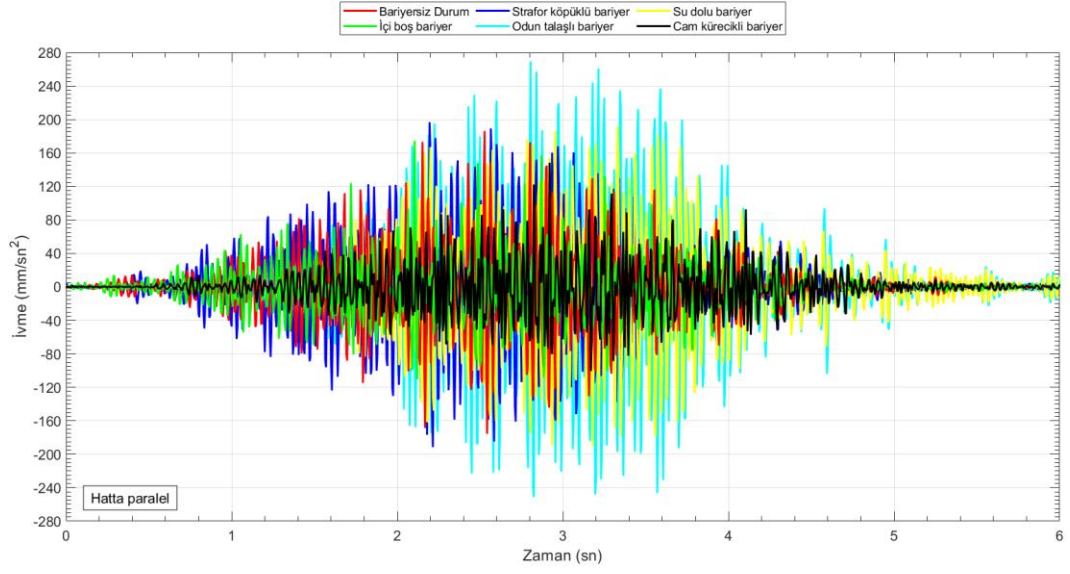
Şekil 3.54. Bina üzerindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için maksV_{RMS} değerlerinin (%) değişimi.

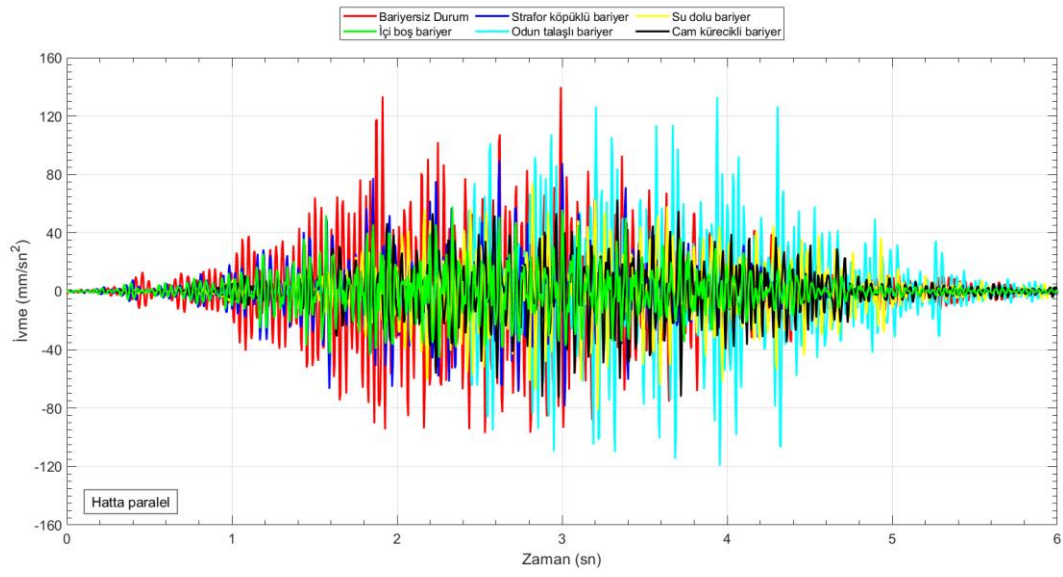
Yukarıda M153 ve M155 ivmeölçerleri için ayrı ayrı maddeler halinde sunulan değerlendirmelerin daha bütüncül bir şekilde gösterilebilmesi adına bariyerli saha durumlarında yumuşatılmış hız-zaman ilişkisi eğrilerinden elde edilen maksimum tepe noktaları (maksV_{RMS}) değerlerinin bariyersiz saha durumuna göre yüzdelik değişimleri ve bu pik değerlere karşı gelen desibel cinsinden hız seviyeleri L_v değerlerinin değişimi her bir titreşim doğrultusu için görselleştirilmiştir (Şekil 3.54-3.55).



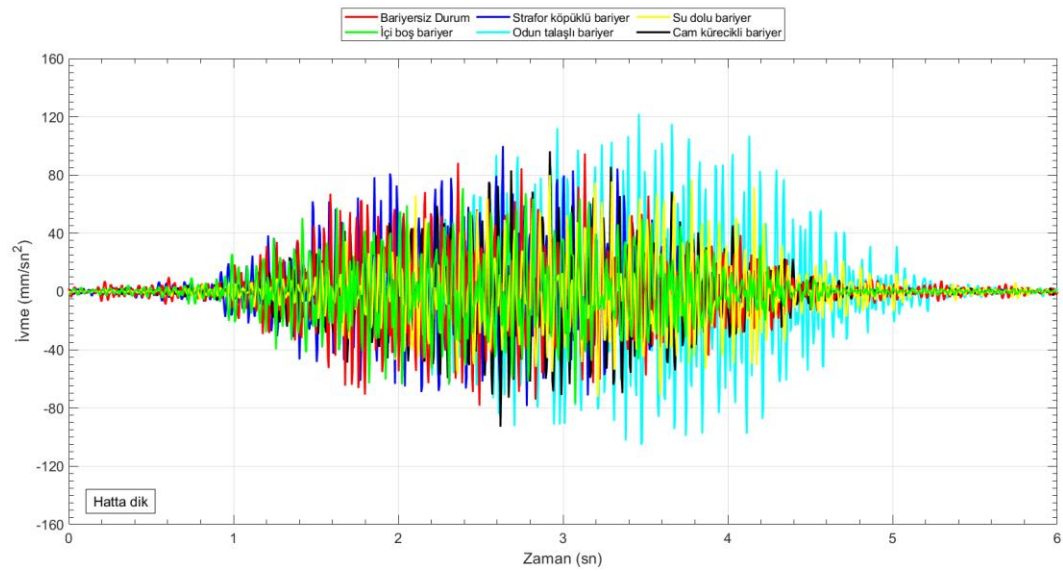
Şekil 3.55. Bina üzerindeki ölçüm noktalarında farklı dolgu malzemeleri için L_v (dB) değerlerinin (%) değişimi.

Ayrıca tüm dolgu malzemelerini bariyersiz durum senaryosu ile karşılaştırabilmek adına bariyer önündeki (M129 ve M157) ve arkasındaki (M150, M153 ve M155) cihazlar için ivme-zaman ilişkileri Şekil 3.56-3.65’de tren hattına paralel ve tren hattına dik doğrultular dikkate alınarak gösterilmiştir. Düşey doğrultuda kaydedilen titreşimler yatay doğrultulara göre çok küçük mertebelerde olduğundan burada sunmaya gerek görülmemiştir. Özellikle bariyer arkasında bulunan M150, M153 ve M155 cihazlarının kaydettiği titreşimler incelendiğinde bariyersiz duruma kıyasla tüm dolgu malzemelerinin ivme genliklerini farklı oranlarda azalttığını söylemek mümkündür.

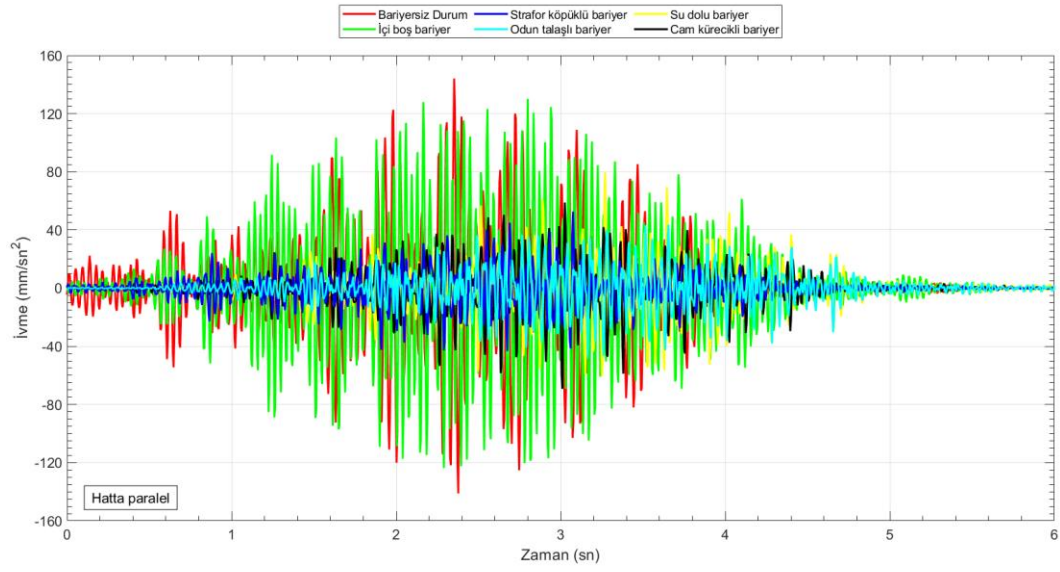




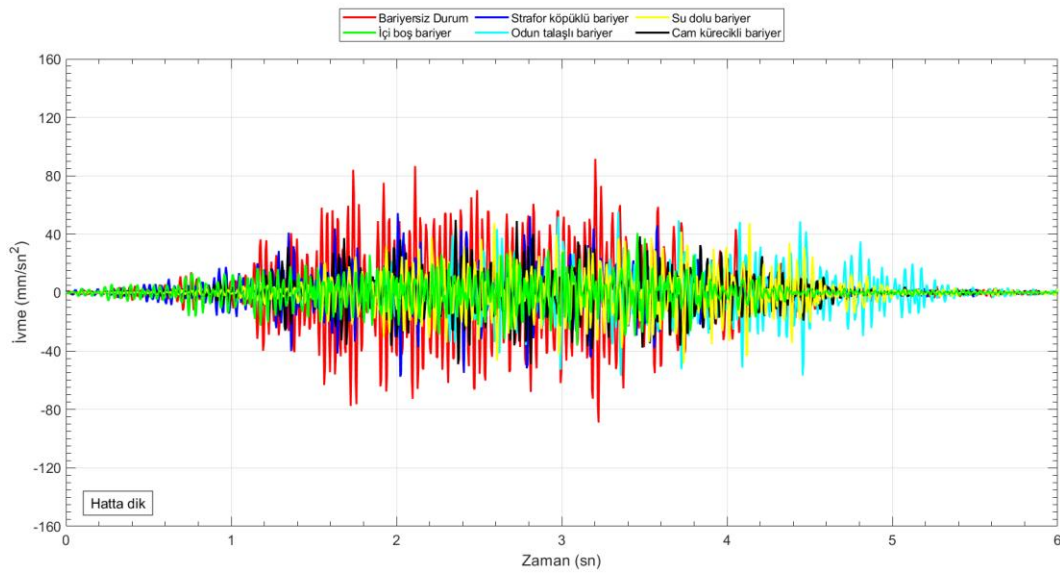
Şekil 3.58. M157 ivmeölçeri için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



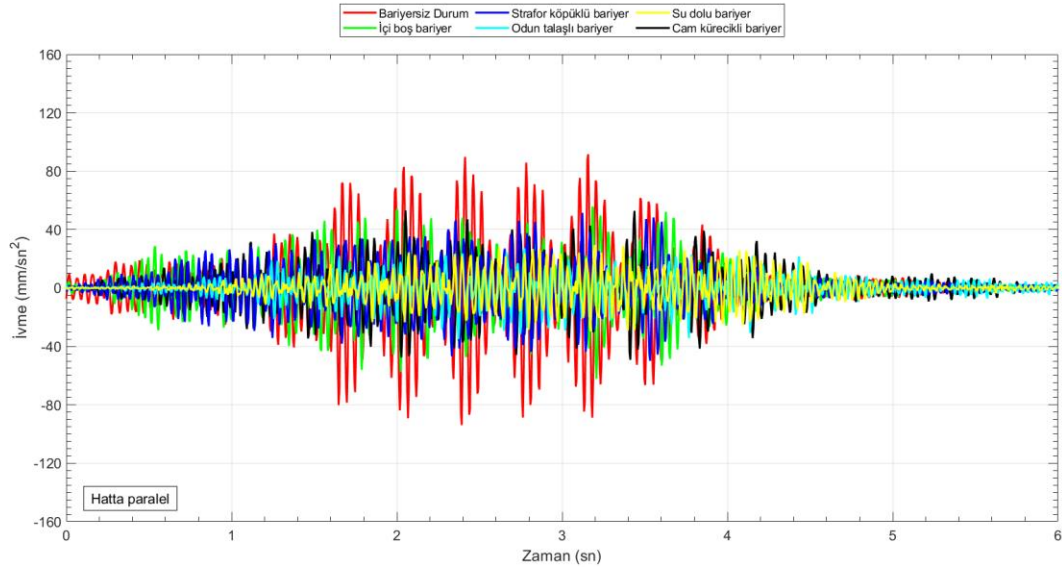
Şekil 3.59. M157 ivmeölçeri için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



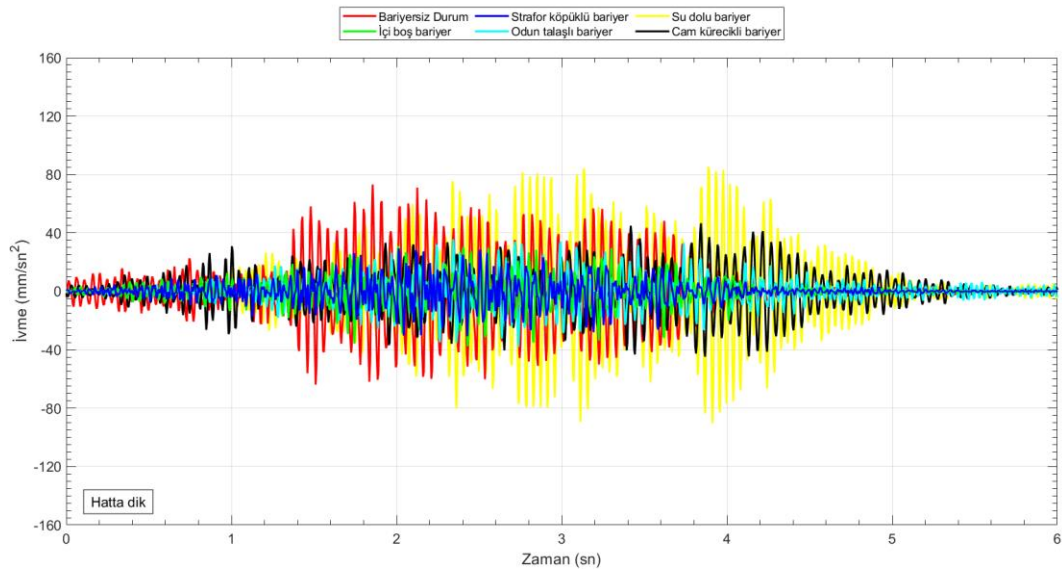
Şekil 3.60. M150 ivmeölçeri (bariyer arkası serbest zemin) için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



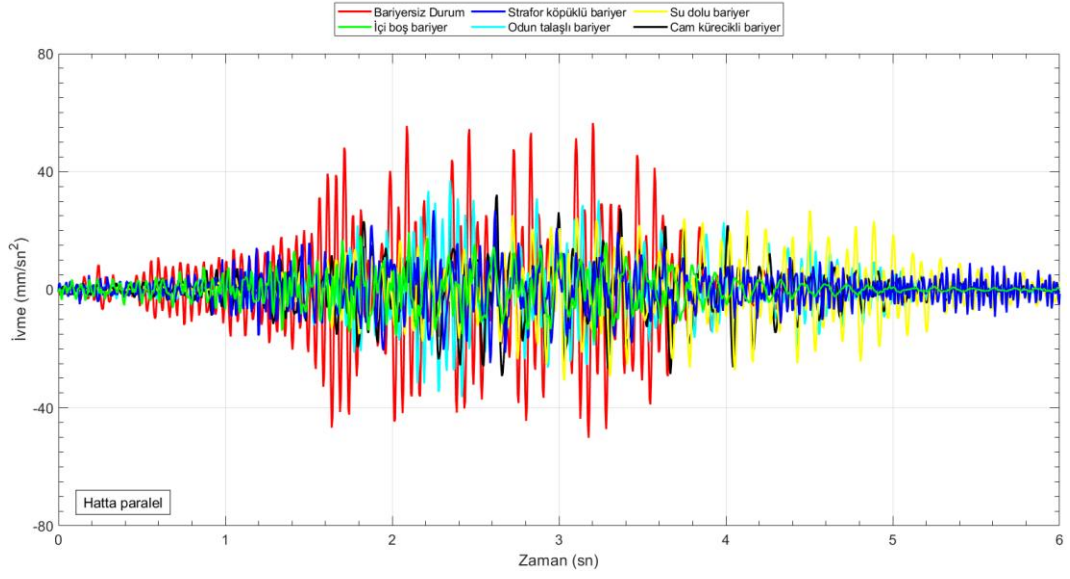
Şekil 3.61. M150 ivmeölçeri (bariyer arkası serbest zemin) için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



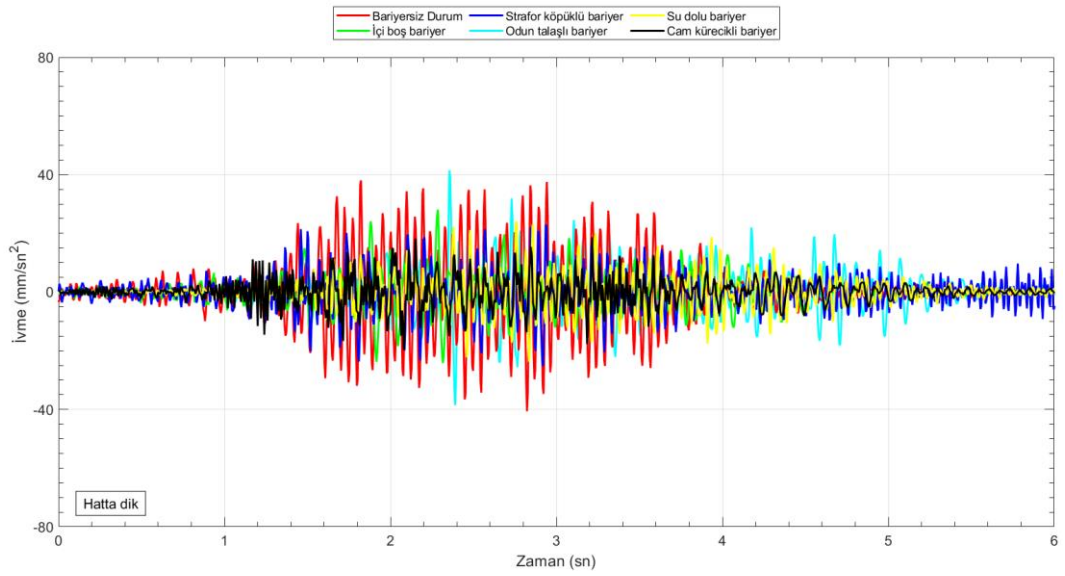
Şekil 3.62. M153 ivmeölçeri (bina zemin katı) için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.63. M153 ivmeölçeri (bina zemin katı) için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.64. M155 ivmeölçeri (bina üst katı) için tren hattına paralel doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.65. M155 ivmeölçeri (bina üst katı) için tren hattına dik doğrultuda ivme-zaman ilişkilerinin karşılaştırılması



4. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİ KAYNAKLI ÇEVRESEL TİTREŞİM PROBLEMİNİN PLAXIS 3D SONLU ELEMANLAR YAZILIMI İLE MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar yönteminin karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yararlı ve etkili bir yaklaşım olduğu mevcut birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. Söz konusu problemlerin basite indirgenerek çözümlenmeye çalışıldığı sayısal metot özellikle deneysel olarak test edilmesi zor mühendislik problemlerinin analiz edilmesinde kendisine ciddi bir yer bulmuştur. Gelişen teknolojinin beraberinde getirdiği yüksek performanslı bilgisayarlar ilgili sayısal yöntemin uygulanmasını kolaylaştırmış ve bunun için farklı disiplinlerden farklı türde mühendislik problemlerini ele almak için çok sayıda paket program geliştirilmiştir. Bu araştırma kapsamında kullanılan PLAXIS adlı yazılım da sonlu elemanlar yöntemine dayalı programlardan bir tanesidir. Özellikle geoteknik problemlerin analizinde başarısını gösteren bu yazılım aracılığıyla ray, travers, balast ve zemin ortamını içeren çok katmanlı bir kompozit demiryolu hattı-zemin sisteminin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve PLAXIS 3D Ultimate versiyonu ile sayısal olarak simüle edilmiştir. Yazılımın bu versiyonu, geçmiş sürümlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Kullanıcı arayüzü, PLAXIS 3D ile uyumlu olacak şekilde dizayn edilmiş ve önceki sürümlere kıyasla modellemeyi daha kolay hale getiren birkaç yeni modül eklenmiştir. Yapı-zemin sonlu sistemin modellenmesinde doğruluk, sistemi oluşturan tüm bileşenlerin (hızlı tren, demiryolu platformu ve zemin ortamı) gerçekçi bir şekilde idealize edilmesi ile mümkündür. Bu sebeple model oluşturulurken problem, tüme varan bir bakış açısıyla ele alınmış ve modelin kurgulanması adım adım gerçekleştirilmiştir. İlk etapta test sahasında serbest zeminde demiryolu platformuna dik doğrultuda sistematik olarak seçilmiş ölçüm noktalarından alınan titreşim kayıtları kullanılarak 3-D sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Bu yaklaşım mühendislik pratiğine uygun bir dalga bariyer modelinin belirlenmesi için kapsamlı parametrik araştırmaların referans deneysel sonuçlar gözetiminde yapılmasına imkân sağlamış ve bu bağlamda çalışmanın ikinci aşamasında doğrulanmış zemin modeline deneysel çalışmalarla örtüşecek şekilde bir titreşim yalıtım bariyeri eklenmiştir. Söz konusu bariyerin özellikleri, saha çalışmalarında kullanılan gaz beton cidarlı açık hendek tipi yalıtım

sistemini temsil edecek şekilde tanımlanmış ve hendekli modelin doğrulanması için saha verileri dikkate alınmıştır.

4.1. Zemin Ortamı ve Demiryolu Üstyapısının Sayısal Modeli ve Etkili Parametreler

Uygun zemin davranış modelinin seçimi, ortam özelliklerinin dalga yayılım problemlerinde yüksek bir etkiye sahip olması nedeniyle önemlidir. Zemin dinamik analizi için genellikle iki tip model kullanılır. Bunlar elastik malzeme (doğrusal ve doğrusal olmayan) modeli ve elasto-plastik malzeme modelleridir. Karmaşık bir zemin modeli için modeli uygun şekilde inşa ve kalibre etmek çok daha fazla hesaplama gücü, zemin özellikleri bilgisi ve zaman gerektirir. Tren kaynaklı titreşim esas olarak zemin yüzeyi boyunca yayıldığından ve zemin ortamında meydana getirdiği deformasyonlar elastik bölgede kaldığından bu çalışmada zemin modeli homojen ve doğrusal elastik olarak basitleştirilmiştir. Lineer elastik modelin kullanımı, zemin ortamında tren geçişi tarafından üretilen dinamik dalganın neden olduğu nispeten küçük deformasyonlardan kaynaklanmaktadır. Bu model yaklaşımında, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu yani gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineer olduğu tanımlanmaktadır. Oluşturulan sayısal modelde, modelin doğrulanmasında Tablo 4.1'deki zemin özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Zemin malzeme özellikleri.

Parametre	Birim	Gevşek zemin
Yoğunluk (γ)	kg/m ³	1730
Elastisite Modülü (E)	kg/m ²	7810000
Kayma Modülü (G)	kg/m ²	2720000
Poisson Oranı (ν)	-	0.439

Ayrıca demiryolu üst yapısı için modellemede kullanılan bazı parametreler Tablo 4.2 ve 4.3'de sunulmuştur (Fu ve Zheng, 2014; Moormann ve ark, 2016).

Tablo 4.2. Sayısal modelde demiryolu platformu için malzeme özellikleri.

Parametre	Birim	Balast	Dolgu Tabakası
Birim hacim ağırlık	kN/m ³	20	21
Elastisite modülü	kN/m ²	195x10 ³	209x10 ³
Kayma modülü	kN/m ²	75x10 ³	77.5x10 ³
Poisson oranı	v	0.3	0.35
Rayleigh α	-	6	4
Rayleigh β	-	0.75x10 ⁻³	0.5.10 ⁻³

Tablo 4.3. Sayısal modelde kullanılan ray mekanik özellikleri

Parametre	Birim	Ray
Kesit alanı (A)	m ²	7.7x10 ⁻³
Birim ağırlık	kN/m ³	78
Elastisite modülü	kN/m ²	200x10 ⁶
Atalet momenti (I _x)	m ⁴	3.05x10 ⁻³
Atalet momenti (I _z)	m ⁴	5.13x10 ⁻³

Sayısal modelde kurulan hızlı tren platformu-zemin ortamının malzeme özellikleri Tablo 4.1-4.3’de verilen değerler kullanılarak model doğrulamasındaki dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmalar (Seed ve ark, 1986; Vucetic ve Dobry, 1991), tren titreşimlerinin oldukça küçük deformasyonlara sebep olduğu zemin ortamında çok düşük mertebede sönümün meydana geldiğini göstermektedir. Bu sebeple çalışma kapsamında, malzeme sönümü Rayleigh sönümü açısından ele alınmış ve dinamik analizlerde bu oran (ξ) % 0.3 olarak seçilmiştir. Dinamik analizin ana hedefi, zemin ortamında dalgaların doğru bir şekilde yayılmasını simüle etmektir. Bu simülasyon sürecinde, sonsuza doğru devam eden zemin ortamının sayısal olarak modellenmesi için önemli bir adım, ayırıştırıcıdır. Model boyutlarının ve sınır koşullarının doğru bir şekilde tanımlanması, karmaşıklığı azaltmak ve analiz süreçlerini optimize etmek için kritiktir. Dinamik yükler etkili olduğunda, genellikle kabul gören ve yaygın olarak kullanılan sınır koşulları, özel yutucu (viskoz) sınırlardır.

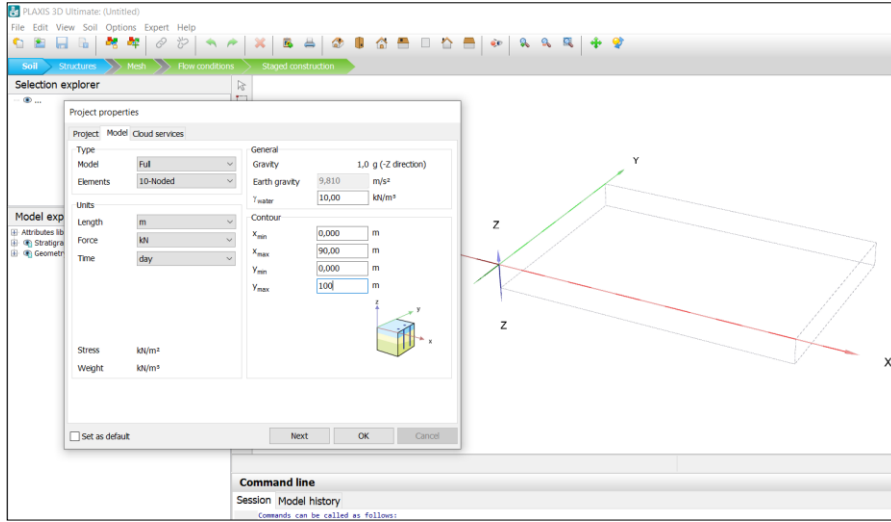
Bu sınır koşulları, dalgaların sınırlardan yansıyıp geri dönmesini ve dolayısıyla ikincil etkilerin oluşmasını engeller. Sonlu eleman uygulamalarına kolayca entegre edilebilen bu sınır koşulları zemin bölgelerinin enerji iletim özelliklerini tanımlamaya yardımcı olur. Tez çalışmasında standart ve emici (absorbent) sınırlar tanımlanmıştır. Çalışmalar, emici sınırlarla ilgili dalga gevşeme katsayılarının (relaxation coefficients) $C_1=1.0$ ve $C_2=0.25$ olarak dikkate alınmasının kenarlarda dalgaların makul derecede iyi emilmesiyle sonuçlandığını göstermiştir (Brinkgreve ve Vermeer 1998; Wang ve ark, 2009; Bose ve ark, 2018). Bu sınır şartlarının genel ifadesi Denklem 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Burada σ ve τ sırasıyla normal ve kayma gerilmelerini V_p ve V_s sırasıyla basınç ve kayma dalgası hızlarını, $\dot{u}_n$ parçacık hızını, ρ ise malzeme yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\sigma = -C_1 \rho V_p \dot{u}_n \quad (4.1)$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s \dot{u}_n \quad (4.2)$$

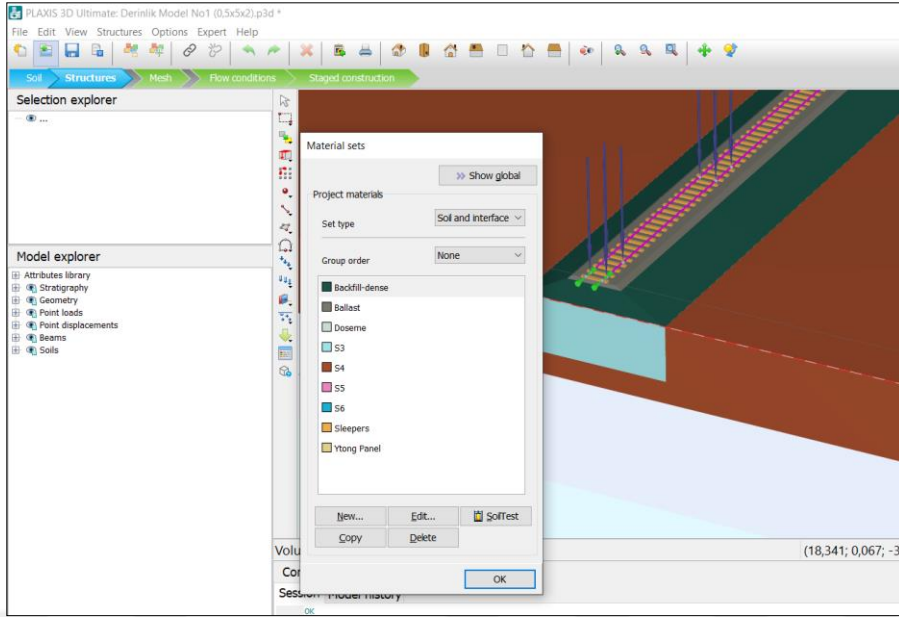
Demiryolu platformunun üzerine oturduğu dolgu tabakasının altında bulunan güçlendirilmiş zemine ait kayma dalga hızı üç boyutlu sonlu eleman problemin değişkenlerinden biri olarak düşünülmüştür. Güçlendirme yapıldığı için söz konusu bölgenin kayma dalga hızı için net bir değer söylemek mümkün olmamakla birlikte jeofizik çalışmalar gerçekleştirilen serbest zemine kıyasla daha yüksek bir kayma dalgası hız değerine sahip olacağı bilinmektedir. Bu bakış açısı bu bölgeyi modellerken bölgenin kayma dalgası hızı değerinin mühendislik öngörleriyle çelişmeyecek düzeyde değiştirilerek bir dizi analiz yapılmasına olanak sağlamıştır.

PLAXIS yazılımında modelleme yapılırken zemin üç tabakalı olacak şekilde 90 metre genişliğinde ve 100 m uzunluğunda modellenmiştir. Yazılımda yer alan “Soil” sekmesi aracılığıyla zemin kontürünün belirlenmesi için ilgili uzunluklar tanımlanarak model geometrisi oluşturulmuştur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. PLAXIS yazılımında zemin kontürünün oluşturulması.

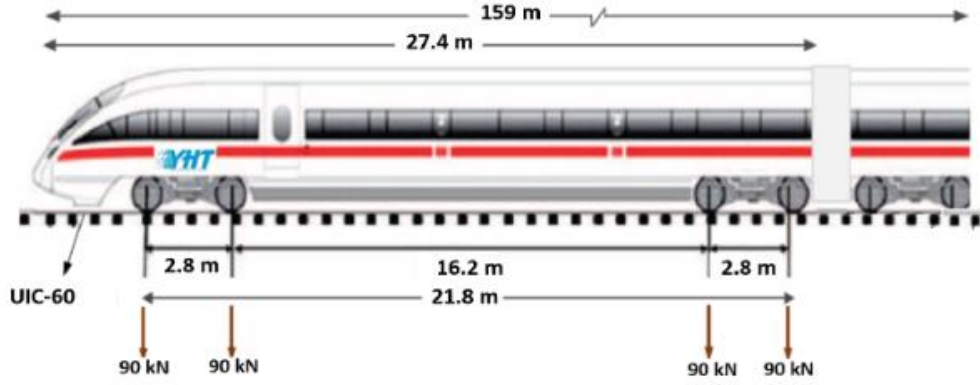
Söz konusu zemin kontürüne sırasıyla 13 m ve 10 m kalınlık tanımlanarak alttaki iki tabaka “Soil” sekmesi altında oluşturulmuştur. Daha sonra “Structures” sekmesi altındaki “Create surface” komutu ile zemin yüzeyi elde edilmiş ve bu yüzeye “Extrude object” komutu ile hacim kazandırılarak 7 m kalınlığındaki zemin üst tabakası modellenmiştir. Böylelikle toplam 30 m derinlikte ve üç tabakadan oluşan bir zemin formu elde edilmiştir. En üst tabakanın demiryolu trafiği ile doğrudan etkileşim halinde olmasından ötürü bu kısım için yazılımın “Structures” sekmesi kullanılmış ve demiryolu üst yapısı ve üst yapının etkileşim halinde olduğu zemin bu sekme altında oluşturulmuştur. Deneylerin gerçekleştirildiği arazide balast altı demiryolu yatağının yapım aşamasında güçlendirildiği bilindiğinden dolgu tabakası ve bu tabakanın oturduğu güçlendirilmiş taban zeminini temsil etmesi amacıyla zemin üst tabakasına ayrı bir hacim entegre edilmiştir. Böylelikle zemin üst tabakası ve güçlendirilmiş kısmın ayrıklaştırılması amaçlanmış ve malzeme özellikleri tanımlanırken yapılan güçlendirmenin modele dâhil edilebilmesi sağlanmıştır. Balast üstündeki traversler modellenirken ise yalnızca PLAXIS 3D Ultimate versiyonunda mevcut olan “Create array” komutundan faydalanılmıştır. “Material sets” komutu kullanılarak oluşturulan her bir hacim için malzeme tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. PLAXIS yazılımında model malzeme özelliklerinin tanımlanması.

4.2. Hızlı Tren Yükünün Modele Uyarlanması ve Simülasyonu

Mevcut çalışmada ele alınan üç boyutlu zemin sonlu eleman modeli 90 m uzunluğunda, 100 m genişliğinde ve 30 m yüksekliğinde olup üzerinde inşa edilen demiryolu hattının yapısı raylar, traversler, balast ve dolgu tabakasından oluşmaktadır. Balast, rayları ve traversleri destekleyecek şekilde zeminin üstüne yerleştirilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modelinde dikdörtgen kesitli traversler 15 cm yüksekliğinde, 30 cm genişliğinde ve 240 cm uzunluğundadır. Raylar, hat uzunluğu boyunca uzanan tek boyutlu kiriş elemanı olarak modellenmiş olup aralarındaki mesafe 1.5 m'dir. Sayısal modelin diğer tüm bileşenleri (travers, balast ve zemin ortamı) lineer elastik davranışa sahip üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman sayısal modellemesinde kullanılan tren, geometrisi ve standart dingil yükleri ile HT65000 yüksek hızlı trenidir. TCDD'nin yüksek hızlı demiryolu yolcu taşımacılığında kullandığı HT65000 YHT seti Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Yolcu vagonlarını çeken lokomotif 27.4 m uzunluğunda olup tekerlekler arası mesafe 2.8 m'dir. Yüksek hızlı tren toplamda 6 vagonla birlikte 159 m uzunluğa ulaşarak yüksek hızda hareket eden ağır bir kütleye dönüşmekte olup 4 dingilli lokomotif setinin ağırlığı yaklaşık olarak 720 kN olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir tekerlek 90 kN'luk bir kuvvetle etki etmektedir. Yüksek hızlı trenin özellikleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

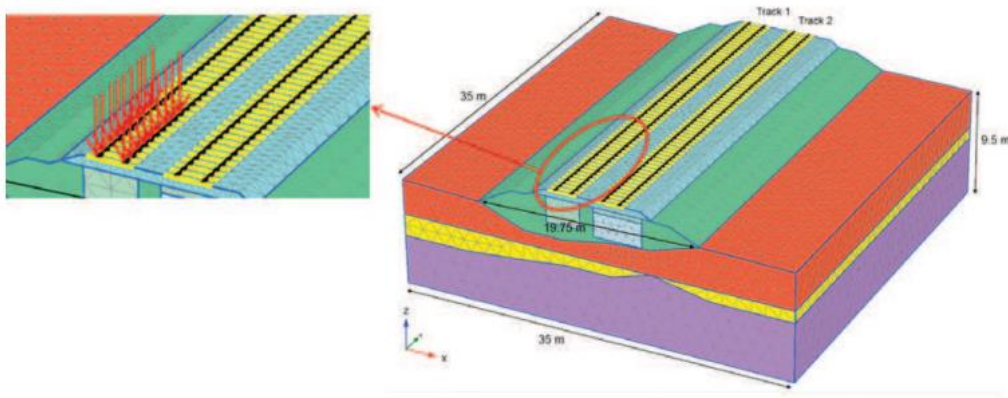


Şekil 4.3. HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları ve hareketli tren yükünün şematik gösterimi (Faizan, 2023).

Tablo 4.4. HT65000 yüksek hızlı trenin özellikleri (Faizan, 2023).

Bileşenler	Karakteristikler	Semboller	Büyükölük	Birim
Lokomotif	Dingil yükü	F_z	180	kN
HT65000	Hareket hızı	V	69.44	m/s

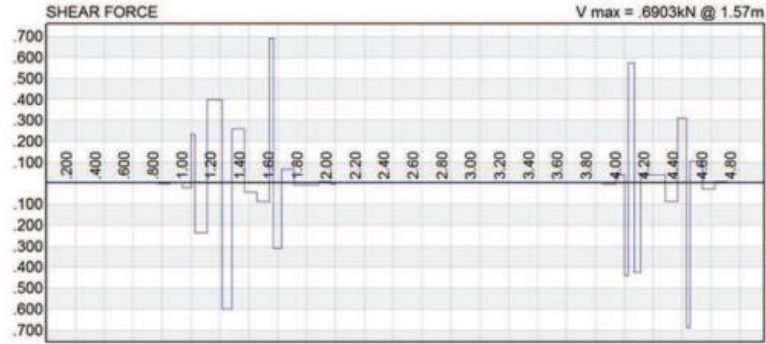
Sayısal model oluşturulurken hızlı tren etkisi bir kuvvet-zaman ilişkisi ile dinamik yük olarak tanımlanır. Bir başka deyişle tren yükü statik olmadığı ve zamana bağılı olarak değiştiği için dinamik bir nokta yükü olarak kabul edilir. Dinamik yüklerin simülasyonu için ise tekil yükler, yerleştirilmiş birtakım noktalarla tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde lokomotifin dört dingil kuvvetinin modele entegrasyonu raya sekiz tekil yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7). Demiryolu hattına dik yöndeki iki tekil yük arasındaki mesafenin 1.5 m olduğu ve iki ray arasındaki mesafeye eşit olduğu varsayılmıştır. Üç boyutlu sistemde, bir adet tekil yük çifti dingil yükünü dağıtan tekerlekleri temsil etmekte olup ilgili dingil yükü 180 kN'dur. Bu nedenle çiftteki her bir noktasal yükün büyüklüğü 90 kN'dur. Bu yük fonksiyonu, 200-250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişini temsil eden 40-60 Hz bir baskın frekans aralığına sahiptir. Sayısal işlemlerde katar hızı $V=250 \text{ km/h}=69.44 \text{ m/s}$ olarak dikkate alınmıştır. 2019 ve öncesi çalışmalarda tren yükünü modele dahil edebilmek amacıyla hat boyunca noktasal statik yükler tanımlanmıştır. Tanımlanan yük miktarı trenin dingil yüküne eşit olup her noktasal yük için kesme kuvveti-zaman olacak şekilde bir dinamik çarpan atanarak analizler yapılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Tren hattı boyunca noktasal statik yüklerin tanımlanması (Wolffersdorff, 2010).

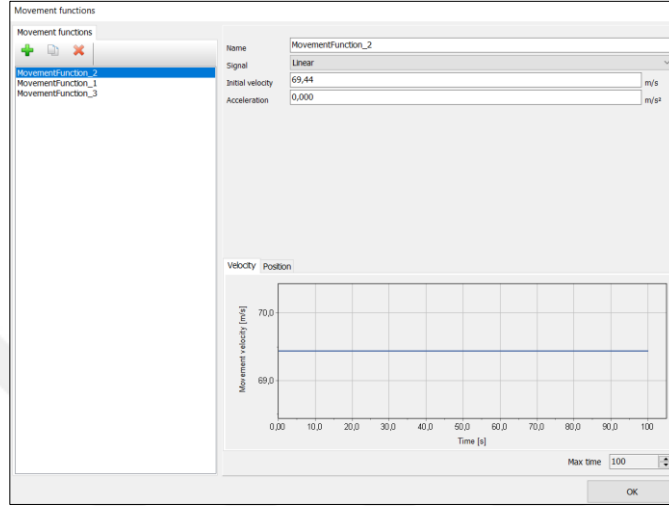
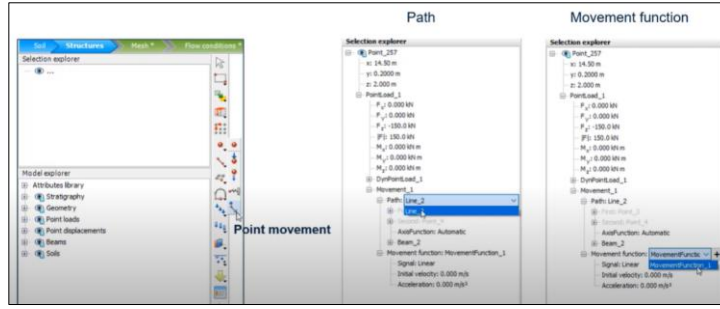
Literatürde araştırmacılar (Wolffersdorff, 2010; Vogel ve ark, 2011) hareket eden yüklerin etkisini göz önünde bulundurmak ve raydaki kesme kuvveti dağılımının uzunluğunu yaklaşık olarak tahmin etmek için kirişi statik olarak analiz etmiş ve daha sonra modelin uzunluğunu arttırmak için bu mesafeler dikkate alınmıştır. Raydaki kiriş kesme kuvvetini tahmin edebilmek için elastik zemine oturan kiriş teorisi kullanılmış ve Prokon adlı yazılım ile bu mesafe belirlenmiştir. Prokon, kirişin çok kısa mesafelere sahip bir dizi yay üzerinde 2 boyutlu bir çerçeve olarak modellendiği doğrusal bir analiz gerçekleştirir. Bu analizden elde edilen kesme kuvvetleri, PLAXIS 3D'de her bir nokta yükü için dinamik çarpanlar olarak kullanılır (Şekil 4.5). Ancak PLAXIS 3D'de bu işlem daha kullanıcı dostu bir arayüze sahiptir. Tren yükü ve tren hızı olmak üzere iki parametre ile temsil edilen hareketli yük modele hareketin üzerinde gerçekleşeceği yol (path) ve hareket fonksiyonu (movement function) kullanılarak tanımlanabilir (Şekil 4.6). Dinamik zaman aralığı hızlı trenin tüm akslarının modellenen geometriyi geçmesi için gereken süreyi kapsayacak şekilde seçilmiştir. Tren hızı ve dinamik tekil yükler arasındaki mesafe sabit olduğu için zaman adımı da sabittir. Ele alınan modelin tamamının uzunluğu 100 m olduğundan, $250 \text{ km/h} = 69.44 \text{ m/s}$ hızla geçen hızlı trenin aldığı toplam dinamik zaman yaklaşık 1.5 s'dir.

Time steps	Distance [m]	Time [s]	117 Multipliers					Multiplier 116	Multiplier 117
			Multiplier 1	Multiplier 2	Multiplier 3	...	...		
1	0	0	0	0	0	...	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	0	0	0	0	0	...	...	0	0
8	0.3	0.006	0	0	0	...	...	0	0
9	0.6	0.012	-0.001	0	0	...	...	0	0
10	0.9	0.018	-0.0012	-0.001	0	...	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
229	66.3	1.326	0	0	0	...	...	0.0001	-0.0005
230	66.6	1.332	0	0	0	...	...	0	0.0001



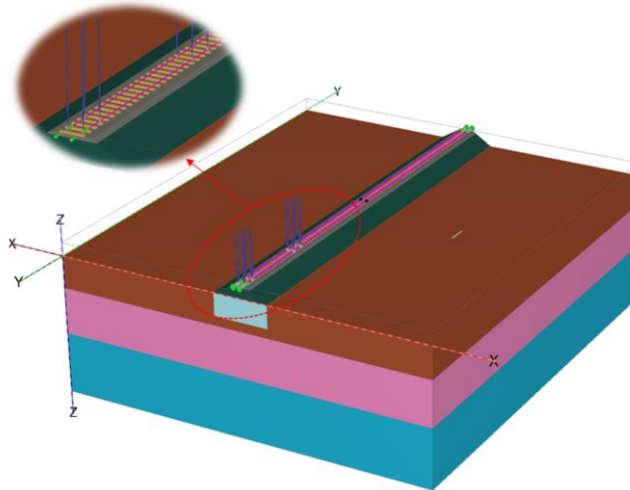
Şekil 4.5. Dinamik yük çarpanları ve kiriş kesme kuvvetlerinin gösterimi.

Modelde raylar dışındaki tüm elemanlar “Soil and interface” sekmesi altında üç boyutlu tanımlanırken, raylar hat uzunluğu boyunca uzanan tek boyutlu kiriş eleman olarak “Beams” sekmesi altında modellenmiştir (Şekil 4.7.). Model tamamlandıktan ve veri girişi yapıldıktan sonra programda bulunan “Mesh” sekmesinin altındaki “Generate mesh” komutu aracılığıyla sonlu eleman boyutları belirlenmiş ve kullanılan sonlu eleman büyüklükleri alt iki tabakada sınır değerleri aşmayacak şekilde büyük seçilirken üst tabakalara doğru kademeli olarak küçültülmüştür. Bunun sebebi demiryolu trafiği kaynaklı oluşan dalga yayılımının zemin yüzeyinden itibaren ilk birkaç metre içerisinde daha aktif rol alması ve bu bağlamda daha hassas bir sayısal çözümleme yapılabilmesidir. Modellemenin son aşamasında ise “Staged construction” sekmesi vasıtasıyla nümerik analiz için bir dizi fazlar tanımlanmıştır. Bu fazlar karmaşık dinamik bir problemi adım adım analiz edebilmeye olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.6. Hareketli tren yükünün modele tanımlanması.

Modeller oluşturulurken ilk olarak arazi ölçümü verilerinden hareketle zemin modeli doğrulanmış, bu doğrulama yapıldıktan sonra hendekli modeller oluşturulmaya başlanmıştır.

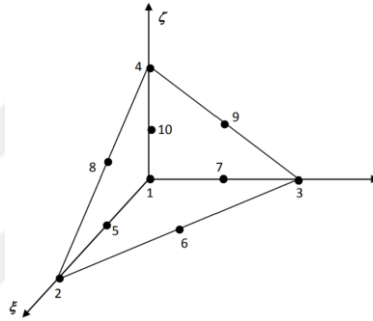


Şekil 4.7. Hareketli yükü simüle etmek için geliştirilmiş üç boyutlu sonlu eleman modeli.

Mevcut sayısal modeldeki zemin içerisinde gaz beton cidarlı bir bariyer oluşturmak amacıyla üst zemin tabakasında yeni yüzeyler yaratılmış ve bu yüzeyler aşağıya doğru genişletilerek dikdörtgenler prizması şeklinde bir dalga yalıtım bariyeri modele entegre edilmiştir. İlgili bariyerin malzeme özellikleri Bölüm 3.'te verildiği gibi modele aktarılmıştır.

4.3. Zemin-Demiryolu-Hızlı Tren Modelinin Analizi

Sistem geometrisi zemin malzemesi, yapısal elemanlar, yükler ve arayüzler dahil olmak üzere tam olarak oluşturulduktan sonra bir sonraki adım, analizleri yapabilmek için sonlu eleman ağının oluşturulmasıdır (Şekil 4.8).



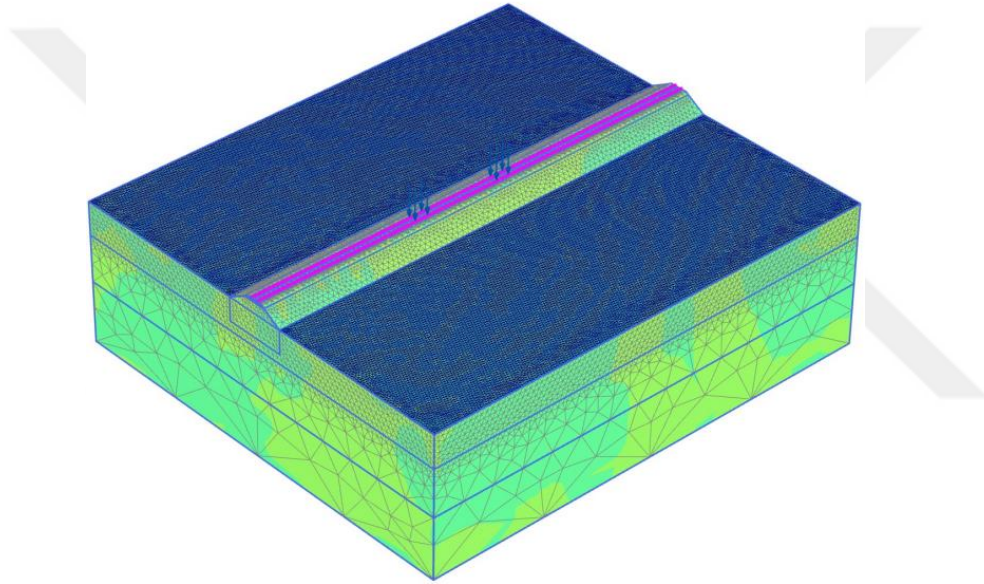
Şekil 4.8. PLAXIS 3D'de kullanılan 10 düğümlü (tetrahedral) sonlu elemanlar.

Dinamik etki sonucunda zemin ortamında yayılan titreşimlerin dalga boyu (λ) ile zemin ortamının modellenmesinde kullanılacak sonlu elemanların boyutları (Δh) kontrol edilmektedir. Dalga boyu, dinamik etkinin frekans içeriğine ve zemin ortamına ait dalga yayılma hızına bağlı olarak değişmektedir (Kuhlemeyer, 1973).

$$\Delta_h \leq \frac{V_i}{k \times f_{maks}} \quad (4.3)$$

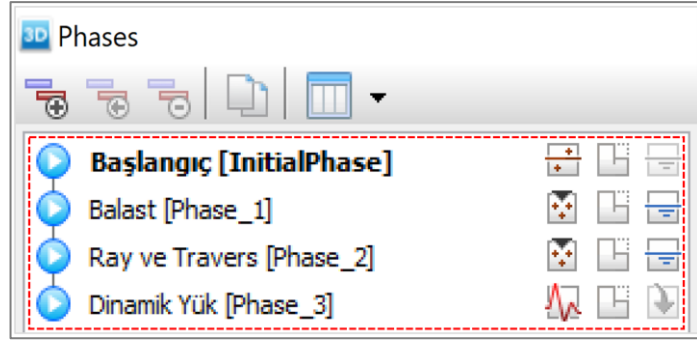
Yukarıdaki bağıntıda k çarpan sabiti sonlu eleman tipine ve kullanılan şekil fonksiyonuna bağlı olarak $5 \leq k \leq 10$ aralığında değişmektedir. Dinamik yük bileşenlerinin en büyük frekans değeri f_{maks} ile ifade edilmektedir. Yüksek frekansa ve kısa dalga boyuna sahip titreşim etkileri belirli bir boyutun üzerindeki sonlu elemanlar ile modellenen ortamlarda filtrelenebilir (Faizan, 2023). Bu nedenle analizlerde kullanılacak sonlu eleman boyutunun (Δ_h) maksimum değeri hesaplanmış ve buna göre sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Gerçekte, test sahasındaki yüksek hızlı tren, farklı frekansları içeren farklı hızlarda (240-260 km/h) geçmektedir. Düşük hızlı

trenler düşük frekanslara sahip olacak ve bu nedenle hesaplamada ağ boyutu daha büyük olacaktır. Kurulan sonlu eleman modelinin dinamik analizlerinde, sonlu eleman sayısının ve buna bağlı olarak gerilme noktası sayısının fazla olması nedeni ile analiz süreleri oldukça uzun sürmektedir. Bunun için, analizlerde zemin ortamı düşey farklı bölgelere ayrılarak yapısal davranışın birinci dereceden önem kazandığı bölüm daha küçük boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir. Uzak bölgenin ayrıklaştırılmasında sonlu eleman ağ yapısının sıklığı kademeli olarak genişletilmiştir. Başka bir ifadeyle üstyapıya yakın bölgeden uzaklaştıkça kullanılan sonlu eleman boyutları sınır değeri aşmayacak şekilde büyütülerek hesaplama yükü ve buna bağlı olarak analiz süreci dengelenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. 3D Model için oluşturulan sonlu eleman ağı.

PLAXIS yazılımında analiz aşamasına geçilmeden önce sıralı hesaplama aşamaları ve her bir aşama için hesaplama türü tanımlanmalıdır. Bu çalışmada hesaplama 4 fazdan oluşmaktadır. İlk faz başlangıç aşaması (InitialPhase), sonraki aşamalar ise balast (Phase_1), ray ve travers (Phase_2) ve dinamik yük (Phase_3) olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.10).



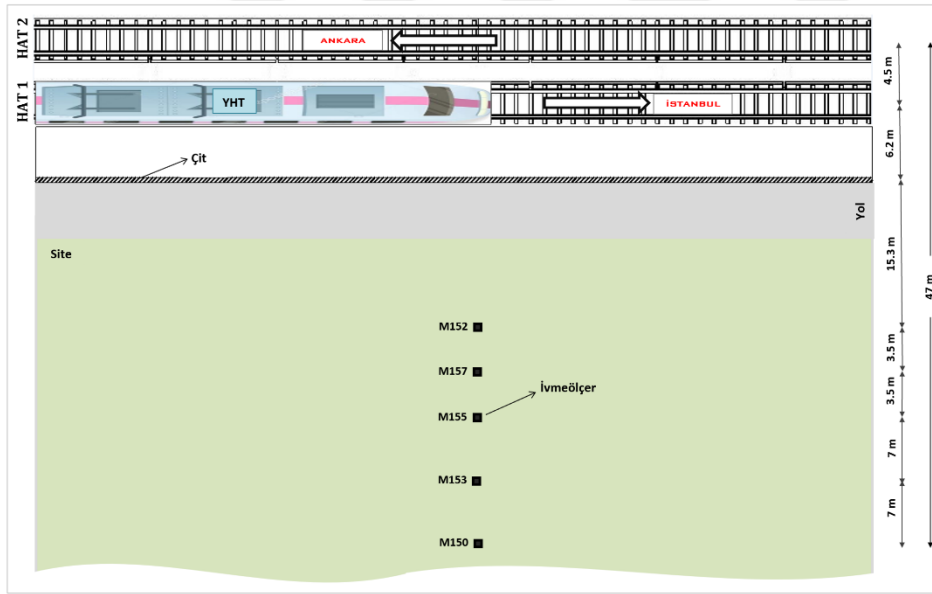
Şekil 4.10. PLAXIS 3D'de hesaplama aşamalarının tanımlanması.

Dinamik zaman aralığı olarak belirlenen 2.5 s hızlı trenin tüm akslarının modellenen geometriyi geçmesi için gereken süreyi kapsayacak şekilde seçilmiştir. Dinamik analiz gerçekleştirildikten sonra ölçüm noktalarının koordinatları seçilerek eğri yöneticisi etkinleştirildiğinde, program hesaplanan adımlardan veri almakta ve çıktıları PLAXIS 3D Output adlı ara yazılım aracılığıyla ulaşılabilmektedir. Bu yazılım ile gerilmeler, yerdeğiştirmeler, yapısal elemanlarda oluşan kuvvetler gibi birçok datayı incelemek mümkündür.

4.3.1. Zemin modelinin doğrulanması

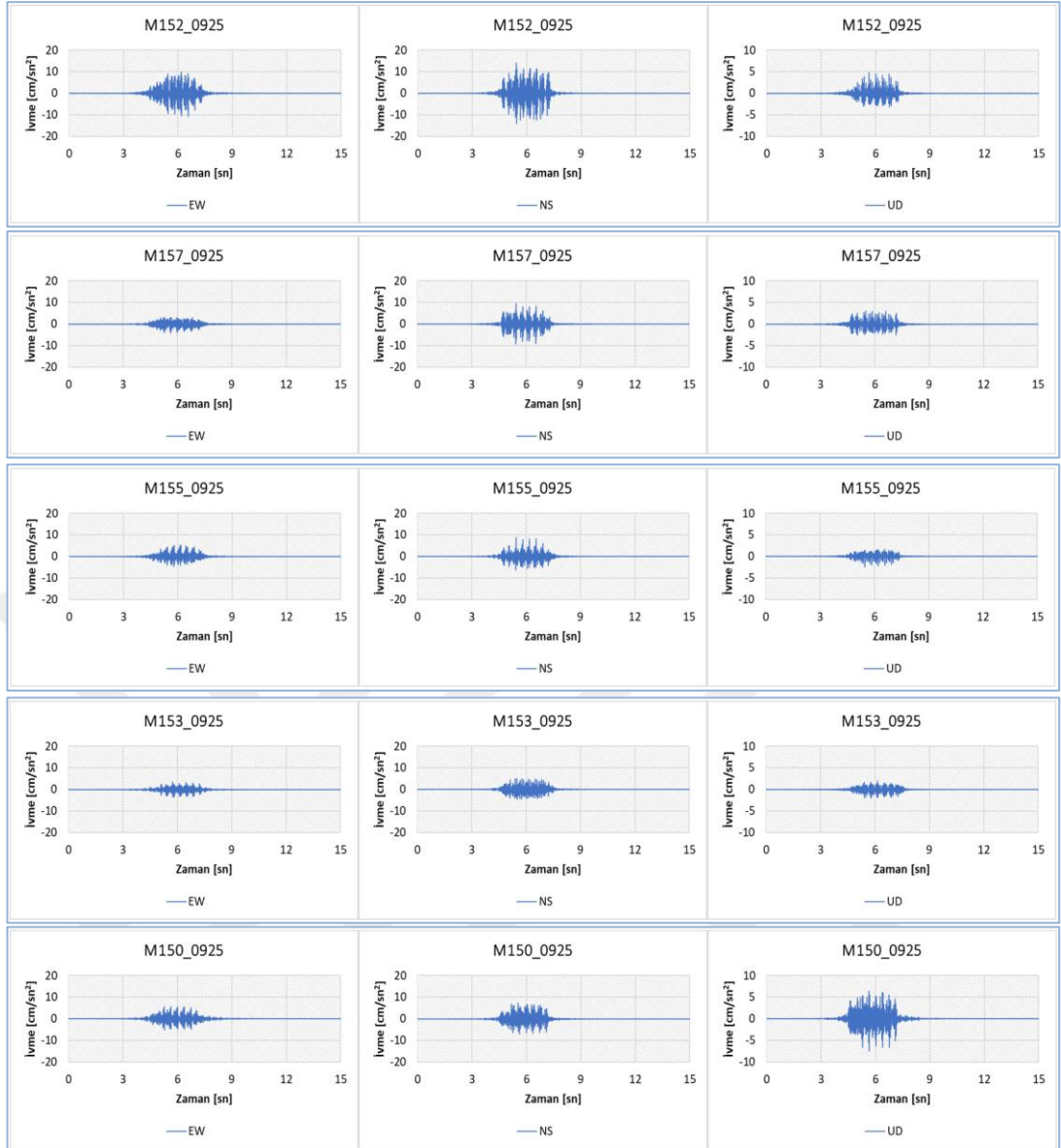
Bölüm 4.3'te detaylı ifade edildiği gibi zemin ortamının modellenmesinde kullanılan sonlu eleman tipi olarak PLAXIS yazılımında ağ örgüsünü çok daha iyi ifade edebilmek için tanımlanmış olan üçgen elemanlar kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde modelleme de kullanılan bu üçgen elemanlardan, daha detaylı olarak gerilme analizi yapabilmek için 10 düğüm noktalı sonlu eleman tipi seçilmiştir. Bilindiği üzere dinamik bir problemi bir yazılım vasıtasıyla temsil etmeye çalışmak mühendislik açısından oldukça güçtür. Özellikle ele alınan problemin en büyük bileşenlerinden birinin sonsuz zemin ortamı olması ve bu zemin ortamının kendi içerisindeki değişken karakteri, geliştirilen modele söz konusu karakteristik özelliklerin doğru bir şekilde yansıtılabilmesini zorlaştırmaktadır. Zeminin kendi içerisindeki bilinmezlerle ek olarak yüksek hızlı tren geçişlerinden kaynaklanan titreşimlerin bu zemin ortamında yayılma davranışının da simule edilmeye çalışılması dikkate alınan problemi bütüncül bir bakış açısı ile ele almayı imkânsız hale getirmektedir. Bu sebeple bu çalışma gerçekleştirilirken titreşim probleminin sayısal modeli aşama aşama oluşturulmuş, dolayısıyla problem ilk etapta bir bütün olarak ele alınmamıştır.

Pamukova/Yenice test sahasında gerçekleştirilen arazi deneyleri kapsamında belirlenen zemin özellikleri dikkate alınarak bir model geliştirilmiş ve ilgili model söz konusu test sahasındaki serbest zemin titreşim kayıtlarının esas alındığı bir dizi dinamik analizler sonucunda doğrulanmıştır. Zemin modelini doğrulamak için gerçekleştirilen deneylere ait ayrıntılı bilgi bu tez çalışmasının kapsamı içerisinde tutulmayıp bu çalışmalara dair detaylara İstegün ve ark. (2023) tarafından hazırlanan bir araştırma makalesinde yer verilmiştir. Bilindiği üzere sonsuz zemin ortamını sonlu bir eleman ile gerçek hayattaki davranışına dikkat çekici düzeyde yakınsaklıkla modellemek oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu sebeple zemin davranışı doğrulanmaya çalışılırken bu süreç birtakım basitleştirmeler ve yaklaşımlar yoluyla yürütülmüştür. Örneğin zemin üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan değerler üç eksenle olmasına karşın söz konusu ivme değerlerinin tek bir kavram üzerinden yorumlanması görece daha kolay olacağından pik partikül ivme değerleri üzerinden bir değerlendirme yapılmıştır. Doğrulamaya esas deneysel çalışma sahasının kuşbakışı görünümü ve elde edilen ivme kayıtları sırasıyla Şekil 4.11- 4.14'te sunulmuştur.

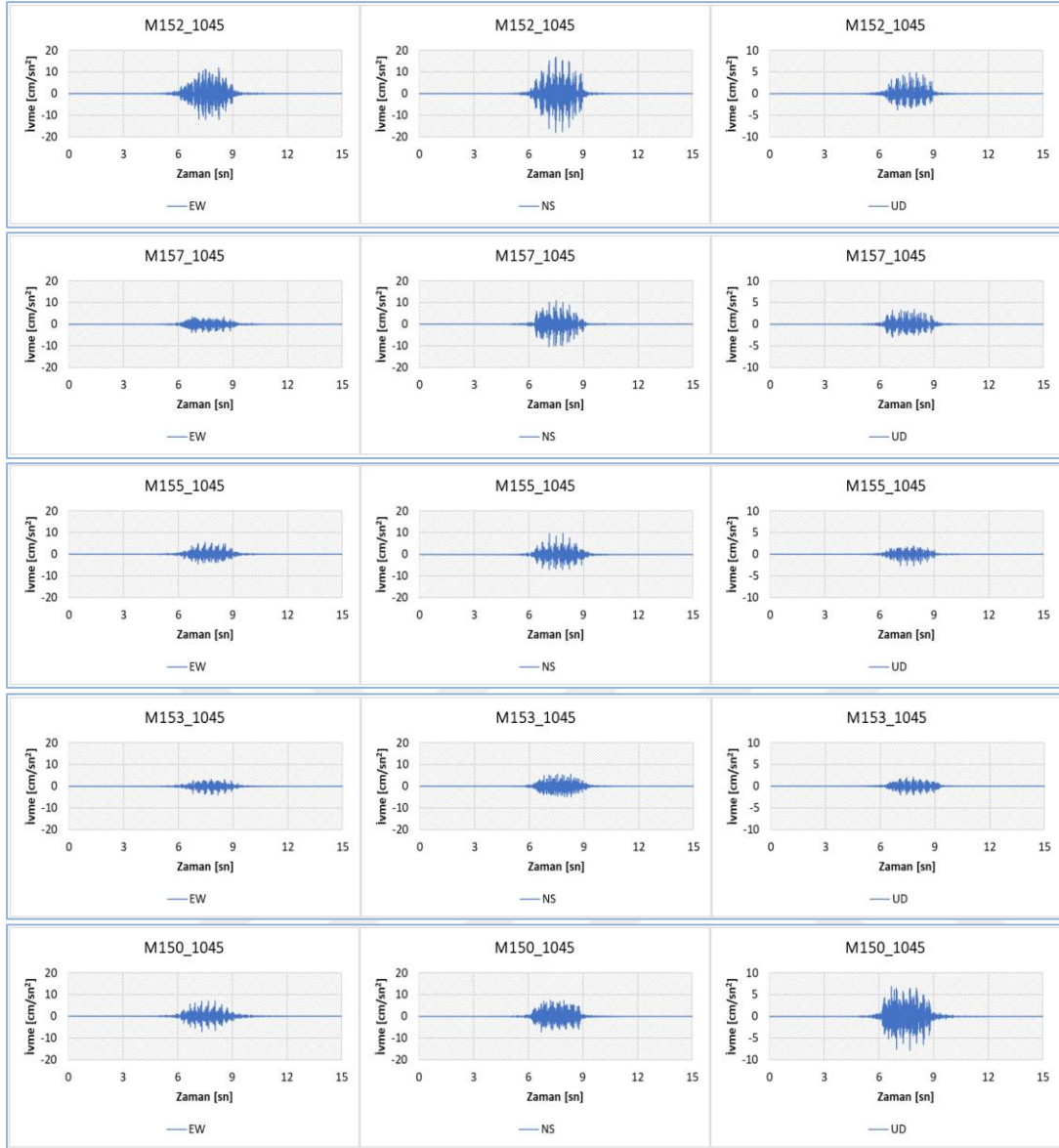


Şekil 4.11. Çalışma sahasının kuşbakışı görünümü

Bu çalışmada İstanbul yönüne doğru hareket eden 3 farklı tren seferi dikkate alındığından ve 5 adet ivmeölçer kullanıldığından 45 adet ivme-zaman ilişkisi elde edilmiştir. Grafiklerde kullanılan M152_0925 etiketi saat 09.25 tren geçişi için M152 cihazından elde edilen kaydı ifade etmektedir.

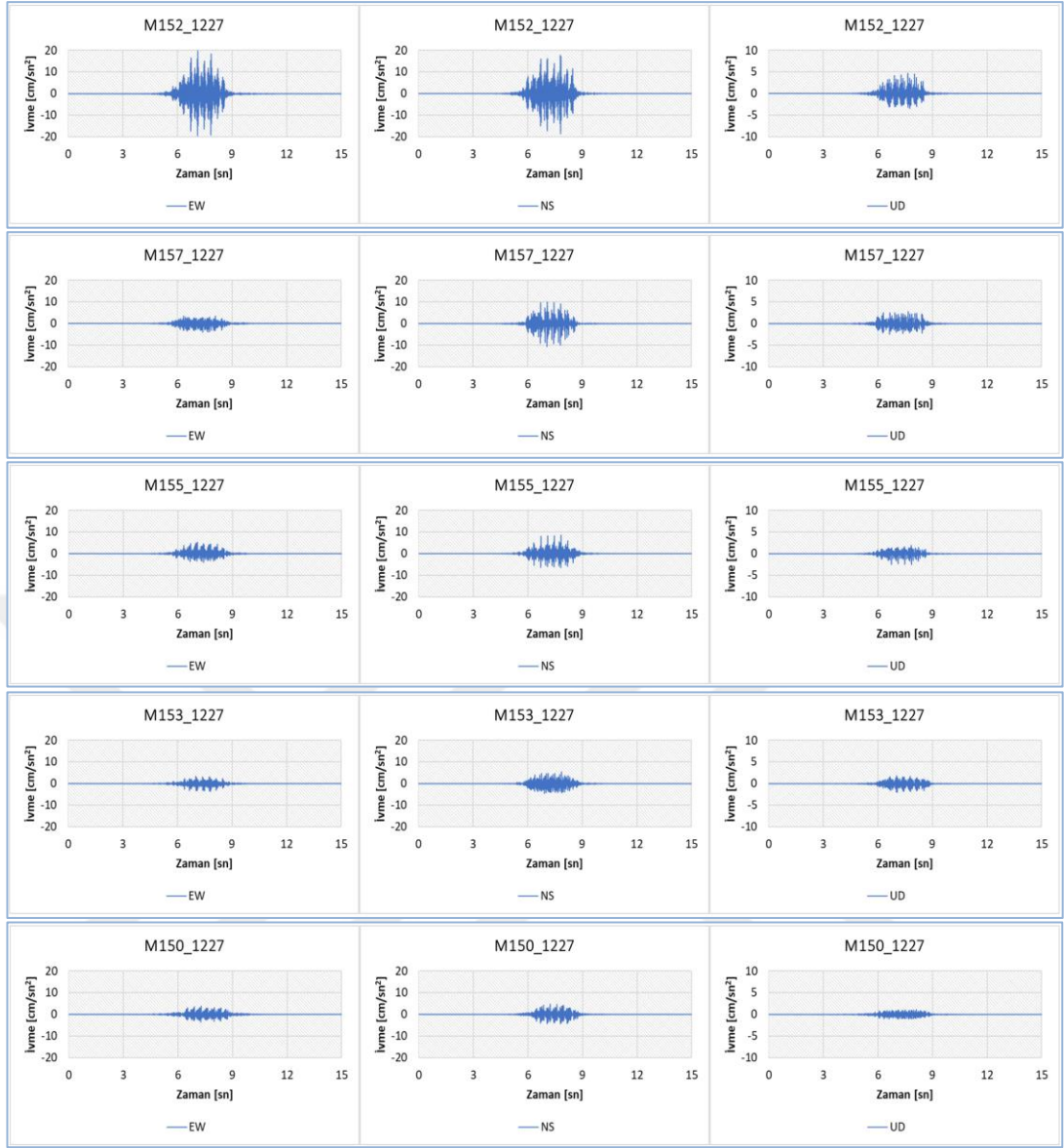


Şekil 4.12. Üç doğrultuda farklı tren geçişleri için beş ölçüm noktasından elde edilen ivme-zaman ilişkileri.



Şekil 4.13. Üç doğrultuda farklı tren geçişleri için beş ölçüm noktasından elde edilen ivme-zaman ilişkileri.

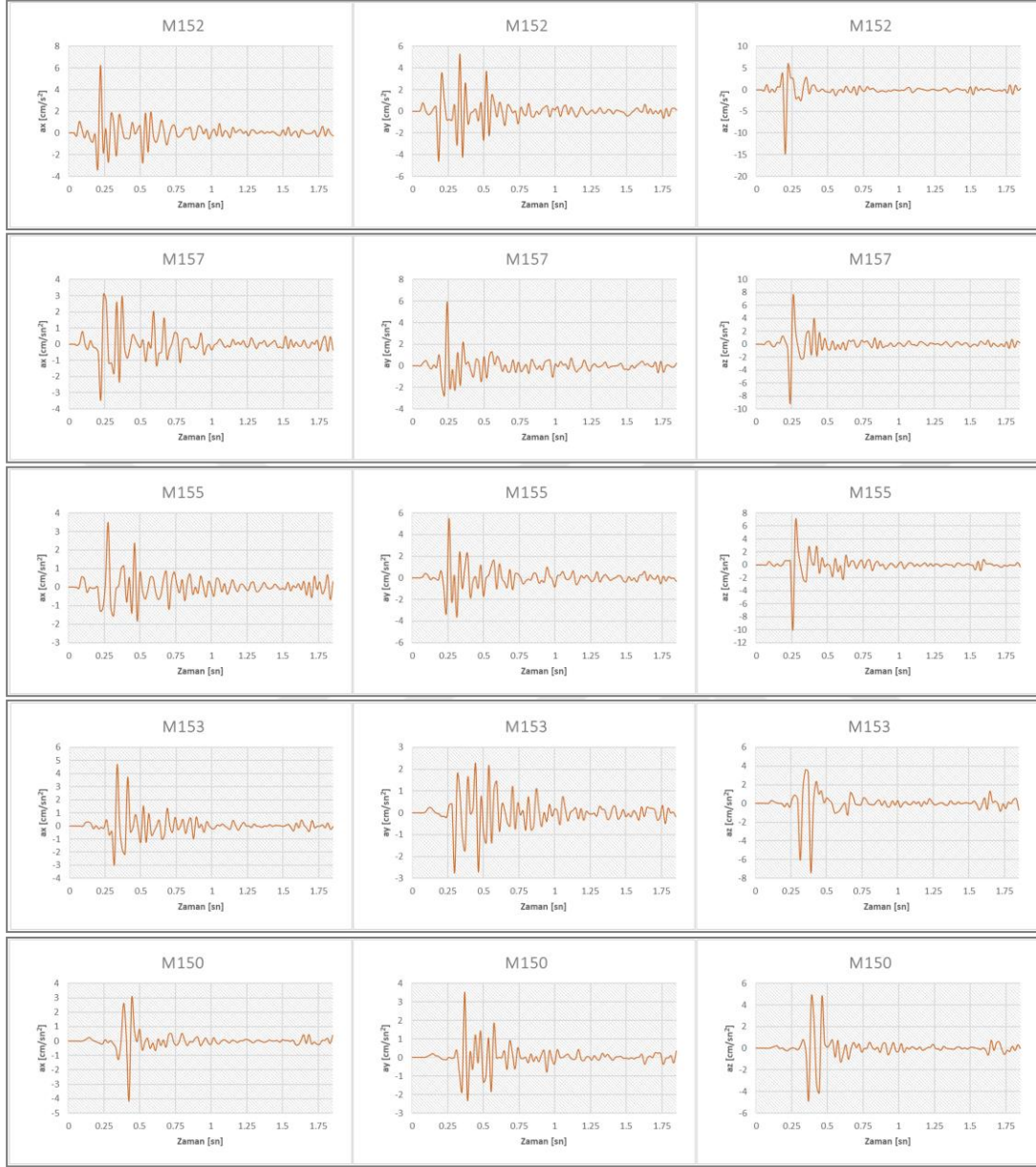
Şekil 4.12-4.14'te sunulan ivme-zaman ilişkileri çalışmanın hacmini göstermek açısından önemlidir. Bu denli çok sayıda veri ile yüzde yüz uyumla çalışacak bir zemin ortamının modellenmesi mümkün olmadığından farklı saatlerde seyahat eden üç tren geçişinin pik yer ivmesi değerlerinin her üç doğrultuda kendi içinde ortalaması alınmıştır. Daha sonra ise üç eksen için mevcut olan bu ortalama değerler model doğrulamasına esas teşkil eden tek bir parametreye (pik partikül ivme) indirgenmiştir.



Şekil 4.14. Üç doğrultuda farklı tren geçişleri için beş ölçüm noktasından elde edilen ivme-zaman ilişkileri.

Bölüm 4.1’de detayları verilen zemin ve demiryolu platformu özellikleri dikkate alınarak birtakım dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Demiryolu platformunun üzerine oturduğu dolgu tabakasının altında bulunan güçlendirilmiş zemine ait kayma dalga hızı üç boyutlu sonlu eleman probleminin değişkenlerinden biri olarak düşünülmüştür. Güçlendirme yapıldığı için söz konusu bölgenin kayma dalga hızı için net bir değer söylemek mümkün olmamakla birlikte, jeofizik çalışmalar gerçekleştirilen serbest zemine kıyasla daha yüksek bir kayma dalgası hız değerine sahip olacağı bilinmektedir. Bu bakış açısı bu bölgeyi modellerken kayma dalgası hızı değerinin mühendislik öngörülerıyla çelişmeyecek düzeyde değiştirilerek bir dizi analiz yapılmasına olanak sağlamıştır. Analizler sonucunda sonlu eleman modeline ait

ivme-zaman ilişkileri saha ölçümlerine benzer ölçüm noktaları için üç doğrultuda da elde edilmiş ve Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

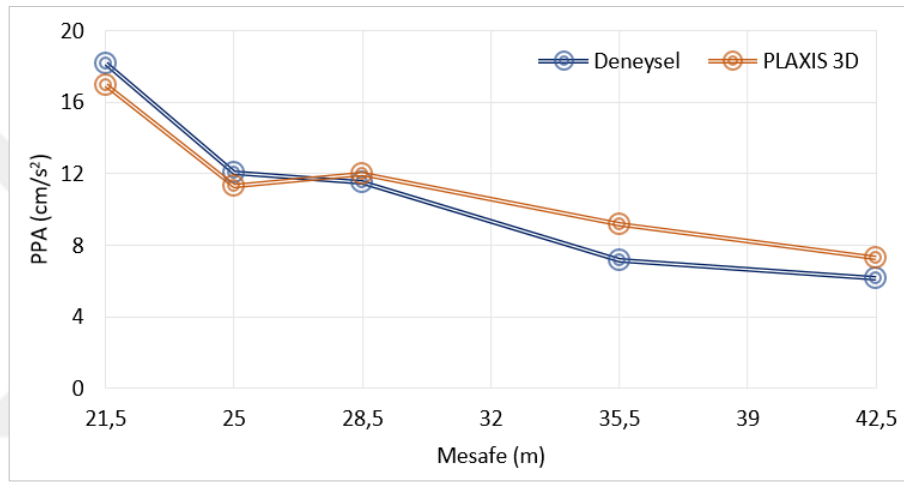


Şekil 4.15. Geliştirilen 3D modele ait ivme-zaman ilişkileri.

Elde edilen ivme zaman ilişkilerinden hareketle sayısal modelde her bir ivmeölçerin konumunu temsil eden noktalar için maksimum parçacık ivme (PPA) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler İstanbul yönü hızlı tren geçişi için gerçekleştirilen arazi çalışmasında elde edilen maksimum parçacık ivme sonuçları ile karşılaştırılarak Tablo 4.5 ve Şekil 4.16'da sunulmuştur.

Tablo 4.5. Hesaplanan deneysel ve nümerik pik partikül ivme değerleri.

İvmeölçer	Mesafe (m)	Deneysel (cm/s ²)	PLAXIS 3D (cm/s ²)
M152	21.5	18.201	16.936
M157	25	12.048	11.342
M155	28.5	11.535	11.977
M153	35.5	7.190	9.1749
M150	42.5	6.170	7.270

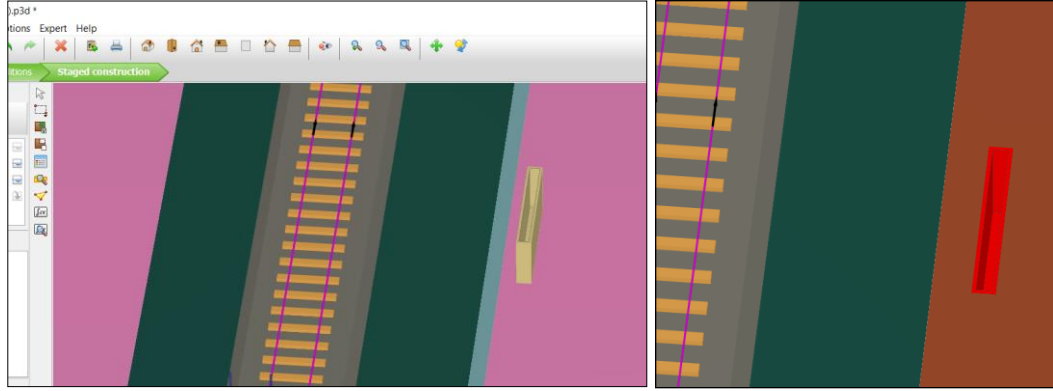


Şekil 4.16. Zemin modelinin doğrulanması.

Buradan anlaşılabileceği üzere sonuçların birbirine en çok ıraksadığı M153 noktasını temsil eden ve tren hattından 35.5 metre mesafede elde edilen sonuçlar %30 mertebede farklılık gösterdiğinden modelin bu hassasiyette çalıştığını söylemek mümkündür.

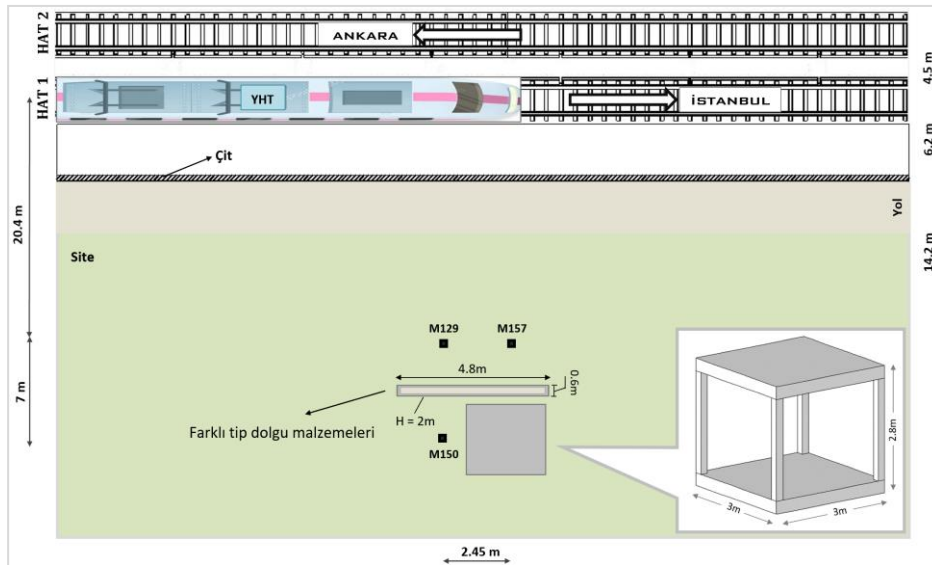
4.3.2. Gaz beton hendekli sonlu eleman modelinin doğrulanması

Modelleme sürecinin ilk aşamasında dalga bariyerinin olmadığı durum için hızlı tren-demiryolu platformu-zemin ortamını birlikte temsil eden üç boyutlu bir sonlu eleman modelinin geliştirilmesi amaçlanmış ve bu doğrultuda yapılan analizler sonucunda saha ölçüm verileri kullanılarak zemin doğrulaması yapılmıştır. Modelleme sürecinin ikinci aşamasında ise aynı test sahasına açılan düşey dalga bariyerinin varlığı durumunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar dikkate alınmış ve söz konusu ince cidarlı gaz beton bariyer ele alınan karmaşık problemin yeni bir bileşeni olarak sayısal modele dahil edilmiştir (Şekil 4.17).



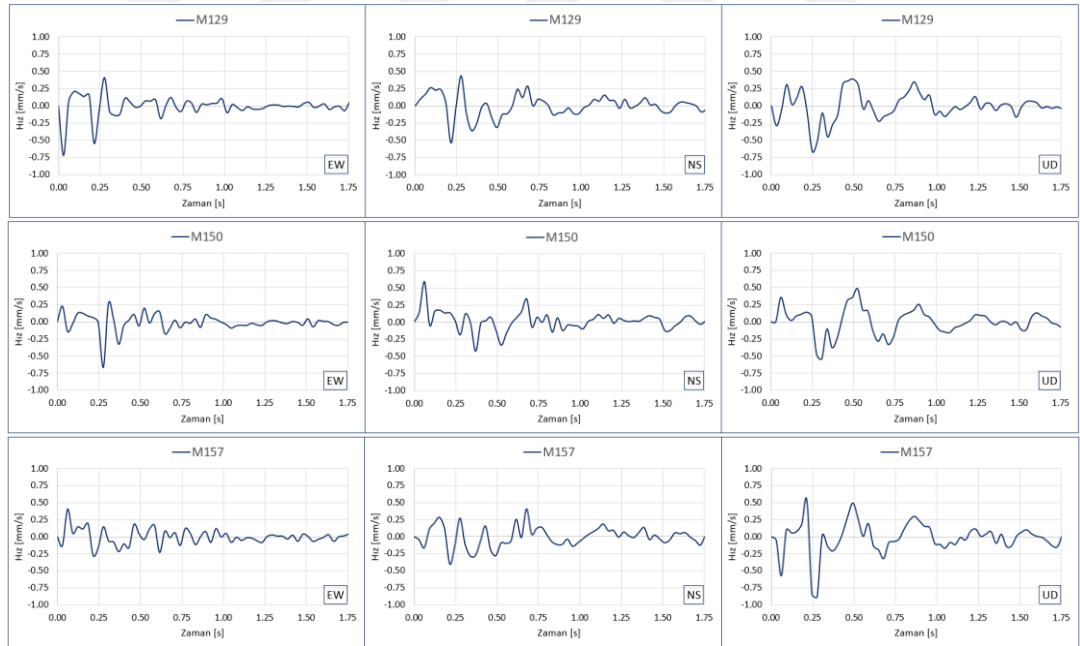
Şekil 4.17. Dalga yalıtım bariyerli sonlu eleman modeli

Gaz beton cidarlı hendek için PLAXIS 3D yazılımında “plate” elemanlar kullanılmış ve malzeme özellikleri için gaz beton panellerin Bölüm 3’te ifade edilen katalog değerleri dikkate alınmıştır. Zemine açılan çukurların dalga yalıtım bariyeri olarak işlevselliğinin araştırıldığı mevcut çalışmalarda minimum hendek genişliğinin dalga boyunun 0.1 ila 0.5 katı arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Minimum hendek derinliği için ise aktif izolasyon durumu için dalga boyunun 0.6 katı; pasif izolasyon için 1.33 katı olması gerektiği belirtilmektedir (Çelebi ve ark, 2009). Sayısal modelde de hendek genişliği ve derinliği arazi çalışmaları ile uyumlu olacak şekilde seçilmiştir (Şekil 4.18). Model doğrulaması serbest zeminde bariyerin önü ve arkasındaki toplam üç nokta için gerçekleştirilmiş ve bu ölçüm noktalarına ait hız-zaman üç doğrultu için ilişkileri Şekil 4.19’da verilmiştir.



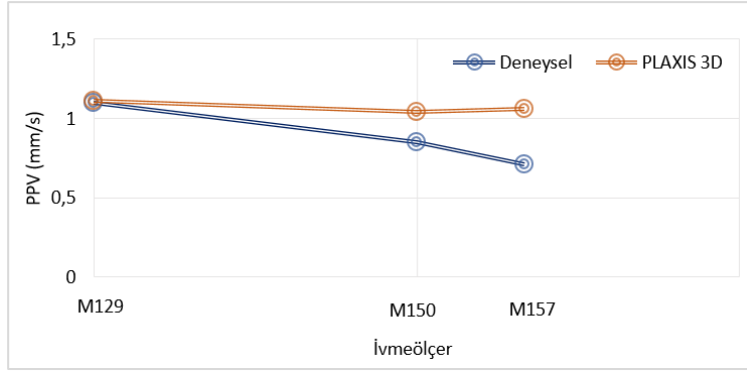
Şekil 4.18. Modellemede dikkate alınan bariyer boyutları ve doğrulamaya esas ölçüm noktaları

Gelişen bilgisayar teknolojisi kompleks mühendislik problemlerinin ele alınmasını kolaylaştırırsa da sonlu elemanlar yaklaşımı ile çok bileşenli problemlerin analiz süreleri hala önemli bir kısıtlayıcı unsurdur. Bu sebeple bu modelde de çeşitli basitleştirmeler ile bu süre ortalama 13 saate düşürülmüştür. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ivme kayıtları yaklaşık 15 saniyelik bir zaman dilimi için elde edilmişken sayısal modelde bu süre 2 saniyeye indirgenerek 6 vagonlu tren setinin 1 vagona düşürülmesi söz konusudur. Bu sebeple deneysel çalışmaların ve nümerik modellerin ivme-zaman veya hız-zaman ilişkileri bakımından doğrudan karşılaştırılması güçtür. Buradan hareketle deneysel çalışmalardan elde edilen parçacık ivme veya hız değerlerinin karşılaştırmaya esas olabileceği düşünülmüştür (Şekil 4.18). Ayrıca her bir tren geçişi esnasında yolcu ve yük kapasitesinin bilinmezliği, hareket fonksiyonunun lineer olarak tanımlanması, raylarda kullanıma bağlı meydana gelen yıpranmalar ve sürtünme etkisi, güçlendirilen dolgu tabakasının zemin özellikleri gibi faktörler de modelleme sürecini gerçeklikten uzaklaştıran diğer faktörlerdir. Bu sebeple saha sonuçlarıyla mükemmel derece örtüşen sayısal bir modelin kurulması bu tez kapsamında hedeflenmemiştir.



Şekil 4.19. Sayısal modelden elde edilen hız-zaman ilişkileri.

Analiz sonuçları incelendiğinde problemin sayısal modeli ile deney sonuçları arasındaki hata oranlarının sırasıyla M129 cihazı için %1.03; M150 cihazı için %18.48 ve M157 cihazı için ise %32.66 olduğu saptanmıştır (Şekil 4.20).



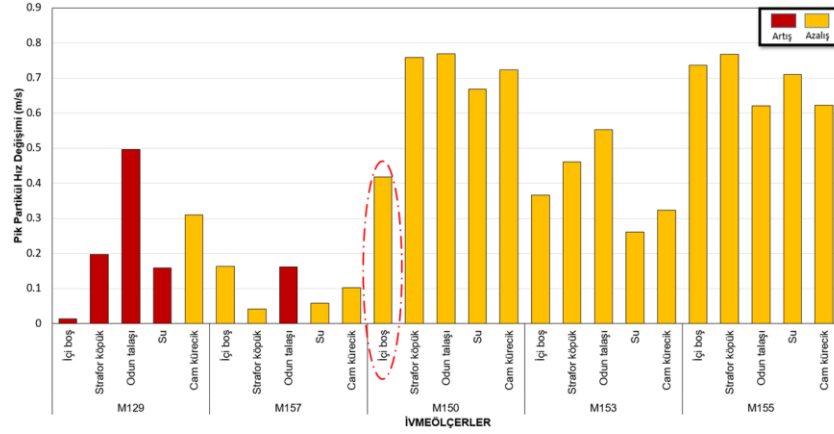
Şekil 4.20. Deney ve sayısal model sonuçlarının PPV bakımından karşılaştırılması.

Bununla birlikte model üzerinde bariyer arkasındaki ivmeölçerin sahada konuşlandırıldığı koordinatı temsilen seçilen birçok nokta için gerçekleştirilen analizler sonucunda üç doğrultuda ivme bileşenleri elde edilmiş ve pik partikül ivme değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.6. 3D modelde bariyerin arkasındaki bir nokta için elde edilen PPA değerleri.

Konum	a_x	a_y	a_z	PPA (cm/s^2)
Node 122070	-7,74E-02	8,06E-03	-1,01E-02	7,843
Node 130947	-1,50E-02	-3,30E-02	6,27E-02	7,240
Node 131844	-1,16E-02	-7,51E-03	7,23E-02	7,356
Node 117966	2,17E-02	1,69E-02	7,28E-02	7,781

Bu değerler zemin doğrulamasına esas olan deneysel veriler ile (İstegün ve ark, 2023) M157 ivmeölçeri bakımından karşılaştırılmıştır. Zemin doğrulamasına esas teşkil eden saha çalışmalarında M157 ivmeölçeri konumu itibariyle daha sonra hendeğin açılacağı bölgenin arkasındaki bir yeri işaret ettiği için kritik bir pozisyonundadır. Hendeksiz saha koşullarında bu noktadan elde edilen PPA ivme değeri (12.048 cm/s^2) göz önünde bulundurulduğunda (Tablo 4.5) ve bu değer sayısal modelde aynı noktaya işaret eden hendekli durum pik partikül ivmesi (ortalama 7.5 cm/s^2) ile karşılaştırıldığında bariyer performansının yaklaşık %40 olduğu söylenebilir. Bu oran içi boş bariyer durumunun bariyersiz duruma kıyasla %40 performans sağladığının gösterildiği (hendeğin arkasındaki M150 noktası için) PPV değişim grafikleri ile de uyumlu dikkat çekici bir sonuçtur.



Şekil 4.21. Tüm ölçüm noktalarında deneysel çalışmalardan elde edilen maksimum parçacık hız değerlerinin değişimi.

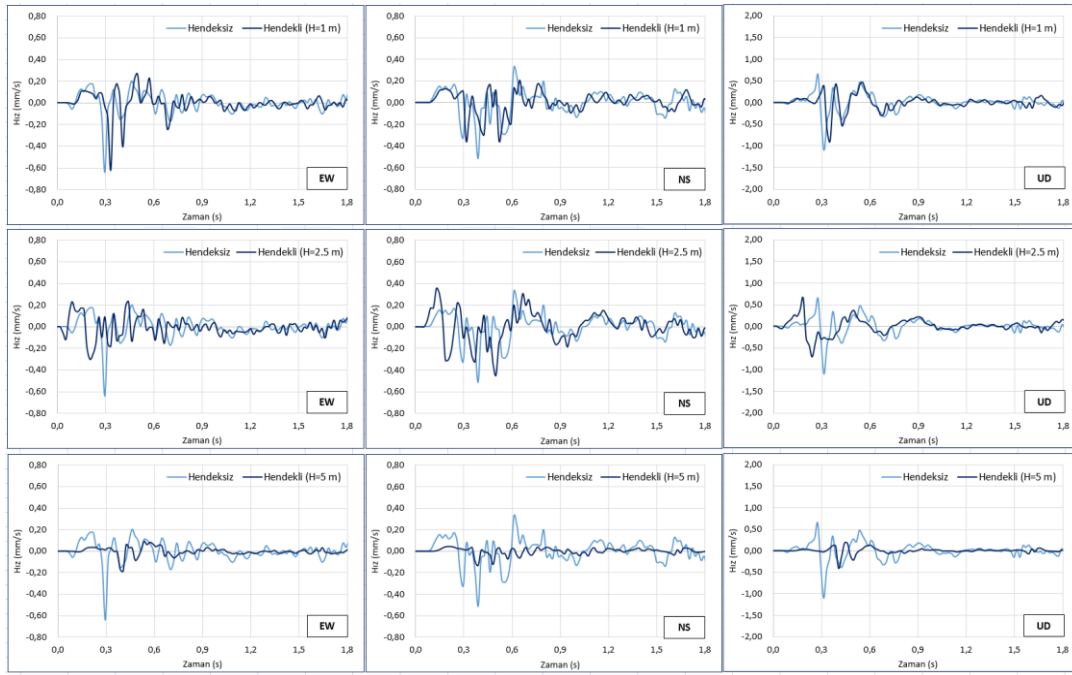
4.3.3. Yönetici parametrelere bağlı uygulamalar

Bu bölümde seçilen yönetici parametreler göz önünde bulundurularak pasif yalıtımın etkinliği araştırılmıştır. Bariyerin derinliği ve yoğunluğu olmak üzere iki adet parametre belirlenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

4.3.3.1. Bariyer derinliğinin çevre titreşimleri üzerindeki etkisinin incelenmesi

Bu bölümde farklı bariyer derinlikleri için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Dalga bariyerinin pasif yalıtım modeli olarak etkili olması için hızlı tren geçişlerinin ürettiği Rayleigh yüzey dalgalarının yeterli yayılma yoluna sahip olması gerektiğinden model üzerinde tren hattından üç dalga boyu mesafede seçilen bir nokta için hız-zaman ilişkileri elde edilmiş (Şekil 4.22) ve pik partikül hız değerleri hesaplanarak Tablo 4.7’de sunulmuştur. Titreşim kaynağının frekans içeriğine ve zemin tabakasının dinamik parametrelerine bağlı yaklaşık hesaplar yapıldığında yüzey dalga boyunun 4-6 m aralığında olduğu tahmin edilmektedir. Dalga boyunun 5 m olduğu varsayımıyla sırasıyla $H=1$ m, $H=2.5$ m ve $H=5$ m derinliğindeki hendekler için analizler yapılmış, böylelikle boyutsuz normalize edilmiş derinlik parametresi D ’nin sırasıyla 0.2, 0.5 ve 1 olması durumunda bariyer performansının ne olacağı araştırılmıştır. Bariyersiz durumda model üzerinde tren hattından üç dalga boyu mesafede seçilen nokta için elde edilen pik yer hızı (PGV) değerleri EW, NS ve UD doğrultuları için sırasıyla 0.64 mm/s, 0.51 mm/s ve 1.1 mm/s’dir. 1 metre derinliğindeki hendek uygulaması için hatta paralel titreşim doğrultusunda elde edilen pik yer hızı değeri 0.62 mm/s iken hatta dik doğrultuda 0.36 mm/s’dir. Her üç titreşim doğrultusu içerisinde en büyük bileşen 0.9 mm/s’lik pik hız değeriyle düşey yön için elde edilmiştir. Bariyer performansı üç doğrultu için ayrı ayrı değerlendirilecek olursa EW yönünde %3, NS yönünde %29 ve

UD yönünde %19 mertebelerindedir. Bariyersiz model üzerinde seçilen nokta için hesaplanan PPV değerleri bariyerli durumda aynı ölçüm noktası için elde edilen parçacık hızı değerleri ile karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki A_R (genlik azaltma oranı) bakımından değerlendirilmiştir. Üç doğrultu içi hesaplanan pik yer hızı değerlerinin karelerinin toplamının karekökü alınarak elde edilen PPV kavramı üzerinden bir değerlendirme yapıldığında ise Tablo 4.7’den görülebileceği üzere zemine 1 m derinliğinde gaz beton cidarlı hendek açılması durumunda pik partikül hız değerleri 1.380 m/s mertebelerinden 1.149 m/s değerlerine düşmüştür.



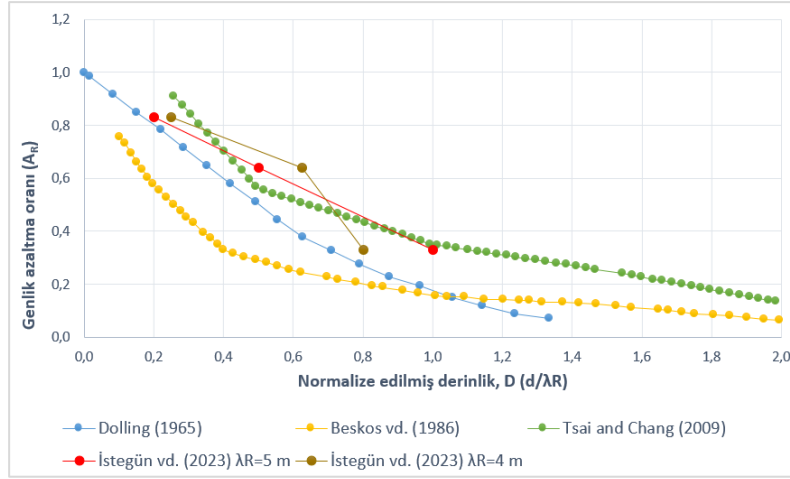
Şekil 4.22. Farklı hendek derinlikleri için üç doğrultuda hız-zaman ilişkileri.

Bu durum H=1 m derinliğindeki hendek için %17’lik bir bariyer performansına işaret etmektedir. Parametrik çalışmanın ikinci aşamasında 2.5 metre derinliğindeki hendekli model analiz sonuçları incelenmiştir. Şekil 4.20’den görülebileceği üzere EW doğrultusundaki pik hız değeri 0.3 mm/s, NS doğrultusundaki değer 0.45 mm/s ve düşey doğrultuda 0.71 mm/s olarak belirlenmiştir. Bu durumda bariyersiz saha modeline kıyasla üç bileşen için ayrı ayrı bariyer performanslarının sırasıyla %53 (EW), %12 (NS) ve %35 (UD) olduğu söylenebilir.

Tablo 4.7. Farklı bariyer derinlikleri için hesaplanan genlik azaltma oranları.

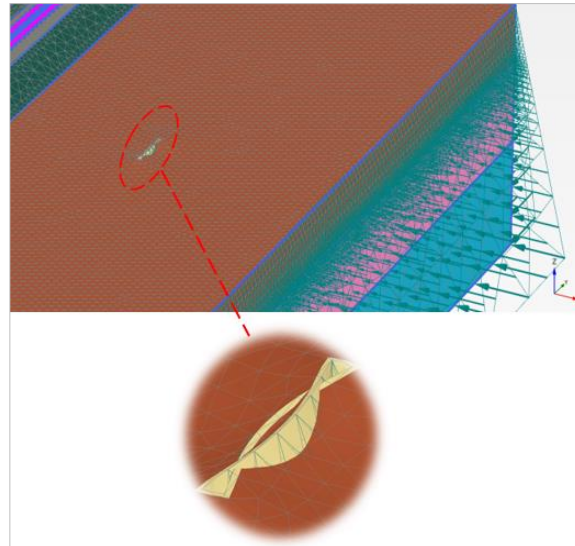
Bariyer Derinliği	PPV (mm/s)	A_R	D (H/λ_R)
H=1 m	1.149	0.83	0.2
H=2.5 m	0.893	0.64	0.5
H=5 m	0.461	0.33	1
Hendeksiz Durum	1.380	1	0

Her üç titreşim doğrultusu için tek bir parametre üzerinden değerlendirme yapıldığında ise hendek derinliğinin yarım dalga boyuna (2.5 metre) ulaşması, bariyerin performansında belirgin bir iyileşmeye neden olmuştur. Bu durum hendeksiz senaryoya kıyasla %36'lık bir yalıtımla kendini göstermektedir. Öte yandan, bir dalga boyu derinliğinde açılan 5 metrelik hendek, hendeksiz senaryoya kıyasla %67 daha başarılı bir performans sergilemiştir. Şekil 4.22 incelendiğinde titreşim maksimum genliklerinin tam dalga boyu derinlikli bariyer modeli için her üç doğrultuda da ciddi derecede azaldığı gözlemlenmiştir. Hatta paralel olan EW doğrultusunda bu değer 0.64 mm/s'den 0.18'e düşmüştür. Bu durumda yalnız bu doğrultu için %72'lik bir yalıtım performansından söz etmek mümkündür. Benzer şekilde hatta dik doğrultu için değerlendirme yapılacak olursa bariyer performansının pik hız değerlerini 0.51 mm/s'den 0.13 mm/s'ye düşürmesi nedeniyle %75 olduğunu söylemek olasıdır. Düşey doğrultuda ise bariyersiz durumda 1.1 mm/s olarak elde edilen pik genlik değerinin 0.4 mm/s'ye düşmüş olması bu doğrultuda %64 seviyelerinde bir izolasyon gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların harmonik yükü esas alan çalışmaları ile karşılaştırıldığında bulguların konu ile ilgili mevcut literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Nümerik analiz sonucu elde edilen genlik azaltma oranlarının mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması.

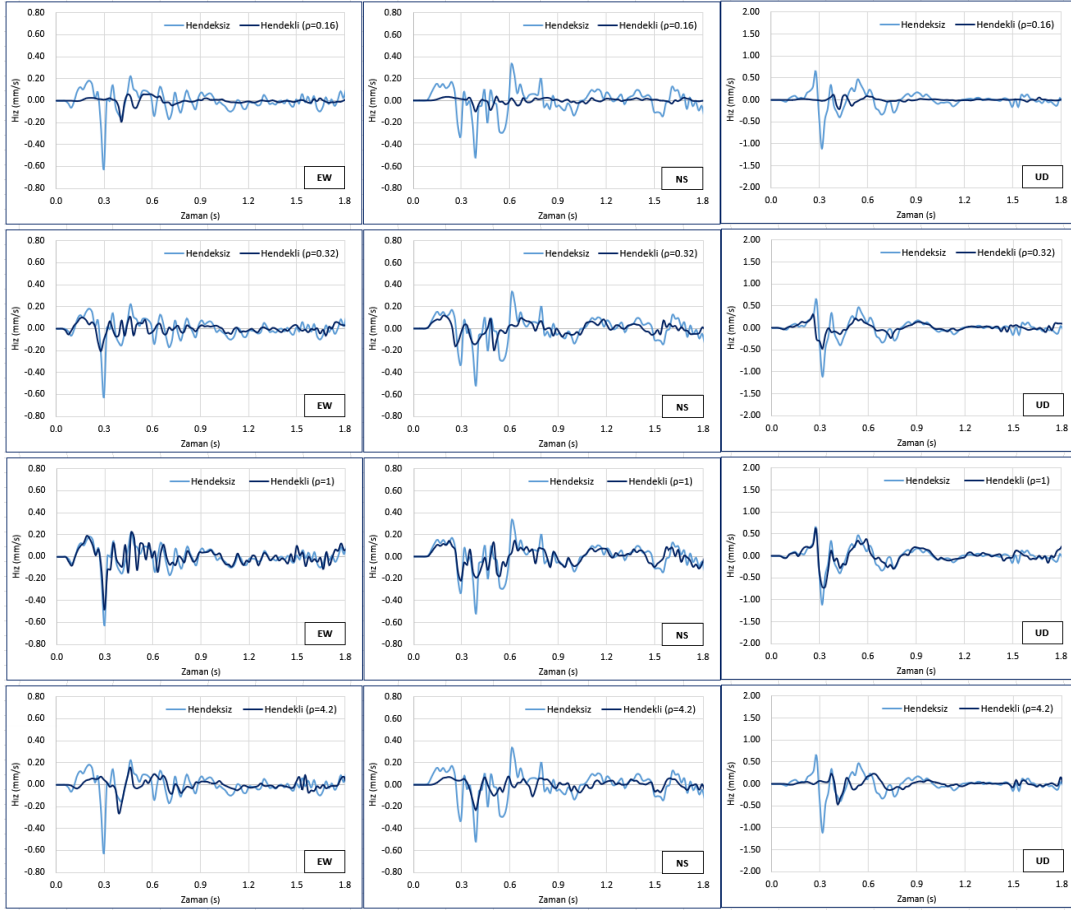
Dalga boyunun 5 m yerine 4 metre olabileceği varsayımı da dikkate alınmış ve her iki durumda elde edilecek boyutsuz derinliklere karşı gelen genlik azaltma oranları Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Tez kapsamında dalga boyunun 5 m olması kabulüyle bariyer performansı boyutsuz derinliğin 0.2 olması durumunda Dolling’in çalışması (1965) ile oldukça uyumluyken, 0.5 ve 1 olan boyutsuz derinlik değerlerine karşı gelen genlik azaltma oranları ise Tsai ve Chang’ın (2009) araştırmaları ile oldukça benzerlik göstermektedir (Şekil 4.23). Parametrik araştırma için 5 m’den daha derin hendekler de incelenmek istenmiş ancak yanal zemin itkisi kaynaklı stabilite problemlerinden ötürü PLAXIS yazılımında anlamlı sonuçlar elde edilememiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. 8 m derinliğindeki hendek 3D modelinin yanal zemin itkisiyle göçmesi.

4.3.3.2. Bariyer yoğunluğunun çevre titreşimleri üzerindeki etkisinin incelenmesi

Bu bölümde 5 m uzunlukta, 2.5 m derinlikte ve 0.5 m genişlikte olmak üzere farklı malzeme yoğunluklarına sahip dört farklı tip bariyer için pasif yalıtım durumları analiz edilmiştir. Bariyer yoğunlukları seçilirken mevcut literatür ile kıyaslama yapabilmeye elverişli olacak şekilde belirlenen malzeme birim hacim ağırlıklarının alt ve üst değerleri sırasıyla esnek ve rijit bir bariyeri temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Buradan hareketle ρ_d bariyer malzeme yoğunluğunu, ρ_z ise zeminin yoğunluğunu göstermek üzere $\rho = \rho_d / \rho_z$ oranları sırasıyla 0.16, 0.32, 1 ve 4.2 t/m³ olan dalga bariyerleri için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bariyersiz model üzerinde seçilen nokta için hesaplanan PPV değerleri bariyerli durumda aynı ölçüm noktası için elde edilen parçacık hızı değerleri ile karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki A_R (genlik azaltma oranı) bakımından değerlendirilmiştir. Bariyer malzeme yoğunluğunun zemin yoğunluğuna oranının (ρ) 0.16 olduğu senaryoda EW doğrultusunda bariyerli durumda elde edilen pik hız değeri 0.19 mm/s, NS doğrultusunda 0.1 mm/s ve düşey doğrultuda 0.2 mm/s olarak elde edilmiştir. Bariyersiz modelde ise bu değerler sırasıyla 0.64 mm/s, 0.51 mm/s ve 1.1 mm/s'dir. Bu durumda EW doğrultusunda bariyerin performansı %70, NS doğrultusunda %80 ve UD doğrultusunda %82 olarak hesaplanabilir. ρ_d / ρ_z oranının 0.32 olduğu ikinci modelde bariyerli durumda Doğu-Batı doğrultusunda elde edilen pik hız değeri 0.2 mm/s, Kuzey-Güney doğrultusunda 0.2 mm/s ve düşey doğrultuda 0.42 mm/s olarak belirlenmiştir (Şekil 4.25). Bu durumda $\rho = 0.16$ durumu ile kıyaslandığında bariyer malzeme yoğunluğunun artmasının EW ve NS yönlerinde titreşim seviyelerini çok değiştirmemesine karşın düşey yönde bu değerlerin büyümesine sebep olduğu sonucuna varılabilir. $\rho_d / \rho_z = 0.32$ olması durumunda dalga yalıtım etkinliği üç titreşim doğrultusu için ayrı ayrı incelendiğinde EW, NS ve UD doğrultularında sırasıyla %68, %60 ve %62'lik performans elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.25. Farklı bariyer yoğunlukları için üç doğrultuda hız-zaman ilişkileri.

Sırasıyla $p=1$ ve $p=4.2$ durumları incelendiğinde hatta paralel titreşim doğrultusunda pik yer hızı değerleri 0.48 mm/s ve 0.26 mm/s; hatta dik titreşim doğrultusu için 0.28 mm/s ve 0.23 mm/s için; düşey titreşim doğrultusu için ise 0.71 mm/s ve 0.45 mm/s olarak belirlenmiştir. Bu durumda malzeme yoğunluğunun bariyer yoğunluğuna eşit olarak dikkate alınması pik hız değerleri bakımından Doğu-Batı yönünde %25 ve düşey yönde %35'lik bir azalım sağlamıştır. Rijit bir bariyer uygulamasını temsilen bariyer yoğunluğunun oldukça büyük seçildiği son parametrik çalışmada ise hatta paralel titreşim doğrultusundaki pik genlikler 0.64 mm/s'den 0.26 mm/s'ye; hatta dik doğrultudaki pik genlikler 0.51 mm/s'den 0.23 mm/s'ye ve düşey doğrultudaki pik genlikler 1.1 mm/s'den 0.45 mm/s'ye düşmüştür. Bu durumda Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlerinde genlik azalma oranlarının sırasıyla %59 ve %54 olduğu ifade edilebilir. Düşey yönde ise bu değer yine %59 civarındadır. Ayrıca hem bariyersiz hem de bariyerli nümerik modellerden elde edilen pik partikül hız değerleri arasındaki ilişkiden hareketle genlik azaltma oranları (A_R) hesaplanmıştır. Tablo 4.8 incelendiğinde bariyer yoğunluğunun zemin yoğunluğuna oranının 0.16 olması durumunda yarı dalga boyu derinliğindeki bariyer ile %79'luk bir performans elde

edilmiş olup bu sonuç hayli dikkat çekicidir. $\rho_d/\rho_z = 0.32$ olacak şekilde analiz edilen titreşim bariyeri için elde edilen genlik azaltma oranı 0.39 olup bu değer %61'lik bir izolasyon performansına işaret etmektedir.

Tablo 4.8. Farklı bariyer yoğunlukları için hesaplanan genlik azaltma oranları.

Bariyer yoğunluğu	PPV (mm/s)	A_R
$\rho_d/\rho_z = 0.16$	0.296	0.21
$\rho_d/\rho_z = 0.32$	0.544	0.39
$\rho_d/\rho_z = 1$	0.700	0.66
$\rho_d/\rho_z = 4.2$	0.570	0.41
Hendeksiz Durum	1.380	1

Bariyer malzeme yoğunluğu ve zemin yoğunluğunun eşit olması durumunda ($\rho=1$) elde edilen hız-zaman ilişkileri incelendiğinde (Şekil 4.23) Doğu-Batı ve düşey titreşim doğrultularında dalga yayılımının benzer karakterde olduğu ancak hatta dik yayılma doğrultusu için gerek dalga yayılımının gerekse elde edilen pik değerlerin oldukça farklılık gösterdiği sonucuna varılabilir. Sonuçlar her üç bileşenin birlikte dikkate alındığı pik partikül hız değeri üzerinden incelendiğinde bariyer yoğunluğu ile zemin yoğunluğunun eşit olduğu koşullarda yalıtım performansının %34 mertebelerinde olduğu hesaplanmıştır. Bariyer malzemesi olarak yoğunluğu zemine göre oldukça yüksek bir malzemenin seçildiği nümerik modelde ise ($\rho_d/\rho_z = 4.2$) dalga yalıtım sisteminin performansı %59 olarak tespit edilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalar, doğal saha koşullarında gerçek yük kaynağına dayalı olarak yürütülmüştür. Bulgular demiryollarına yakın, özellikle zayıf zemin koşullarına sahip yeni yerleşim alanlarında konut ve endüstriyel tesislerin planlanması aşamasında projenin fizibilitesini değerlendirmek için uzmanlar ve yöneticiler tarafından kullanılabilir önemli ölçüm verilerinin analizini içermektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları, araştırmacıların kısa sürede düşük maliyetli titreşim azaltıcı yalıtım araçlarını geliştirmek için daha kapsamlı araştırma stratejileri oluşturmalarına katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda, tren kaynaklı dalga yayılım problemlerinin analizi için kurulacak matematik modellerin geliştirilmesine de destek olacaktır. Dalga iletimi bakımından en elverişsiz zemin koşullarında oluşan çevresel titreşimlerin yapısal hasar, endüstriyel üretimde kullanılan hassas ekipmanlar ve insan konforu açısından olumsuz etkilerini yerinde azaltabilmek amacıyla titreşim kaynağı ile korunacak yapı arasına, titreşim enerjisini doğrudan yayılma alanında sönümleyen bir pasif dalga bariyer modelinin geliştirilmesi bu tezin en önemli çıktısıdır. Çalışmanın özgün değeri ise taşıma gücü açısından en elverişsiz zeminde tam ölçekte bariyer uygulamalarıyla yapılan bir dizi yalıtım performans testlerinin hızlı demiryolu trafiğinin en yüksek hızında gerçek dinamik yük kaynağına bağlı doğal saha koşulları altında gerçekleştirilmesidir. Düşük empedanslı gaz beton panellerin açık bir hendeğe ilk kez iç cidar olarak kullanıldığı tasarım özelliğinin yanı sıra bariyerin içinde kullanılan geri dönüştürülebilir atık malzemenin titreşim yalıtımına ilave katkısının araştırılması çalışmanın katma değerini artırmıştır. Bariyerli ve bariyersiz saha koşullarına göre ölçülen zemin ve bina titreşim kayıtlarının analizine dayalı önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Yaygın kabul gören teoremin aksine, saha ölçümlerinde düşey titreşimlerin her zaman baskın karakterde olmadığı görülmüştür. Özellikle dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça alüvyon zemin koşullarında yüksek hızlı tren kaynaklı yer titreşimlerinin yatay bileşenlerinin düşey bileşenlerinden daha büyük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.

- Kazıldığında yanal stabilite sorunu olmayan zeminlerde en az bir dalga boyu derinliğinde uygulanan açık hendeklerin en etkili titreşim yalıtım aracı olduğu literatürden bilinmektedir. Derin kazılarda kendini tutma özelliği olmayan zayıf zeminlerde (alüvyon vb.) açık hendek yönteminin mühendislik pratiğinde karşılığı yoktur. Bu problem hendek tipi dalga bariyerinin iç yüzeylerden desteklenmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak burada zemini bir istinat duvarı gibi destekleyecek fakat çok rijit olmayacak bir malzemenin kullanılması yani ince cidarlı ve düşük empedanslı olması dalgaların iletim mekaniği açısından teorik olarak sağlanması gereken çok önemli bir koşuldur. Dinamik yük kaynağından bariyer duvarına yaklaşan yüzey titreşim dalgalarına, içinden geçtiği ortam değişikliği hissettirilmeyecek şekilde hendek duvar malzemesinin gaz beton olarak seçilmesi literatüre ilk defa giren özgün bir konu olmuştur. Bu tezde, ilk defa dalga boyunun yaklaşık olarak yarı derinliğinde uygulanan gaz beton duvarlı bariyer ile oldukça yüksek yalıtım performansı elde edilmiştir.
- Gaz beton duvarlı hendek tipi pasif dalga bariyeri yüksek hızlı demiryolu güzergâhının yakınındaki dinamik özellikleri ayarlanmış tam ölçekli test binasının önüne açılmıştır. Bariyer iç dolgu malzemesinin yer hareketi dalgalarını karşıya iletme ve yansıtma kapasitesi, insan algısı ve yapı hasarı açısından incelenmiştir. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında bariyerin hemen önünde serbest zeminde seçilmiş bir ölçüm noktasında geriye yansıyan dalgaların titreşim hız seviyelerine odaklanılmıştır. En iyi performansı sırasıyla strafor köpüklü ve cam kürecik malzemeli bariyer modelleri göstermiştir. Söz konusu dolgu malzemeleriyle içi boş duruma göre yansıyan dalgaların etkileri %50 azaltılmıştır.
- Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında ise pasif titreşim yalıtım bariyerinde kullanılan iç dolgu malzemesinin bariyer arkasındaki zemine titreşim dalgalarını aktarma özelliği yani titreşim enerjisini soğurma performansı doğrudan zemin yüzeyinde ölçülerek belirlenmiştir. En iyi titreşim yalıtım performansını strafor köpüklü dalga bariyer modeli göstermiştir. Strafor köpük dolgu malzemesiyle boş dalga bariyer uygulamasına göre yalıtımda %60 ilave performans elde edilmiştir. İkinci ve üçüncü başarılı titreşim yalıtım performansı gösteren dolgu malzemeleri cam kürecik ve odun talaşı şeklinde sıralanmaktadır.

- Dalga boyunun yarı derinliğinde açılan gaz beton duvarlı dalga bariyer uygulamasından elde edilen titreşim sonuçları, hız seviyeleri açısından değerlendirildiğinde serbest zemin titreşimlerinde %35'e varan bir oranla oldukça başarılı bir yalıtım performansı göze çarpmaktadır.
- Bariyer arkasında bina zemin katında seçilmiş bir ölçüm noktasında en iyi titreşim yalıtım performansını odun talaşlı dalga bariyer modeli göstermiştir. Dolgu malzemesi olarak odun talaşının kullanılmasıyla boş dalga bariyer uygulamasına göre yalıtımda %27.5 ilave performans elde edilmiştir. Bina üst katında en iyi titreşim yalıtımını strafor köpüklü dalga bariyer modeli göstermiştir. Söz konusu dolgu malzemesi boş duruma göre yalıtımda %35 ilave performans sağlamıştır. Üst kat titreşimlerinin yalıtımında su ve cam kürecik dolgu malzemesinin etkili olmadığı da dikkate alınmalıdır.
- Dalga boyunun yarı derinliğinde açılan gaz beton duvarlı dalga bariyer uygulamasından elde edilen titreşim sonuçları hız seviyeleri açısından değerlendirildiğinde, bina zemin katında %50'ye varan bir oranla oldukça başarılı bir yalıtım performansı göze çarpmaktadır.
- Bina zemin katına yerleştirilen M153 ivmeölçerinin kaydettiği veriler hız seviyesi cinsinden DIN4150-2'de verilen titreşim hız seviyeleri ile kıyaslandığında, Doğu-Batı doğrultusunda odun talaşlı bariyer senaryosu için bu değerlerin yönetmelikte 0.15 mm/s olarak tanımlanan algı eşiği seviyesinden "hissedilmez" seviyesine düştüğü gözlemlenmiştir.
- Bina üst katına yerleştirilen M155 ivmeölçerinin kaydettiği veriler hız seviyesi cinsinden DIN4150-2'de verilen titreşim hız seviyeleri ile kıyaslandığında bariyersiz duruma göre içi boş ve strafor köpük dolgulu bariyer senaryoları için bu değerlerin hem Doğu-Batı hem de Kuzey-Güney doğrultularında algı eşiğinin altına düşürüldüğü görülmektedir.
- Bina alt katında tüm dolgu malzemeleri için düşey doğrultuda insan algısı bakımından FTA'da (2006) 65 VdB olarak tanımlanan eşik değerinin altına düşüldüğü saptanmıştır.
- Çalışmanın nümerik modelleme bölümü sonsuz zemin ortamının ve bu zemin üzerinde konuşlandırılmış demiryolu trafiğinin ürettiği titreşimlerin simülasyonuna odaklanmakta ve gerek zeminin kendi içerisindeki bilinmezliği gerekse titreşimlerin dinamik karakteristiği sebebiyle oldukça karmaşık bir mühendislik problemi olarak değerlendirilmektedir. İncelenen problemin

karmaşık doğası gereği tek bir model için ortalama 13 saati aşan analiz süreleri modeli geliştirmeye yönelik müdahale yapmak noktasında da sınırlayıcı bir faktördür. Buna rağmen saha verileriyle ortalama %20 hata payı ile çalışan bir matematik model oluşturulmuştur.

- Oluşturulan sayısal modelden elde edilen partikül ivme değerlerinden hareketle içi boş bariyerin bariyersiz duruma kıyasla dalga yalıtımında %40 performans sağladığı görülmüştür. Bu değer bariyer arkasındaki M150 ivmeölçeri için bariyersiz saha koşullarına göre deneysel olarak da elde edilmiş olması tezin dikkat çekici bulgularındandır.
- Gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda elde edilen verilerin mevcut literatür ile uyum içerisinde olması kurulan sayısal modelin problemi iyi temsil ettiğini göstermektedir.
- Farklı hendek derinliklerinin dalga bariyerinin yalıtım performansına etkisinin araştırıldığı sayısal analizlerde yaklaşık bir dalga boyu derinlikteki gaz beton cidarlı hendek için %70'e varan izolasyon kapasitesi elde edilmiştir.
- Farklı hendek yoğunluklarının bariyerin dalga enerjisini yutma kapasitesine katkısının araştırıldığı parametrik çalışmalarda çok düşük yoğunluklu dalga bariyerlerinin derinlikleri bir dalga boyundan küçük olmasına rağmen %79 mertebelerinde yalıtım performansı gösterdikleri saptanmıştır. Harmonik yükün esas alındığı deneysel ve sayısal çalışmalarda bu performans genellikle en az bir dalga boyu derinliğe sahip hendeklerle elde edilebileceği belirtilmiştir.
- Bariyer yoğunluğunun zemin yoğunluğu ile eşit seçildiği nümerik analizlerde titreşim hareketinin EW ve NS bileşenleri oldukça benzer dalga yayılımı mekanizmasına sahiptir. Oldukça küçük genlik farklarına rağmen dalganın zemin modeli içerisindeki hareketi benzer karakteristiklere sahiptir.
- Parametrik çalışmanın dikkat çekici sonuçlarından bir diğeri yüksek yoğunluklu malzemenin bariyer olarak kullanılması durumunda %59 mertebelerinde yalıtım performansı elde edilmiş olmasıdır. Bu durum mevcut literatür ile oldukça uyumludur.

Bu tez çalışması sonucunda yüksek hızlı trenlerin olumsuz çevresel titreşim etkilerini yapılar üzerinde azaltmak için uygulanabilecek ve ticarileştirme potansiyeli olan titreşim yalıtım performansı yüksek, gaz beton duvarlı, tercihe göre iç dolgusunda geri dönüştürülebilir atık malzeme kullanılabilecek, hendek tipi pasif dalga bariyer modeli

geliştirilmiştir. Çalışma süreci boyunca yapılan titreşim ölçümleri ve bu ölçümlere ait elde edilen bulguların ortaya koyduğu sonuçlar doğrultusunda, ileriye dönük devam edecek çalışmalarda özellikle demiryolu İhata hattı içerisinde ölçüm alınması önerilmektedir. Bilindiği üzere İhata, demiryolu koridoruna insanların ve hayvanların girişini engellemek için üretilen bir çözüm olup, malzeme ve teknik olarak farklı kombinasyonlardaki uygulamaları mevcuttur. Titreşim kaynağı olarak hızlı tren ve altyapısı bu hat içerisinde yer almakta olup, ray, balast tabakası yüzeyi ve balast sınır noktalarında alınacak titreşim ölçümleri ile kaynağı ve kaynaktaki titreşim etkilerinin değişimini doğrudan ölçerek yayılım alanındaki farklılaşmayı daha doğru tanımlamak mümkün olacaktır. Ayrıca geliştirilen sayısal modelin çeşitli yük kaynaklarının simülasyonu, farklı arazi koşullarının ve zemin tabakalanmasının dalga yayılımına etkisinin değerlendirilmesi, bariyer sisteminin geometrisinin dalga mekanizmasına etkisi bakımından geniş perspektifte araştırmalara olanak sağlayacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Aboudi, J. (1973). Elastic waves in half-space with thin barrier. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 99(1), 69–83.
- Adam, M., & Chouw, N. (2001). Reduction of footing response to man-made excitations by using a wave impeding barrier. *Journal of applied mechanics*, 4, 423–431.
- Adam, M., Pflanz, G., & Schmid, G. (2000). Two-and three-dimensional modelling of half-space and train-track embankment under dynamic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(8), 559–573.
- Adam, M., Schmid, G., & Chouw, N. (2000). Investigation of ground motions and structural responses in near field due to incident waves. *Proc. of 12th World Conference on Earthq. Eng., Auckland, New Zealand*, 1313.
- Adam, M., & Von Estorff, O. (2005). Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers and Structures*, 83(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.010>
- Ahmad, S., Al-Hussaini, T. M., & Fishman, K. L. (1996). Investigation on active isolation of machine foundations by open trenches. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), 454–461.
- Ainalis, D., Ducarne, L., Kaufmann, O., Tshibangu, J.-P., Verlinden, O., & Kouroussis, G. (2018). Improved analysis of ground vibrations produced by man-made sources. *Science of the total environment*, 616, 517–530.
- Al-Hussaini, T. M. (1992). *Vibration isolation by wave barriers*. State University of New York at Buffalo.
- Alzawi, A., & Hesham El Naggar, M. (2011). Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3), 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.08.010>
- Andersen, L., & Liingaard, M. (2021). Vibration screening with sheet pile walls. *İçinde Environmental Vibrations: Prediction, Monitoring, Mitigation and Evaluation* (ss. 429–437). CRC Press.
- Angel, Y. C., & Achenbach, J. D. (1984). Reflection and transmission of obliquely incident Rayleigh waves by a surface-breaking crack. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75(2), 313–319.
- Auersch, L. (1988). Zur entstehung und ausbreitung von schienenverkehrserschütterungen: theoretische untersuchungen und messungen am hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental. *BAM-Forschungsbericht 155*, Berlin.

- Auersch, L. (2008). The influence of the soil on track dynamics and ground-borne vibration. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, Munich, Germany, 4-8 September 2007*, 122–128.
- Auersch, L. (2012). Train induced ground vibrations: different amplitude-speed relations for two layered soils. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(5), 469–488.
- Bahrekazemi, M. (2004). *Train-induced ground vibration and its prediction* [Doktora tezi]. Royal Institute of Technology.
- Barber, J. R. (1996). Surface displacements due to a steadily moving point force. *Journal of Applied Mechanics*, 63, 245–251.
- Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 60–69.
- Baziar, M. H., Kazemi, M., & Shahnazari, H. (2019). Mitigation of ground vibrations induced by high speed railways using double geofoam barriers: centrifuge modeling. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(6), 712–728.
- Biagi, P. F., Gegechkory, T. S., Its, E. N., Manjgaladze, P., Sgrigna, V., & Zilpimiani, D. (1990). Transmission and reflection of Rayleigh waves at a thin low velocity vertical layer: a laboratory and theoretical study. *pure and applied geophysics*, 133, 317–327.
- Bode, C., Hirschauer, R., & Savidis, S. A. (2002). Soil–structure interaction in the time domain using halfspace Green’s functions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(4), 283–295.
- Bose, T., Choudhury, D., Sprengel, J., & Ziegler, M. (2018). Efficiency of Open and Infill Trenches in Mitigating Ground-Borne Vibrations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001915](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001915)
- Branderhorst, J. (1997). Modellen voor het boeggolfprobleem bij hogesnelheidstreinen. Ontwerp en validatie met behulp van de resultaten van de proef Amsterdam-Utrecht. *Master’s Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands*.
- Bratov, V., Petrov, Y., Semenov, B., & Darienko, I. (2015). Modelling the high-speed train induced dynamic response of railway embankment. *Materials Physics and Mechanics*, 22(1), 69.
- Bullitt, J. T., & Toksöz, M. N. (1985). Three-dimensional ultrasonic modeling of Rayleigh wave propagation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1087–1104.
- Buonsanti, M., Cirianni, F., Leonardi, G., Santini, A., & Scopelliti, F. (2009). Mitigation of railway traffic induced vibrations: The influence of barriers in elastic half-space. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2009.
- Cai, C., Gao, L., He, X., Zou, Y., Yu, K., & Wu, D. (2021). The surface wave attenuation zone of periodic composite in-filled trenches and its isolation performance in train-induced ground vibration isolation. *Computers and Geotechnics*, 139, 104421.

- Cao, Z., Guo, T., Zhang, Z., & Li, A. (2018). Measurement and analysis of vibrations in a residential building constructed on an elevated metro depot. *Measurement*, 125, 394–405.
- Çelebi, E. (2006). Three-dimensional modelling of train-track and sub-soil analysis for surface vibrations due to moving loads. *Applied Mathematics and Computation*, 179(1), 209–230.
- Çelebi, E., Firat, S., Beyhan, G., Çankaya, I., Vural, I., & Kirtel, O. (2009). Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.08.007>
- Çelebi, E., & Göktepe, F. (2012). Non-linear 2-D FE analysis for the assessment of isolation performance of wave impeding barrier in reduction of railway-induced surface waves. *Construction and Building Materials*, 36, 1–13.
- Çelebi, E., & Kirtel, O. (2013). Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations. *Construction and Building Materials*, 42, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.071>
- Celebi, E., & Schmid, G. (2005). Investigation of ground vibrations induced by moving loads. *Engineering Structures*, 27(14), 1981–1998. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.05.011>
- Chew, J. H., & Leong, E. C. (2019). Field and numerical modelling of sand-rubber mixtures vibration barrier. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105740.
- Chiang, C. H., & Tsai, P. H. (2014). A numerical study of the screening effectiveness of open trenches for high-speed train-induced vibration. *Shock and Vibration*, 2014(February). <https://doi.org/10.1155/2014/489090>
- Chouw, N. (1994). Wave propagation from the source via the subsoil into the building. *Proceedings of the 1st. International Workshop Wave*, 94, 33–46.
- Chouw, N., Le, R., & Schmid, G. (1991). Propagation of vibration in a soil layer over bedrock. *Engineering analysis with boundary elements*, 8(3), 125–131.
- Comina, C., & Foti, S. (2007). Surface wave tests for vibration mitigation studies. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(10), 1320–1324.
- Coulier, P., Cuéllar, V., Degrande, G., & Lombaert, G. (2015). Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 238–253. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.04.007>
- Coulier, P., & Hunt, H. E. M. (2014). Experimental study of a stiff wave barrier in gelatine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 459–463.
- Crispino, M., & D’apuzzo, M. (2001). Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building. *Journal of Sound and Vibration*, 246(2), 319–335.

- Dally, J. W., & Lewis III, D. (1968). A photoelastic analysis of propagation of Rayleigh waves past a step change in elevation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(2), 539–563.
- De Bremaecker, J. C. (1958). Transmission and reflection of Rayleigh waves at corners. *Geophysics*, 23(2), 253–266.
- Dijkmans, A., Ekblad, A., Smekal, A., Degrande, G., & Lombaert, G. (2016). Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 55–69.
- Dolling, H.-J. (1970). Die Abschirmung von Erschütterungen durch Bodenschlitze. *Die Bautechnik*, Heft 5, (1970) S. 151-158.
- Dolling, H. J. (1965). Schwingungsisolierung von Bauwerken durch tiefe auf geeignete Weise stabilisierte Schlitze. *VDI-Berichte*, 88, 3741.
- Faizan, A. A. (2023). *Yüksek Hızlı Tren Kaynaklı Titreşimlerin Zemin ve Yapılar Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: DeneySEL Ve Sayısal Çalışma* [Doktora tezi]. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- Feng, S.-J., Zhang, X.-L., Wang, L., Zheng, Q.-T., Du, F.-L., & Wang, Z.-L. (2017). In situ experimental study on high speed train induced ground vibrations with the ballast-less track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 195–214.
- Fiala, P., Degrande, G., & Augusztinovicz, F. (2007). Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic. *Journal of Sound and Vibration*, 301(3–5), 718–738.
- Forchap, E., & Verbic, B. (1994). Wave propagation and reduction of foundation vibrations. *Berg-Verlag GmbH, Bochum*, 165–178.
- François, S., Schevenels, M., Thyssen, B., Borgions, J., & Degrande, G. (2012). Design and efficiency of a composite vibration isolating screen in soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39, 113–127.
- Fu, Q., & Zheng, C. (2014). Three-dimensional dynamic analyses of track-embankment-ground system subjected to high speed train loads. *Sci World J*, 2014, 1–19.
- Galvín, P., & Domínguez, J. (2009). Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the Córdoba–Málaga line. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 641–657.
- Gao, Y., Feng, Q., & Cui, J. (2014). A simple method for dynamically measuring the diameters of train wheels using a one-dimensional laser displacement transducer. *Optics and Lasers in Engineering*, 53, 158–163.
- Garinei, A., Risitano, G., & Scappaticci, L. (2014). Experimental evaluation of the efficiency of trenches for the mitigation of train-induced vibrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 303–315.
- Göktepe, F. (2013). *Yüksek hızlı trenlerin çevre yapılarında oluşturduğu titreşimlerin önlenmesi için bariyer sistemlerin etkinliğinin parametrik olarak incelenmesi* [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.

- Hajek, J. J., Blaney, C. T., & Hein, D. K. (2006). Mitigation of highway traffic-induced vibration. *2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, 1–13.
- Hao, H., Ang, T. C., & Shen, J. (2001). Building vibration to traffic-induced ground motion. *Building and Environment*, 36(3), 321–336.
- Haupt, W. A. (1981). Model tests on screening of surface waves. *Proceedings of Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1981*.
- Haupt, W. A. (1995). Wave propagation in the ground and isolation measures. *Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 985–1016.
- Hildebrand, R. (2004). Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 24(5), 411–424.
- Howard, I. L., & Warren, K. A. (2009). Finite-element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading. *Journal of Transportation Engineering*, 135(2), 53–61.
- Huang, H. W., Zhang, B., Wang, J., Menq, F.-Y., Nakshatrala, K. B., Mo, Y. L., & Stokoe, K. H. (2021). Experimental study on wave isolation performance of periodic barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 144, 106602.
- İstegün, B., Çelebi, E., Kırtel, O., Faizan, A. A., Göktepe, F., Zülfiakar, A. C., Subaşı, A., & Navdar, M. B. (2023). Mitigation of high-speed train-induced environmental ground vibrations considering open trenches in the soft soil conditions by in-situ tests. *Transportation Geotechnics*, 40, 100980.
- Jain, A., & Soni, D. K. (2007). Foundation vibration isolation methods. *Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics*, 14–16.
- Jauhari, N., Hegde, A., & Chakraborty, P. (2023). Full scale field studies for assessing the vibration isolation performance of single and dual trenches. *Transportation Geotechnics*, 39(January), 100932. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100932>
- Jones, C. J. C., & Block, J. R. (1996). Prediction of ground vibration from freight trains. *Journal of sound and vibration*, 193(1), 205–213.
- Ju, S.-H., & Lin, H.-T. (2004). Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(12), 993–1002.
- Ju, S.-H., & Lin, H.-T. (2008). Experimentally investigating finite element accuracy for ground vibrations induced by high-speed trains. *Engineering Structures*, 30(3), 733–746.
- Ju, S. H., & Ni, S. H. (2007). Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31(10), 1239–1255. <https://doi.org/10.1002/NAG.598>

- Kattis, S. E., Polyzos, D., & Beskos, D. E. (1999). Vibration isolation by a row of piles using a 3-D frequency domain BEM. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46(5), 713–728.
- Kausel, E. (1994). Thin-layer method: Formulation in the time domain. *International journal for numerical methods in engineering*, 37(6), 927–941.
- Kim, B.-G., Lee, S., Enoki, M., & Kishi, T. (1998). Direct and continuous measurement of depth-dependent reflection coefficients of Rayleigh waves for surface discontinuity: Normal slot. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 2733–2740.
- Klein, R., Antes, H., & Le Houédec, D. (1997). Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches. *Computers & Structures*, 64(1–4), 809–817.
- Knopoff, L., & Gangi, A. F. (1960). Transmission and reflection of Rayleigh waves by wedges. *Geophysics*, 25(6), 1203–1214.
- Kouroussis, G., Pauwels, N., Brux, P., Conti, C., & Verlinden, O. (2014). A numerical analysis of the influence of tram characteristics and rail profile on railway traffic ground-borne noise and vibration in the Brussels Region. *Science of the Total Environment*, 482, 452–460.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall Inc.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421–427.
- Lamb, H. (1903). On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid. *Proceedings of the royal society of London*, 72, 128–130.
- Lapwood, E. R. (1961). The transmission of a Rayleigh pulse round a corner. *Geophysical Journal International*, 4(Supplement_1), 174–196.
- Li, H., Pan, Q., Zhang, X., & An, Z. (2020). An approach to size sub-wavelength surface crack measurements using Rayleigh waves based on laser ultrasounds. *Sensors*, 20(18), 5077.
- Li, T., Su, Q., & Kaewunruen, S. (2020). Seismic metamaterial barriers for ground vibration mitigation in railways considering the train-track-soil dynamic interactions. *Construction and Building Materials*, 260, 119936. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119936>
- Liu, H., Huang, X., Ding, P., & Wang, B. (2023). Reliability evaluation method of vibration isolation performance of nonlinear isolator. *Journal of Sound and Vibration*, 551, 117616.
- Lyratzakis, A., Tsompanakis, Y., & Psarropoulos, P. N. (2021). Mitigating high-speed train vibrations with EPS blocks for various soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106482.
- Madheswaran, C. K., Natarajan, K., Sundaravadivelu, R., & Boominathan, A. (2009). Effect of open or concrete-infilled trenches on screening of ground vibration during pile driving. *Experimental Techniques*, 33(2).
- Mahdavisefat, E., Salehzadeh, H., & Heshmati, A. A. (2018). Full-scale experimental study on screening effectiveness of SRM-filled trench barriers. *Géotechnique*, 68(10), 869–882.

- Majumder, M., & Venkatraman, S. (2023). A state-of-the-art review paper on the vibration screening techniques using open and in-filled trenches. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(7), 2693–2708. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00613-5>
- Martel, L., Munasinghe, M., & Farnell, G. W. (1977). Transmission and reflection of Rayleigh wave through a step. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(5), 1277–1290.
- Massarsch, K. R. (1991). Ground vibration isolation using gas cushions. *Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1461–1470.
- Massarsch, K. R. (2005). Vibration isolation using gas-filled cushions. *Soil dynamics symposium in honor of professor Richard D. Woods*, 1–20.
- McGarr, A., & Alsop, L. E. (1967). Transmission and reflection of Rayleigh waves at vertical boundaries. *Journal of Geophysical research*, 72(8), 2169–2180.
- Miller, G. F., Pursey, H., & Bullard, E. C. (1955). On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 233(1192), 55–69.
- Moormann, C., Lehn, J., Aschrafi, J., & Sarkar, D. (2016). Numerical Investigations on Track-substructure System Considering the Effect of Different Train Speeds. *Procedia engineering*, 143, 1093–1099.
- Naggar, M. H. El, & Chehab, A. G. (2005). Vibration barriers for shock-producing equipment. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 297–306.
- Naghizadehrokni, M., Ziegler, M., & Sprengel, J. (2020). A full experimental and numerical modelling of the practicability of thin foam barrier as vibration reduction measure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139(August), 106416. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106416>
- O'brien, J., & Rizos, D. C. (2005). A 3D BEM-FEM methodology for simulation of high speed train induced vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(4), 289–301.
- Öztürk, Z. & Arlı, V. (2009). Demiryolu mühendisliği. *ATM Matbaası*. İstanbul, Türkiye.
- Pao, Y., & Mow, C. C. (1963). Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacle. *Journal of Applied Physics*, 34(3), 493–499.
- Peplow, A., Persson, P., & Andersen, L. V. (2021). Evaluating annoyance mitigation in the screening of train-induced noise and ground vibrations using a single-leaf traffic barrier. *Science of the Total Environment*, 790, 147877.
- Pflanz, G., Hashimoto, K., & Chouw, N. (2002). Reduction of structural vibrations induced by a moving load. *Journal of applied mechanics*, 5, 555–563.
- Pilant, W. L., Knopoff, L., & Schwab, F. (1964). Transmission and reflection of surface waves at a corner: 3. Rayleigh waves (experimental). *Journal of geophysical research*, 69(2), 291–297.
- Rayleigh, Lord. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *Proceedings of the London mathematical Society*, 1(1), 4–11.

- Richart, F.E., Hall, J.R. & Woods, R.D. (1970). *Vibrations of Solids and Foundations*. Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics. USA.
- Sadegh-Azar, P. R. (2008). *Erschütterungsreduktion durch aufgeschäumte Isolierkörper im Boden* [Doktora tezi]. Aachen, Techn. Hochsch.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of geotechnical engineering*, 112(11), 1016–1032.
- Sitharam, T. G., Sebastian, R., & Fazil, F. (2018). Vibration isolation of buildings housed with sensitive equipment using open trenches—case study and numerical simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 344–351.
- Sivakumar Babu, G. L., Srivastava, A., Nanjunda Rao, K. S., & Venkatesha, S. (2011). Analysis and design of vibration isolation system using open trenches. *International Journal of Geomechanics*, 11(5), 364–369.
- Song, W.-J., Popovics, J. S., Aldrin, J. C., & Shah, S. P. (2003). Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(2), 717–725.
- Toygar, O. (2023). *Vibration isolation performance of coupled wave barriers* [Doktora tezi]. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi.
- Toygar, O., & Ulgen, D. (2021). A full-scale field study on mitigation of environmental ground vibrations by using open trenches. *Building and Environment*, 203, 108070.
- Tsai, P. H., & Chang, T. S. (2009). Effects of open trench siding on vibration-screening effectiveness using the two-dimensional boundary element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 865–873.
- Ulgen, D., & Toygar, O. (2015). Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: A full-scale experimental study. *Construction and Building Materials*, 86, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.098>
- Vermeer, P. A., & Brinkgreve, R. B. J. (1998). Plaxis finite element code for soil and rock analyses. *Balkema, Rotterdam-Brookfield, Netherlands*, 1–114.
- Vogel, W., Lieberenz, K., Neidhart, T., & Wegener, D. (2011). Zur dynamischen Stabilität von Eisenbahnstrecken mit Schotter-oberbau auf Weichschichten. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*, 60(9), 46–54.
- Von Wolffersdorff, P.-A. (2010). Ausgewählte Probleme zu statischen und dynamischen Standsicherheits-berechnungen von Staudämmen. *Beiträge zum*, 25, 163–182.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89–107.
- Wang, J.-G., Sun, W., & Anand, S. (2009). Numerical investigation on active isolation of ground shock by soft porous layers. *Journal of sound and vibration*, 321(3–5), 492–509.
- Woods, R. (1968). Screening of Surface Wave in Soils. İçinde *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* (C. 94, Sayı 4, ss. 951–979).

- Xia, H., Chen, J., Wei, P., Xia, C., De Roeck, G., & Degrande, G. (2009). Experimental investigation of railway train-induced vibrations of surrounding ground and a nearby multi-story building. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(1), 137–148. <https://doi.org/10.1007/s11803-009-8101-0>
- Xia, H., & Zhang, N. (2001). Characteristics of traffic induced vibrations and their effects on environments. *Beijing: International Symposium on Traffic Induced Vibrations & Controls*, 83–90.
- Xia, H., Zhang, N., & Cao, Y. M. (2005). Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings. *Journal of Sound and Vibration*. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.01.006>
- Yang, J., Zhu, S., Zhai, W., Kouroussis, G., Wang, Y., Wang, K., Lan, K., & Xu, F. (2019). Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel. *Science of the total environment*, 668, 485–499.
- Yang, Y., & Hung, H. (1997). A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations. *International journal for numerical methods in engineering*, 40(20), 3729–3747.
- Yun, Y., & Mak, C. M. (2010). Assessment of the stability of isolated vibratory building services systems and the use of inertia blocks. *Building and environment*, 45(3), 758–765.
- Zou, C., Wang, Y., Moore, J. A., & Sanayei, M. (2017). Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings. *Science of the Total Environment*, 575, 1339–1351.
- Zou, C., Wang, Y., Wang, P., & Guo, J. (2015). Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot. *Science of the Total Environment*, 536, 761–773.
- Zou, C., Wang, Y., Zhang, X., & Tao, Z. (2020). Vibration isolation of over-track buildings in a metro depot by using trackside wave barriers. *Journal of Building Engineering*, 30(August 2019), 101270. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101270>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Berna İSTEGÜN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2018, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı

YURTDIŞI DENEYİM:

- **Doktora** : 2023, Ocak-Temmuz, Universidad de Oviedo, İspanya

MESLEKİ DENEYİM

- 2016 yılı Ekim ayından bu yana Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- İstegün, B., Çelebi, E., Kırtel, O., Faizan, A. A., Göktepe, F., Zülfikar, A. C., Navdar, M. B. (2023). Mitigation of high-speed train-induced environmental ground vibrations considering open trenches in the soft soil conditions by in-situ tests. *Transportation Geotechnics*, 40, 100980.
- Çelebi, E., Kırtel, O., İstegün, B., Göktepe, F., Navdar, M. B., Subaşı, A., Zülfikar, A. C. (2023). Mitigation of high-speed train induced surface vibrations by open trench with aerated concrete panel walls. *Construction and Building Materials*, 400, 132771.
- Çelebi, E., Kırtel, O., İstegün, B., Burhan, M., Subaşı, A., Göktepe, F., & Zülfikar, A. C. (2024). High-speed train induced environmental vibrations: Experimental study on Isolation efficiency of recyclable in-filling materials for thin-walled

hollow wave barrier. *Engineering Structures*, 312(May).
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118207>.

DİĞER ESERLER:

- Celebi, E., Zülfikar, A. C., Göktepe, F., Kırtel, O., Faizan, A. A., İstegün, B. (2022). In-situ measurements and data analysis of environmental vibrations induced by high-speed trains: A case study in North-Western Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 156, 107211.
- Faizan, A. A., Çelebi, E., Kırtel, O., Göktepe, F., Zülfikar, A. C., Ateş, S., & İstegün, B. (2022). Evaluation of human exposure and building damage to high-speed train-induced ground-borne vibration based on numerical studies: A comparison with international standards. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(8), 779.
- Orman, R., İstegun, B., & Çelebi, E. (2020). Finite-element analysis of shear tests on masonry triplets. *Emerging Materials Research*, 9(1), 192-199.
- İstegün, B., Subaşı, A., & Çelebi, E. (2018). Sismik tekstil ile güçlendirilmiş düşey delikli yığma tuğla ve bims blokların üç noktalı kesme deneyi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(2), 222-228.
- İstegün, B., Subaşı, A., & Çelebi, E. (2018, May). Experimental study on triplet of perforated bricks, pumice blocks with retrofitting by using seismic fabric. *In 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, Sakarya University Culture and Congress Center, Sakarya.
- İstegun, B., & Celebi, E. (2018). Triplet shear tests on masonry units with and without seismic textile reinforcement. *In Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017) Volume 2 3* (pp. 427-435). Springer International Publishing.
- İstegun, B., & Celebi, E. (2017). Triplet shear tests on retrofitted brickwork masonry walls. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 11(9), 1269-1274.