

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR MALZEMEDEN ÜRETİLMİŞ BARIYER İLE
YÜKSEK HIZLI TRENLERİN OLUŞTURDUĞU ÇEVRESEL
TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ayşenur SUBAŞI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR MALZEMEDEN ÜRETİLMİŞ KUTU BARIYER
İLE YÜKSEK HIZLI TRENLERİN OLUŞTURDUĞU ÇEVRESEL
TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ayşenur SUBAŞI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

HAZİRAN 2025

Ayşenur SUBAŞI tarafından hazırlanan “Geri Dönüştürülebilir Malzemeden Üretilmiş Bariyer ile Yüksek Hızlı Trenlerin Oluşturduğu Çevresel Titreşimlerin Azaltılması” adlı tez çalışması 10.06.2025 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 : **Prof.Dr.Seyhan FIRAT**
Gazi Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr.Mehmet EMİROĞLU**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof.Dr.Hakan GÜLER**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr.Osman KIRTEL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler 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 “Geri Dönüştürülebilir Malzemeden Üretilmiş Kutu Bariyer ile Çevresel Titreşimlerin Azaltılması” 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.

(14/05/2025)

Ayşenur SUBAŞI





Her Őeye rağmen inananlara...



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, tüm zor dönemeçlerde etik değerlerden vazgeçmeden çözüm yollarını aydınlatan, akademik vizyonunu hayatım boyunca kendime örnek alacağıma emin olduğum değerli danışman hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye en derin teşekkürlerimi sunarım. Akademisyen olmadan akademide tutunmaya çalışmanın zaman zaman tüketici olduğu bu uzun yolculukta, bilge bir rehberle yolumun kesişmiş olması benim için büyük bir şanstı, bunun için minnettarım.

Tez çalışmam süresince değerli zamanlarını ayırarak, tez izleme komitesinde yer alan ve her toplantımda anlayışla katkı sunan Prof. Dr. Seyhan FIRAT ve Prof. Dr. Mehmet EMİROĞLU'na; tez jürimde yer alarak değerlendirmeleriyle katkı sağlayan Prof. Dr. Hakan GÜLER'e teşekkür ederim. Tüm arazi deneyleri ve laboratuvar çalışmalarında bizzat yer alarak; sürece fiziksel emeğiyle de büyük katkı sunan, kriz anlarında gösterdiği yapıcı tutum ve soğukkanlı yaklaşımıyla çalışmanın devamlılığını mümkün kılan değerli hocam Doç. Dr. Osman KIRTEL'e çok teşekkür ederim.

Tez sürecinde laboratuvar ve arazi deneylerinin yürütülmesinde fiilen katkı sunarken; verilerin yorumlanmasında sağladığı teknik destekle de süreci kolaylaştıran değerli yol arkadaşım Arş. Gör. Muhammet Burhan Navdar'a gönülden teşekkür ederim. On yıla yakın süredir hayatımın her alanında yanımda olan, dostluktan öte kardeşliğini hissettiren, bu tez sürecinde ise özellikle laboratuvar üretimlerinden saha deneylerine kadar her aşamada emek vererek, tecrübelerini benden esirgemeyen kardeşim ve yol arkadaşım Dr. Berna İstegün'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Bu yolculuk boyunca yalnızca düşünsel değil, duygusal yüklerimi de paylaşan; yüksek empati gücü, sarsılmaz sakinliği ve derin sevgileriyle bana her zaman iyi gelen Okan Özgül'e gönülden teşekkür ederim. Laboratuvar koridorlarından evrak karmaşalarına, karanlık düşüncelerden yeniden ayağa kalkışlara kadar her yerde "sen yaparsın" diyerek bana güç veren; beni yalnızca lojistik anlamda taşımakla kalmayıp; yorgunluklarımı, endişelerimi ve umutsuzluklarımı da omuzlayan; hayatımın her döneminde yanımda olan biricik kız kardeşim Fatmanur Subaşı'na derin bir sevgi ve minnetle teşekkür ederim.

Düşünce ufkumu genişleten, sorgulamayı teşvik eden, çözüm arayışlarımda her zaman kahramanım olan; kararsızlık anlarında ise bilgeliğiyle iç sesimi duymama vesile olan ve 'kız babası' olma sanatını en iyi şekilde icra eden canım babam Doç. Dr. Turgut Subaşı'na; fikirlerimi yargılamadan büyüten, çabamı sabrıyla şekillendiren, karanlık gökyüzünde yönümü bulmamı sağlayan bir 'kutup yıldızı' olan canım annem Türkçe öğretmeni Şirin Subaşı'na; sevgileri, emekleri ve sonsuz destekleri için kalbimin en derin yerinden teşekkür ederim.

Son olarak bu tez çalışmasının 2023-19-44-74 numaralı Lisansüstü Tez projesi kapsamında desteklendiğini belirtir, bu vesile ile Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na (BAPK) teşekkürlerimi sunarım.

Ayşenur SUBAŞI



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
1.2.1. Zemin kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik yaklaşımlar	2
1.2.2. Hava kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik yaklaşımlar	18
1.2.3. Titreşim ve gürültü yalıtımında kullanılan yenilikçi malzemeler: oluklu mukavva örneği	31
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	35
2. ZEMİN VE HAVA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN YAYILIMI: MEKANİZMALAR VE KONTROL STRATEJİLERİ	39
2.1. Zemin Kaynaklı Titreşim Üreten Mekanizmalar	39
2.1.1. Zemin kaynaklı titreşimlerin yayılması	41
2.1.1.1. Cisim dalgaları	42
2.1.1.2. Yüzey dalgaları	43
2.1.2. Demiryolu trafiğinden kaynaklanan zemin titreşimleri	47
2.1.3. Zemin kaynaklı titreşimlerin ölçülmesi ve değerlendirilmesi	50
2.1.4. Zemin kaynaklı titreşimlerinin azaltılması	54
2.2. Hava Kaynaklı Titreşim Üreten Mekanizmalar	57
2.2.1. Gürültü tanımları	57
2.2.2. Demiryolu gürültüsü karakterizasyonu	59
2.2.2.1. Tekerlek-ray etkileşimi (yuvarlanma) gürültüsü	60
2.2.2.2. Kurbalardaki gürültü	62
2.2.2.3. Köprü ve viyadük kaynaklı gürültü	64
2.2.2.4. Aerodinamik gürültü	66
2.2.2.5. Yapısal gürültü	67
2.2.3. Demiryolu gürültüsünün tahmini	68
2.2.4. Demiryolu gürültüsü azaltılma yöntemleri	70
2.2.4.1. Kaynakta gürültü azaltımı	70
2.2.4.2. Yayılım yolunda gürültü azaltımı	71
2.2.4.2.1. Akustik bariyerler	71

2.2.4.2.2. Geleneksel gürültü bariyerleri	74
2.2.4.2.3. Düşük yükseklikteki akustik bariyerler	75
2.2.4.3. Alıcıda gürültü azaltımı	78
3. GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR TİTREŞİM BARIYERİ PROTOTİPİ: TASARIM, MODELLEME VE ÜRETİM SÜREÇLERİ.....	79
3.1. Bariyerin Tasarlanması.....	79
3.1.1. Oluklu mukavva	81
3.1.2. Balsa odunu	82
3.2. Ölçeklendirilmiş Modeller ile Dayanım Testleri.....	82
3.3. İç Izgara Yapısının Dayanımının Değerlendirilmesine Yönelik Sayısal Analiz	86
3.4. Nem Direncinin Değerlendirilmesine Yönelik Su Yalıtım Testleri	89
3.5. Kutu Bariyer Prototiplerinin Üretilmesi	92
3.5.1. Zemin titreşim bariyeri prototipinin üretilmesi	93
3.5.2. Gürültü bariyeri prototipinin üretilmesi	96
4. KUTU BARIYER SİSTEMLERİNİN ZEMİN VE HAVA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİ SÖNÜMLEME ETKİNLİĞİNİN SAHA DENEYLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	101
4.1. Deney Sahasının Zemin Karakteristiklerinin İncelenmesi	101
4.2. YHT Seti ve Raylı Sistem Altyapısına İlişkin Teknik Özellikler	108
4.3. Yapay Darbe Üretici Balyoza İlişkin Teknik Özellikler	109
4.4. Titreşim ve Gürültü Ölçüm Sistemlerinin Teknik Özellikleri.....	110
4.4.1. Zemin kaynaklı titreşim ölçüm sistemi ve veri analizi	110
4.4.2. Hava kaynaklı titreşim ölçüm sistemi ve veri analizi	115
4.5. Ölçüm Ekipmanlarının Yerleşim Düzeni	117
4.5.1. Zemin titreşim ölçüm cihazlarının yerleşimi	117
4.5.2. Gürültü ölçüm cihazlarının yerleşimi.....	119
4.6. Kutu Bariyerin Test Sahasına Yerleştirilmesi	121
4.7. Deney Sahasında Gerçekleştirilen Ölçümler	124
4.7.1. Zemin kaynaklı titreşim ölçümleri	124
4.7.1.1. Yapay darbe uygulamasıyla üretilen zemin titreşimi ölçümleri.....	124
4.7.1.2. Yüksek hızlı tren geçişlerinin ürettiği zemin titreşimi ölçümleri....	135
4.7.1.2.1. 250 km/sa hızındaki tren geçişleri sırasında ölçülen zemin titreşimleri	137
4.7.1.2.2. 160 km/sa hızındaki tren geçişleri sırasında ölçülen zemin titreşimleri	151
4.7.2. Hava kaynaklı titreşim (gürültü) ölçümleri.....	167
4.7.2.1. Bariyere yakın hattaki geçişler ile yapılan gürültü ölçümleri	171
4.7.2.2. Bariyere uzak hattaki geçişler ile yapılan gürültü ölçümleri.....	174
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	177
KAYNAKLAR.....	181
ÖZGEÇMİŞ.....	199

KISALTMALAR

BE	: Bariyer Etkinliği
3D	: Üç boyutlu (three-dimensional)
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EPA	: Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
EPS	: Genleştirilmiş polistiren (Expanded Polystyren Foam)
EW	: Hatta paralel (East-West)
FTA	: Federal Ulaştırma İdaresi (Federal Transit Administration)
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
MASW	: Çok kanallı yüzey dalgası (Multichannel Analysis of Surface Waves)
NEHRP	: National Earthquake Hazards Reduction Program
NS	: Hatta dik (North-South)
PGA	: Pik ivme genlik değeri (Peak Ground Acceleration)
PGD	: Pik yerdeğıştirme 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)
RMS	: Karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Square)
SPL	: Ses basınç seviyesi (Sound Pressure Level)
SPT-N	: Standart Penetrasyon Deneyi darbe sayısı
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UD	: Düşey doğrultu (Up-Down)
UIC	: Uluslararası Demiryolu Birliği
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
YHT	: Yüksek hızlı tren (World Health Organization)



SİMGELER

A	: Zemin büyütmesi ($(V_s)_{30}$)
E_n	: Enerji iletimi
F_Z	: Dingil yükü
L_V	: Desibel cinsinden hız seviyesi
L_{eq}	: Eşdeğer gürültü seviyesi
L_p	: Desibel cinsinden ses basınç seviyesi
V_{s30}	: 30 m derinlikteki ortalama kayma dalgası hızı
V_P	: P dalgası hızı
V_R	: Rayleigh dalgalarının yayılma hızı
V_S	: S dalgası hızı
V_{ref}	: Referans hız değeri (1×10^{-8} m/s)
Z_n	: Empedans değeri
c_n	: Kayma dalga hızı
k_b	: Rijitlik katsayısı
k_s	: Zemin yatak katsayısı
q_a	: Emniyetli taşıma gücü
q_s	: Zemin emniyet gerilmesi
q_u	: Zemin taşıma gücü
A_R	: Genlik azaltma oranı
A_{RMS}	: İvmenin kuadratik ortalaması
E	: Elastisite modülü
λ_R	: Dalga boyu
G	: Kayma modülü
K	: Bulk modülü
L	: Bariyer uzunluğu
V	: Hareket hızları
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
d	: Bariyer derinliği

dB_A	: A ağırlıklı desibel
f	: Titreşim kaynağının baskın frekans değeri
h	: Derinlik/tabaka kalınlığı
w	: Bariyer genişliği
μ	: Poisson oranı
ρ	: Birim hacim ağırlık



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Demiryolu kaynaklı zemin titreşimlerinin azaltılması.....	55
Tablo 3.1. Üç noktalı eğme testlerinin karşılaştırmalı sonuçları.....	84
Tablo 3.2. Yanal toprak basıncı hesabında kullanılan zemin parametreleri.....	85
Tablo 3.3. Kutu bariyer tasarımına ilişkin gerilme hesaplamaları.	86
Tablo 3.4. Ağ yoğunluğunun optimizasyonu.	87
Tablo 3.5. Nem izolasyonu test sonuçları.	92
Tablo 4.1. Zeminin dinamik ve elastik parametrelerinin ortalama değerleri.	104
Tablo 4.2. Zemin etüdü sonucunda elde edilen zemin parametreleri.....	106
Tablo 4.3. Tren setine ait teknik özellikler.....	108
Tablo 4.4. Demiryolu hattının mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).	109
Tablo 4.5. Zemin titreşimi ölçüm setine ait teknik detaylar.....	112
Tablo 4.6. Ses Seviyesi Ölçer cihazına ait teknik detaylar.....	116
Tablo 4.7. Zemin kaynaklı titreşim ölçümlerine ait deney matrisi.....	124
Tablo 4.8. Yapay darbe testine ait bariyer tipine göre spektral titreşim azaltım performansları.	134
Tablo 4.9. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait bariyerin hemen arkasındaki RMS İvme azalım yüzdeleri.....	144
Tablo 4.10. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait fourier genliklerinin bariyerin hemen arkasındaki azalım yüzdeleri.....	150
Tablo 4.11. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait bariyerin hemen arkasındaki RMS İvme azalım yüzdeleri.....	158
Tablo 4.12. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait fourier genliklerinin bariyerin hemen arkasındaki azalım yüzdeleri.....	166
Tablo 4.13. Hava kaynaklı titreşim ölçümlerine ait deney matrisi.....	168
Tablo 4.14. Bariyerli ve bariyersiz durumlar için ses seviyesi (dBA) ölçüm sonuçları.	170



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Açık hendeklerin izolasyon etkisinin normalize edilmiş bariyer derinliğine göre teorik olarak karşılaştırılması (Haupt,1981).	6
Şekil 1.2. Açık hendek ve geofoam dolgulu hendek uygulamalarının dalga bariyeri olarak araştırılması (Alzawi ve El Naggar, 2011).....	8
Şekil 1.3. Jet grout kolonlarının yapımı ve rijit dalga bariyeri uygulaması (Coulier ve ark, 2014).	12
Şekil 1.4. Modüler gürültü bariyeri uygulaması (Belingard ve ark, 2012).....	22
Şekil 1.5. Gürültü ve zemin titreşimi bariyerlerinin birleşik olarak uygulanması (Peplow ve ark, 2021).	27
Şekil 1.6. Yükseltilmiş raylarda gürültü bariyeri uygulaması (Lee ve ark, 2021).....	28
Şekil 1.7. Oluklu yapıların deformasyon mekanizmalarının incelenmesi (Sek ve Rouillard, 2005).	32
Şekil 1.8. E ve C tipi oluklu mukavvalarla üretilen sandviç panel numuneler (Asdrubali ve ark, 2015).....	34
Şekil 1.9. Delikli ve deliksiz oluklu mukavvalar ile blender gürültüsünün azaltılması (Kang ve ark, 2021).....	35
Şekil 1.10. Kutu bariyerin tasarlanıp üretilme sürecine ait akış diyagramı.	37
Şekil 1.11. Titreşim ölçümlerinin yapıldığı saha deneylerine ait akış diyagramı.....	38
Şekil 2.1. Titreşim hareketi türleri a) Periyodik b) Gelişigüzel c) Geçici (Alzawi, 2011).	40
Şekil 2.2. P ve S dalgalarının yayılma biçimi (Kramer ve Stewart, 2024).	43
Şekil 2.3. Rayleigh ve Love dalgalarının yayılma biçimi (Kramer ve Stewart, 2024).	44
Şekil 2.4. V_P , V_S ve V_R hızlarının Poisson oranı ile değişimleri (Alzawi, 2011).....	45
Şekil 2.5. Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey bileşenlerinin derinlikle değişimi (Richart ve ark, 1970).	46
Şekil 2.6. Zemin kaynaklı titreşim sorununun üç temel bileşeni (Bahrekazemi, 2004).	48
Şekil 2.7. Titreşim üretimi açısından trenin temel bileşenleri (Bahrekazemi, 2004).	48
Şekil 2.8. Bir demiryolu hattının şematik resmi (Bahrekazemi, 2004).	49
Şekil 2.9. Yalıtım durumları: A)Aktif yalıtım-yatay dalga bariyeri, B)Aktif yalıtım-düşey dalga bariyeri, C)Pasif yalıtım-düşey dalga bariyeri	56
Şekil 2.10. Hız artışına bağlı olarak gürültü kaynaklarının katkısındaki değişim (dos Santos, 2024).....	60
Şekil 2.11. Yuvarlanma gürültüsünün oluşum süreci (Lichtberger, 2005).....	61
Şekil 2.12. Hafif ray aracının tekerlek çınlama gürültüsü (Öztürk ve Arlı, 2010). ...	63
Şekil 2.13. Farklı yapı tipleri ve ray bağlantı yöntemlerine bağlı olarak gürültü seviyelerindeki değişimler (dos Santos, 2024).....	65
Şekil 2.14. Tren etrafında türbülanslı akış oluşumunun şematik gösterimi (Thompson, 2008).	66

Şekil 2.15. Bir ses dalgasının akustik bariyere çarpma mekanizması (dos Santos, 2024).....	71
Şekil 2.16. Ses dalgalarının akustik bariyer üzerinden kırınimleri (FRA, 2005).....	72
Şekil 2.17. Bir bariyerde ses dalgası kırınımı fenomeni (Crocker, 2007).	73
Şekil 2.18. Gürültü bariyerinin çalışma prensibi (dos Santos, 2024).	74
Şekil 2.19. Demiryolu hattına yerleştirilen akustik bariyer (URL1).....	75
Şekil 2.20. Düşük yükseklikteki akustik bariyer örnekleri (dos Santos,2024).	77
Şekil 3.1. B+C dalga çift oluklu mukavva (URL2, URL3).	81
Şekil 3.2. Balsa odunu (URL5, URL6).....	82
Şekil 3.3. Farklı iç ızgara sistemleri.....	83
Şekil 3.4. Üç noktalı eğme testleri ile ölçeklendirilmiş modellerin dayanımının belirlenmesi.	84
Şekil 3.5. Üst plakanın orta noktasındaki yer değiştirme değerlerinin, sonlu eleman sayısına göre değişimi.	87
Şekil 3.6. Ölçeklendirilmiş Model-4'ün SAP2000 yazılımı ile analiz edilmesi.	88
Şekil 3.7. Deneysel sonuçlar ve nümerik sonuçlar ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	88
Şekil 3.8. Su yalıtımı testlerinde kullanılan izolasyon malzemeleri: (a) Likit membran, (b) Sıvı cam. (c) Sera naylonu.....	90
Şekil 3.9. Nem testi sonrası likit membranlı numunede yüzey kırılmaları.....	91
Şekil 3.10. Sera naylonu malzemesiyle tekrarlanan izolasyon testi.	91
Şekil 3.11. Prototipe ait bir modülün çerçeve sisteminin oluşturulması.....	93
Şekil 3.12. İç ızgara sisteminin oluşturulması.	94
Şekil 3.13. Üretimi tamamlanmış bir prototip modülü.	94
Şekil 3.14. Modüllerin birleştirilmesiyle kutu formunda prototipin tamamlanması..	95
Şekil 3.15. Kutu bariyer prototipinin suya karşı yalıtılması.	96
Şekil 3.16. Gürültü bariyeri prototipinin taşıyıcı sisteminin oluşturulması.	97
Şekil 3.17. 2.5 m yüksekliğindeki prototip modüllerinin üretilmesi.	97
Şekil 3.18. Çift dalga oluklu mukavvanın 2 kat uygulanması.	98
Şekil 3.19. Kutu formundaki gürültü bariyeri prototipi.	99
Şekil 4.1. Deney sahasına ait uydu görüntüsü 102	102
Şekil 4.2. Test sahasında çok kanallı yüzey dalgası analizi..... 102	102
Şekil 4.3. Hatta dik ve paralel doğrultular için elde edilmiş S dalgası hız kesiti..... 103	103
Şekil 4.4. Zemin etüdü kapsamında yapılan sondaj çalışması ve UD örnekleri..... 105	105
Şekil 4.5. HT65000 serisine ait yüksek hızlı tren seti (URL7)..... 109	109
Şekil 4.6. Manuel darbe üretici balyoz. 110	110
Şekil 4.7. Saha testlerinde kullanılan zemin titreşimi ölçüm sistemi..... 111	111
Şekil 4.8. Veri ayrıklaştırılması ve örnek ivme kaydı..... 113	113
Şekil 4.9. Titreşim sinyallerinin işlenmesi ve frekans tabanlı filtreleme..... 114	114
Şekil 4.10. Gürültü ölçümlerinde kullanılan ses seviyesi ölçer. 116	116
Şekil 4.11. PCE-322A ses seviyesi ölçer cihazına ait yazılım arayüzü. 117	117
Şekil 4.12. Bariyersiz durumlardaki test sahasının görünümleri ve ivmeölçer yerleşimi. 119	119
Şekil 4.13. Ses seviyesi ölçerin bariyersiz test sahasındaki konumlandırılması..... 120	120
Şekil 4.14. Ses seviyesi ölçerin bariyerin arkasında konumlandırılması..... 121	121
Şekil 4.15. Kutu bariyer prototipinin hendeğe yerleştirilmesi. 122	122
Şekil 4.16. Zemin titreşim ölçümlerindeki saha durumları: (a) Bariyersiz durum, (b) Boş hendek, (c) Kutu bariyerli hendek, (d) Strafor dolgulu kutu bariyer. 123	123
Şekil 4.17. İvmeölçerlerin yerleşimi ve kutu bariyerin konumu..... 125	125

Şekil 4.18. Yapay darbe titreşim ölçümlerindeki saha durumları: (a) Bariyersiz durum, (b) Boş hendek, (c) Kutu bariyerli hendek, (d) Strafor dolgulu kutu bariyer.	126
Şekil 4.19. Her bir ivmeölçer için tek bir darbe testine ait karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.	127
Şekil 4.20. Her bir ivmeölçer için normalize edilmiş darbe testlerine ait karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.	130
Şekil 4.21. (a) PGA, (b) PGV ve (c) PGD değerlerine ait normalize edilmiş Genlik Azaltma Oranı (AR) değerlerinin, tüm ivmeölçerlerin üç yön bileşeni üzerinden karşılaştırılması.	131
Şekil 4.22. Bariyerli sahada ivmeölçerlerin yerleşimi.	136
Şekil 4.23. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.	137
Şekil 4.24. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı hız-zaman ilişkileri.	140
Şekil 4.25. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize edilmiş ivme-zaman ve A_{RMS} -Zaman ilişkileri.	142
Şekil 4.26. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak değişimi.	146
Şekil 4.27. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait titreşim azaltım yüzdelikleri.	147
Şekil 4.28. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.	148
Şekil 4.29. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.	152
Şekil 4.30. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı hız-zaman ilişkileri.	154
Şekil 4.31. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize edilmiş ivme-zaman ve A_{RMS} -Zaman ilişkileri.	156
Şekil 4.32. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak değişimi.	160
Şekil 4.33. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait titreşim azaltım performansları.	161
Şekil 4.34. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.	164
Şekil 4.35. Serbest alan gürültü ölçümleri.	169
Şekil 4.36. Kutu bariyer prototipi ile yapılan gürültü ölçümleri.	169
Şekil 4.37. Gürültü deneylerinde kullanılan termo-anemometre.	170
Şekil 4.38. Bariyere yakın durumda gerçekleştirilen ses seviyesi (dBA) ölçümlerinin zamana bağlı değişimi.	172
Şekil 4.39. İstanbul hattında bariyere yakın yapılan ölçümlerden elde edilen frekans bazlı Insertion Loss (IL) dağılımı.	173
Şekil 4.40. Bariyere uzak durumda gerçekleştirilen ses seviyesi (dBA) ölçümlerinin zamana bağlı değişimi.	174
Şekil 4.41. Ankara hattında bariyere uzak yapılan ölçümlerden elde edilen frekans bazlı Insertion Loss (IL) dağılımı.	175



GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR MALZEMEDEN ÜRETİLMİŞ BARIYER İLE YÜKSEK HIZLI TRENLERİN OLUŞTURDUĞU ÇEVRESEL TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI

ÖZET

Modern kentlerin yoğun yerleşim bölgelerinde artan yüksek hızlı tren trafiği, konfor kaybına, yapısal bileşenlerin ömrünün kısalmasına ve hassas elektronik cihazların zarar görmesine neden olan titreşim sorunları yaratmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, çevreye yayılan bu olumsuz etkileri azaltmak için yüksek performanslı, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir titreşim yalıtım bariyerinin tasarımını ve geliştirilmesini sağlamaktır. Literatürde, sağlam zeminlerde açılan derin hendeklerin etkili bir titreşim yalıtım yöntemi olduğu bilinse de zayıf zeminlerde yanal stabilite sorunları nedeniyle bu yöntem sınırlı kalmaktadır. Özellikle gevşek kumlu veya siltli zeminler, yüzeye yakın yeraltı su seviyesi ve alüvyon gibi zayıf zeminlerde hendek iç yüzeylerinin desteklenmesi gerekliliği, mühendislik uygulamalarında zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada açık hendek uygulamasına alternatif olarak düşük empedanslı ve geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilmiş kutu dalga bariyer modeli önerilmiştir. Bariyerin ana yapısında yüksek mukavemeti nedeniyle balsa kullanılırken, dış yüzeylerinde titreşim iletimine duyarlı çift dalga oluklu mukavva tercih edilmiştir. Bariyer tasarımında kullanılan düşük empedanslı malzeme, yüzey zemin titreşim dalgalarının bariyere geçişinde ortam değişikliği hissettirmeyecek şekilde seçilmiştir; bu, dalgaların iletim mekaniklerinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Geliştirilen bariyerin yenilikçi tasarımı, düşük maliyetle kolay imalat ve uygulama avantajı sunarak mevcut açık hendek çözümlerine alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada; SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılan sayısal analizlerle laboratuvar deney sonuçları karşılaştırılmış, bariyerin optimum performans sağlayabilmesi için iç iskeletin ortogonal bir ızgara sistemi ile tasarlanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Ek olarak, bariyerin çevresel etkilere karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla nem izolasyonu testleri yapılmıştır. Yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu titreşim ve gürültü etkisini azaltmak üzere geliştirilen bu bariyer modeli, sanayi tesisleri, yerleşim yerleri ve hassas cihazların bulunduğu yapılar gibi titreşime duyarlı alanlar için güvenilir ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Yapılan laboratuvar ve arazi testleri sonucunda, geliştirilen bariyerin yüksek yalıtım performansı gösterdiği, özellikle yumuşak zeminlerde yanal stabilite gereksinimini azalttığı ve yüksek hızlı tren geçişlerinde NS yönünde %50'yi aşan ivme azalımı sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, tren kaynağına 6.5 m uzaklıkta konumlandırılan kutu bariyerin ses seviyelerinde 20 dBA'ya varan azalma sağladığı tespit edilmiştir. Titreşim yalıtım kutusunun özellikle kültürel miras koruması altındaki tarihi yapılar, hassas endüstriyel tesisler ve laboratuvarlar gibi titreşime duyarlı yapılarda da güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında üretilen dalga bariyerinin hem hava hem de zemin kaynaklı titreşimleri etkili bir şekilde azalttığı ve çevresel konforun sağlanmasına katkı sunduğu tespit edilmiştir.



MITIGATION OF ENVIRONMENTAL VIBRATIONS INDUCED BY HIGH-SPEED TRAINS USING A BARRIER CONSTRUCTED FROM RECYCLABLE MATERIALS

SUMMARY

The increasing high-speed train (HST) traffic in densely populated urban areas has introduced significant environmental vibration problems, which lead to passenger discomfort, reduction in the service life of structural components, and potential malfunction or damage of precision electronic equipment. This doctoral study aims to design and develop a high-performance, cost-effective, and environmentally sustainable vibration isolation barrier to mitigate these adverse effects. Although open trench systems excavated in firm soils are widely recognized in the literature as effective vibration mitigation solutions, their implementation in weak soil conditions is limited due to lateral stability challenges. Soils with low bearing capacity, such as loose sands, silts, alluvial deposits, and shallow groundwater conditions, require internal trench support, which complicates conventional engineering practices.

As an innovative alternative to the open trench method, this research proposes a box-shaped wave barrier (BCCB Trench) constructed from low-impedance, recyclable materials. The barrier features a structural frame made from high-strength balsa wood and sidewalls composed of double-wall corrugated cardboard, which is highly sensitive to vibration transmission. These materials were chosen not only for their environmental advantages but also for their mechanical compatibility with the surrounding soil, ensuring seamless wave propagation without causing abrupt impedance discontinuities. This feature provides a distinct advantage in preserving the natural transmission mechanics of surface and body waves.

Designed specifically to reduce ground-borne and airborne vibrations induced by high-speed train passages, the proposed barrier offers a reliable and efficient solution for vibration-sensitive zones such as industrial facilities, residential neighborhoods, and structures housing delicate instrumentation. A series of field and laboratory tests were conducted to evaluate the mechanical strength, water resistance, and vibration attenuation performance of the developed prototype. Among these, full-scale field tests were performed near a high-speed railway line in Pamukova, Turkey, where real dynamic loading scenarios involving the HT65000 train set was utilized to evaluate in-situ vibration and sound reduction effectiveness.

Laboratory-based three-point bending tests confirmed the structural adequacy of the barrier under lateral soil loads, verifying its suitability for deeper trench implementations in weak soil environments. To ensure environmental durability, various waterproofing techniques were tested. Among these, the greenhouse nylon coating demonstrated the lowest water absorption rates and was selected as the standard protective layer for field prototypes. The modular design of the barrier, reinforced with an internal orthogonal lattice frame, was also numerically validated using SAP2000 finite element simulations. The numerical model allowed for

additional design variations, enabling the adaptation of the system to different soil and load conditions.

Moreover, the application of low-density filler material, specifically Styrofoam, inside the BCCB Trench was found to enhance its vibration mitigation performance by decreasing wave reflections and increasing energy absorption. When comparing amplitude increases in front of the barrier due to reflected waves, the Styrofoam-filled version showed only a 15% increase, compared to approximately 30% in the unfilled configuration. These outcomes emphasize the critical role of internal filler material in optimizing isolation efficiency.

Another critical aspect of the study was the integration of numerical modeling techniques with experimental observations. The SAP2000-based finite element model developed in this research was used to assess and improve the structural strength of the barrier design. By comparing the simulation results with experimental data, the model served as a valuable tool for validating the barrier's mechanical performance and exploring design optimizations without the need for additional physical testing.

Furthermore, the study emphasized the importance of direction-specific vibration analysis, particularly in the horizontal NS and EW directions, where the majority of the train-induced surface wave energy propagates. In contrast to the common assumption that vertical vibrations dominate, this research revealed that the horizontal components were often more critical in evaluating vibration risks. This insight has major implications for the design orientation and positioning of vibration barriers near rail lines.

The most distinguishing feature of the developed barrier lies in its ease of manufacturing, transport, and installation. Unlike conventional systems, it requires no heavy machinery or professional engineering labor. Its affordability and use of widely available materials make it particularly attractive for applications in rural or low-budget infrastructure projects. Furthermore, the use of biodegradable and recyclable materials supports broader sustainability goals and promotes eco-conscious engineering practices.

Experimental results demonstrated that the BCCB Trench provides significant vibration reduction in soft soil environments, while simultaneously offering lateral support, reducing the need for reinforced trench walls. In particular, time-history acceleration data obtained from accelerometer readings behind the barrier showed substantial decreases in vibration amplitudes, especially in the horizontal (EW, NS) directions. Normalized amplitude and RMS analyses revealed that the foam-filled BCCB Trench achieved amplitude reductions exceeding 40%, with peak ground acceleration values falling within the effective isolation region proposed by Woods. In some cases, the performance of the BCCB Trench matched or surpassed that of traditional empty trench configurations. Comparative analyses of normalized RMS acceleration values revealed that the damping performance of the barrier systems is sensitive to train speed. While the reduction ratios remained limited under slow train passages, especially in the horizontal directions (EW and NS), the presence of the barrier was significantly more effective under high-speed trains, with reductions exceeding 50% in the NS direction. In the vertical (UD) direction, some increases were observed under slow trains, whereas notable reductions occurred during high-speed passages, suggesting a clearer damping effect with increasing wave energy. The higher performance of the foam-filled barrier in certain directions indicates that internal filling enhances energy absorption capacity.

In addition to acceleration-based evaluations, sound level measurements under natural train pass-by conditions were also carried out. The presence of the BCCB Trench led to noticeable reductions of up to 20 dBA near the train source and approximately 10 dBA in more remote positions. Frequency-based insertion loss analyses further revealed that the barrier was particularly effective in the 125-500 Hz frequency range, which aligns with the dominant frequencies of ground and structural noise caused by rail systems. These findings indicate that the proposed box barrier not only reduces ground-borne vibration but also offers meaningful sound insulation capabilities.

In conclusion, this study demonstrates that the BCCB Trench is an effective and practical alternative to traditional vibration isolation systems. It is capable of attenuating both airborne and ground-borne vibrations across a range of frequencies and soil conditions. Its low impedance structure ensures mechanical compatibility with natural soils, and its modular, sustainable design presents strong potential for widespread implementation in vibration-sensitive areas, including cultural heritage sites, laboratories, and precision manufacturing facilities. Future studies may focus on long-term durability assessments, further optimization of filler materials, and extension of the numerical models to more complex, layered soil environments for broader application scenarios.



1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Sanayileşme ve şehirleşmenin hızla artması, çevresel titreşim ve gürültü sorunlarını günümüz dünyasının en büyük problemleri arasına yerleştirmiştir. Bu sorunlar, yalnızca bireylerin yaşam kalitesini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda yapısal hasarlara ve ekonomik kayıplara da neden olmaktadır. Özellikle modern kent topluluklarında, yoğun nüfuslu bölgelerde; titreşim ve gürültünün neden olduğu çevresel kaygılara ilişkin artan farkındalık, yaşam kalitesinin ve güvenliğinin iyileştirilmesine yönelik daha büyük bir arzuya yol açmıştır. Yeni kurulan sanayi tesislerinin inşaat faaliyetleri, şantiyelerde kullanılan makineler, hammadde ve personelin kurulan sanayi bölgelerine taşınmasını sağlayan karayolu ve demiryolu trafiği nedeniyle oluşan zemin ve hava kaynaklı titreşimler; yakınlardaki yapıların dayanıklılığını ve bina sakinlerinin huzurunu tehdit etmektedir. Özellikle yüksek hızlı demiryolu taşımacılığı gibi toplu ulaşım sistemlerinden kaynaklanan titreşim ve gürültü, hem insan sağlığına hem de çevredeki binaların yapısal bütünlüğüne zarar veren unsurlardır. Dünyada 350 km/sa hızlara ulaşan yüksek hızlı trenler, ülkemizde 250 km/sa hızla seyahat etme kapasitesine sahiptir ve yakın gelecekte bu hızların artırılması planlanmaktadır (TCDD). Ancak, yüksek hızlı trenler tarafından üretilen büyük genlikli zemin titreşimleri, özellikle yumuşak zemin çökeltileriyle karakterize edilen yoğun nüfuslu veya endüstriyel olarak gelişmiş alanlarda, günlük yaşamı kesintiye uğratabilir, yapısal bozulmayı hızlandırabilir ve çeşitli endüstrilerde kullanılan hassas elektronik ekipmanı bozabilir. Bu endişelerin giderilmesi; hastaneler, laboratuvarlar, okullar, konser salonları, sanayi kompleksleri ve tarihi öneme sahip binalar gibi bu tür rahatsızlıklara duyarlı tesislerin yakınındaki titreşim seviyelerinin ilgili standartlarda belirtilen sınır değerlerin altında tutulmasının sağlanmasını gerektirmektedir (Subaşı ve ark, 2024).

Demiryolu trafiğinin ürettiği zemin kaynaklı titreşimlerin yarattığı sorunlar, giderek artan bir öneme sahiptir ve en çok da tarihi binalar söz konusu olduğunda gündeme gelmektedir. Dünyanın en büyük gotik kiliselerinden biri olan Köln Katedrali'nin

yakınlarındaki bir istasyonun faaliyete geçmesiyle katedralin, anlamlı düzeyde yapısal titreşimlere ve çevresel gürültüye maruz kaldığı bildirilmiştir. Bu örneğe benzer olarak; geniş bir tarihi yapı stoğuna sahip olan Belçika'nın başkenti Brüksel'de bölgesel ve hızlı trenlerden oluşan yoğun bir demiryolu ağı bulunmaktadır ve bu ağ çok sayıda şikâyet almaktadır (Kouroussis ve ark, 2014).

Demiryolu trafiğinin ürettiği hava kaynaklı titreşimlerin sonucu olarak ortaya çıkan gürültü kirliliği; uyku bozuklukları, stres, işitme kayıpları gibi çeşitli sağlık problemlerine yol açmaktadır (WHO, 2018). Tekerleğin ray boyunca hareketi sırasında oluşan yuvarlanma gürültüsü; özellikle gece saatlerinde ciddi bir probleme neden olan temel gürültü kaynağıdır. Tekerlek ve ray yüzeyindeki pürüzlülük, her iki bileşenin dinamik özelliklerine bağlı olarak titreşim oluşturmaktadır ve bu titreşim sonucu ortaya çıkan gürültü yayılarak çevreyi etkilemektedir (Ranjbar, 2018). Gürültünün bireysel huzursuzluk yaratmasının ötesinde toplumsal huzura da zarar verdiği, yapılan araştırmalarla kanıtlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi kuruluşların verileri, gürültü kirliliğinin modern toplumlar üzerinde ciddi bir yük oluşturduğunu ve bu problemin çözümü için daha sıkı standartlara ve yenilikçi teknolojilere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Birçok ülkede demiryolları, daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir ulaşım aracı olarak yeniden değer kazanmaktadır. Yeni hatların planlanması, hızların ve trafik yoğunluklarının artmasıyla birlikte, ortaya çıkan gürültü ve titreşim sorunları artan bir öneme sahiptir. Özellikle, gürültü ve titreşim, demiryolu projelerine karşı itirazın bir gerekçesi olarak kullanılırken, modern tasarımlarda pahalı azaltım önlemlerini zorunlu kılmaktadır (Thompson, 2009). Bu tez çalışması, çevresel titreşim ve gürültünün azaltılması amacıyla; düşük empedanslı, geri dönüştürülebilir ve ekonomik malzemeler kullanılarak üretilen kutu şeklinde bir bariyerin yalıtım performansının incelenmesini kapsamaktadır.

1.2. İlgili Çalışmalar

1.2.1. Zemin kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik yaklaşımlar

Günümüz dünyasında, sanayi sektörünün hızla büyümesi, şehir merkezlerinin yayılması ve ulaşım ağlarının insanlar üzerinde oluşturduğu etkiler, küresel çapta şehir planlamacıları, ulaştırma mühendisleri, çevre bilimcileri ve trafik uzmanlarının odak noktası haline gelmiştir. Ekonomik kalkınmanın sağladığı yaşam standartlarındaki artış, modern toplumların daha kaliteli ve güvenli bir çevrede yaşama talebini

yükseltmiş; bu da çevresel etkilerin yol açtığı problemlere karşı daha bilinçli bir yaklaşımı beraberinde getirmiştir. Özellikle, yüksek frekanslı insan yapımı titreşim kaynaklarının ürettiği kuvvetli dalgaların oluşum mekanizmalarının ve elverişsiz zeminlerdeki yayılma özelliklerinin araştırılması literatürdeki önemli çalışmaların konusu olmuştur. (Bata, 1971; Massarsch, 1993, 2004; Xia ve ark, 2007; Göktepe ve ark, 2017). Crispino ve D'apuzzo (2001), İtalya'nın Napoli bölgesindeki koruma altındaki tarihi yapılarda karayolu trafiğinin neden olduğu titreşim etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında, ölçülen maksimum partikül hızları İngiliz standardı (BS 6472, 2008) tarafından belirlenen kriterlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Hajek ve arkadaşları (2006), ağır vasıta tekerleklerinin asfalt yol yüzeyindeki bozukluklarla teması sonucu oluşan zemin titreşimlerini ve dizel motorlu araçların egzoz sistemleriyle motorlarının ürettiği düşük frekanslı gürültü titreşimlerinin hafif yapı elemanları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, karayolu trafiğinin oluşturduğu titreşimler, Amerikan standartlarında belirtilen kriterlerle karşılaştırılarak çözüm önerileri sunulmuştur. Zemin kaynaklı titreşimler için yol yüzeyinin iyileştirilmesi ve gürültü titreşimleri için hafif yapı elemanlarının ses iletimi açısından yalıtımının artırılması önerilmiştir.

Zemin titreşimlerinin neden olabileceği yapı hasarlarına karşı önlem almak, endüstrideki titreşime duyarlı makineleri korumak ve çevresel etkiye maruz kalan kişilerin konforunu sağlamak amacıyla çeşitli yalıtım araçlarının araştırılması literatürün temel konularından olmuştur. Pao ve Mow (1963), bu alandaki ilk çalışmalara öncülük ederek; basit geometrik şekiller ve idealize edilmiş koşullarla sınırlı mekanik modeller kullanmış ve teorik yaklaşımlar aracılığıyla düzlemsel basınç dalgalarının bir engel karşısında nasıl saçıldığını incelemişlerdir. İmpuls yük kaynaklarının yayılma alanında ürettiği titreşim dalgalarının yalıtılmasını amaçlayan bariyerlerin sonlu farklar formülasyonlarına dayalı çözümleri ise Abouidi (1973) ile Fuyuki ve Matsumoto (1980) tarafından sunulmuştur. Zeminlerde dalga yayılım problemlerine yönelik analitik temelli detaylı incelemeler, bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle yirminci yüzyılın başlarında sayısal çözüm yöntemlerinin devreye girmesiyle birlikte daha kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır (Kausel, 1994; Bode ve ark, 2002; Hildebrand, 2004).

Zemin kaynaklı titreşimlerin yalıtımı amacıyla dalga bariyerlerinin kullanımı geniş çapta araştırılmış, pek çok çalışmada başarılı yalıtım performansları elde edilmiştir.

Ancak öncü çalışmalar incelendiğinde analitik yaklaşımların ve tam ölçekli saha deneylerinin bu alanda nadiren kullanıldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, kapalı formda çözümlerin genellikle yalnızca oldukça basit geometriler ve pratikte ender rastlanan sınır koşulları için elde edilebilmesidir. Tam ölçekli saha deneyleri ise yüksek maliyetleri nedeniyle sınırlı bir şekilde uygulanabilmektedir. Dolayısıyla, bu alandaki öncü çalışmaların büyük çoğunluğu sayısal teknikler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Barkan (1962), Dolling (1965), Neumeuer (1963) ve McNeill ve ark. (1965), titreşim yalıtımına ilişkin saha çalışmaları ve uygulama örneklerini rapor eden ilk araştırmacılar arasında yer almıştır. Örneğin, Barkan (1962), trafik kaynaklı titreşimlerden bir binayı izole etmek amacıyla açık hendek ve levha-duvar bariyerinin kullanımını araştırmıştır. Ancak bu yöntem başarısız olmuş ve titreşimler binayı olumsuz etkilemeye devam etmiştir. Bununla birlikte, McNeill, Margason ve Babcock (1965), hassas boyutsal standartlar laboratuvarını izole etmek için bir hendek ve levha-duvar bariyerinin başarılı bir uygulamasını rapor etmişlerdir. Bu sistem, levha üzerindeki maksimum izin verilen ivmeyi (100 mikro-g) etkili bir şekilde sınırlandırmıştır.

Neumeuer (1963), Berlin’de bir matbaayı metro kaynaklı titreşimlerden izole etmek için bentonit çamuru dolu bir hendeğin başarıyla uygulandığını belirtmiştir. Bu yöntemle tesisin titreşim genliği yaklaşık %50 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, Barkan (1962) tarafından rapor edilen bazı başarısız denemeler, o dönemde yalıtım mekanizmasının yanlış anlaşılmasına bağlanmıştır. Bu durum, sonraki yıllarda daha kapsamlı araştırmaların yapılmasını teşvik etmiştir.

Dolling (1965), Rayleigh dalgalarının bir hendek boyunca enerji dağılımını teorik olarak incelemiştir. Çalışmasında, hendek derinliğinin Rayleigh dalga boyuna (λ_R) oranı ile ifade edilen normalize edilmiş hendek derinliğine bağlı bir yalıtım faktörü geliştirmiştir. Ayrıca, zemin Poisson oranının yalıtım performansı üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymuştur.

Dolling (1970), büyük ölçekli sistematik saha testleri kapsamında, 15 metre uzunluğunda ve 6 metre derinliğinde bentonit çamuru ile doldurulmuş bir hendek kullanmıştır. Titreşim frekanslarını değiştirerek dalga boylarının 1.5 metre ile 12 metre arasında varyasyon göstermesini sağlamıştır. Testlerin büyük bir kısmı, titreşim

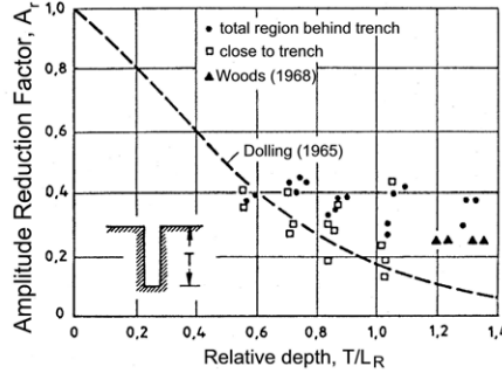
kaynağından 3 metre uzaklıkta bulunan hendeklerle gerçekleştirilmiştir. Haupt (1978a), Dolling'in bulgularını analiz ederek, hendek derinliğinin en az $0.8\lambda_R$ olduğu durumlarda bentonit çamuru dolgulu hendeklerin etkili bir yalıtım bariyeri olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Woods (1968), açık hendeklerin dalga bariyerleri olarak etkinliğini hem aktif hem de pasif yalıtım durumlarında değerlendirmek için bir dizi ölçeklendirilmiş saha deneyi gerçekleştirmiştir. Bu öncü çalışmada izolasyon tipleri bariyerin konumuna göre sınıflandırılmış; kaynağa göre yakın alandaki ve uzak alandaki izolasyon sistemi sırasıyla aktif ve pasif izolasyon olarak isimlendirilmiştir. Haupt (1995) sonraki yıllarda aktif izolasyonun yakın alanda yaklaşık $1.5 \lambda_R - 2 \lambda_R$ maksimum mesafede alınan önlem olduğunu ifade edecektir. Woods (1968) aynı zamanda bariyer verimliliğinin nicel bir ifadesi için genlik azaltma oranı (A_R) olarak adlandırılan bir terim tanımlamıştır. Farklı araştırmacılar tarafından farklı şekillerde adlandırılrsa da " A_R "; bariyer olması durumunda bir pik noktasındaki titreşim genliğinin, bariyersiz durumdaki genliğe oranını ifade etmektedir. Bu çalışmada; açık hendek varlığında titreşim izosyonundaki başarı kriterinin, 0.25 oranında genlik azaltma elde edilmesi olduğu söylenmiştir. Bununla birlikte; minimum hendek derinliğinin aktif yalıtım için $0.6\lambda_R$, pasif yalıtım için ise $1.33\lambda_R$ olması gerektiği de belirtilmiştir. Burada λ_R , Rayleigh dalgalarının dalga boyunu temsil etmektedir.

Woods ve ark. (1974), holografik enterferometri yöntemini kullanarak model testleri yürütmüş ve silindirik engel dizilerinin pasif yalıtım bariyerleri olarak performansını incelemiştir. Ancak bu uygulamalar, genellikle model sınırlarında oluşan dalga yansımalarından kaynaklanan sınırlamalarla karşılaşmıştır.

Haupt (1981), laboratuvar ortamında yapay olarak sıkıştırılmış kum üzerinde çeşitli bariyer türlerinin titreşim yalıtımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla bir dizi ölçekli model testi gerçekleştirmiştir. Araştırmada incelenen bariyerler arasında beton gibi katı duvarlar olduğu gibi köpükten yapılmış hafif bariyerler de yer almıştır. Bunun yanı sıra, delik sıraları ve açık hendekler gibi farklı bariyer türlerinin izolasyon performanslarının, dalga boyuna normalize edilmiş boyutlar açısından karakteristik parametrelere bağlı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.1). Araştırma sonuçları, dalga boyuna normalize edilmiş karakteristik parametrelerin bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Genel olarak, daha sert bariyerlerde titreşim genliği azalmasının, bariyerin şekli yerine, Rayleigh dalga boyunun karesine normalize edilmiş kesit alanı

ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, daha yumuşak bariyerlerde izolasyon performansı bariyerin şekline bağlılık göstermiş, ancak bazı özel boyutlar dışında tatmin edici bir yalıtım etkisi sağlanamamıştır.



Şekil 1.1. Açık hendeklerin izolasyon etkisinin normalize edilmiş bariyer derinliğine göre teorik olarak karşılaştırılması (Haupt,1981).

Avilles ve Sanchez-Sesma (1988), 3 boyutlu Rayleigh dalgalarının yalıtımı ve SV dalgalarının kazık sıralarıyla izolasyonu için analitik çözümler geliştirmiştir. Diğer çalışmalar ise açık hendeklerin titreşim yalıtımı üzerindeki etkisini sayısal yöntemlerle incelemiştir. Örneğin, Segol ve ark. (1978), açık hendeklerin etkinliğinin öncelikle hendek derinliğinin dalga boyuna oranına bağlı olduğunu, hendek genişliği ve şeklinin ise bu bağlamda daha az etkili olduğunu belirtmiştir.

Massarsch (1991), derin bir hendek içerisinde yenilikçi bir gaz yastığı sistemi geliştirmiştir. Hendek, kendi kendine sertleşen çimento-bentonit harcı ile doldurulmuş ve bu sistemin titreşim yalıtımındaki etkinliği farklı zemin koşullarında yapılan tam ölçekli testlerle değerlendirilmiştir. Çalışma, gaz yastığı sisteminin performansının, laboratuvar ve saha ortamlarında gerçekleştirilen model testlerine dayanarak, açık hendeklerle karşılaştırılabilir düzeyde olduğunu ortaya koymuştur.

Baker (1994), bentonitten (yumuşak bariyer) ve betondan (sert bariyer) üretilmiş bariyerlerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla bir dizi saha modeli testi gerçekleştirmiştir. Bu testlerde, bariyerler hem titreşim kaynağına yakın hem de uzak konumlarda yerleştirilerek sırasıyla aktif ve pasif titreşim yalıtımı senaryolarında incelenmiştir. Baker, deneysel bulguları, sınır eleman yöntemi (Boundary Element Method, BEM) kullanılarak literatürdeki sayısal analiz sonuçlarıyla ve Al-Hussaini (1992) tarafından geliştirilen ampirik tasarım denklemleriyle karşılaştırmıştır.

Ahmad ve ark. (1996), ağır makine temellerinden kaynaklanan yer hareketlerinin yakın çevredeki titreşime duyarlı cihazlar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla açık hendek tipi bir dalga bariyer modeli geliştirmiştir. Yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda, bariyerin yalıtım performansını doğrudan etkileyen geometrik özelliklerin Rayleigh dalga boyuna bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Madheswaran ve ark. (2009), farklı boyutlara sahip açık hendekler kullanarak sahada küçük ölçekli model testleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, açık hendeklerin varlığında çelik ve beton kazıkların çakılması sırasında oluşan dikey titreşimler ölçülmüştür. Beton kazıkların zemine çakılması durumunda daha yüksek ivme değerlerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, açık hendekler %57 ile %75 arasında değişen bir izolasyon performansı sergilemiştir.

Alzawi ve El Naggar (2011), maksimum 23.5 kN'lik sinüzoidal harmonik yük üretebilen mekanik bir osilatör kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, makine temellerinden kaynaklanan yer titreşimlerini azaltmak amacıyla açık hendek ve geofoam dolgulu hendek uygulamalarının dalga bariyeri olarak etkinliğini tam ölçekli deneylerle incelemiştir (Şekil 1.2). Siltli kil ve siltli kum tabakalarından oluşan test sahasında; farklı kaynak-bariyer mesafelerinde, 3 m derinliğinde, 0.25 m genişliğinde açık bir hendek üzerinde gerçekleşen deneyler sayesinde, zeminin yüksek frekanslarda sergilediği yüksek sönümleme kapasitesi nedeniyle, frekans arttıkça daha fazla sönümleme gözlemlendiği ifade edilmiştir. Elde edilen bulgular, geofoam dolgulu hendeklerin dalga izolasyonu konusunda %68'e varan bir başarı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, genlik azaltma oranlarında dalgalanmalar gözlemlenmiş ve Woods (1968) tarafından rapor edilen minimum ve maksimum noktalar ile benzerlik gösterdiği belirtilmiştir. Normalize edilmiş hendek derinliği olarak 0.6 önerilmiş ve kaynak-bariyer mesafesi arttıkça etkinliğin azalmasıyla daha derin hendeklerin gerekli olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 1.2. Açık hendek ve geofoam dolgulu hendek uygulamalarının dalga bariyeri olarak araştırılması (Alzawi ve El Naggar, 2011).

Babu ve ark. (2011), 0.6 m genişliğinde ve 3 m derinliğinde bir açık hendek ile gerçekleştirilen saha testlerinde, bu hendeklerin titreşim yalıtım performansını incelemiştir. Elde edilen veriler, hendek derinliğinin 1.8 m ve 3 m olarak kullanıldığı 2 boyutlu bir sonlu fark modelinin FLAC 5.0'da kalibre edilmesinde kullanılmıştır. Çalışmada yer alan analiz ve saha testleri, 3 m derinliğindeki açık hendeğin yeterli izolasyon sağladığını göstermiştir.

Garinei ve ark. (2014), İtalya'nın Bolonya ile Milan şehirleri arasındaki yüksek hızlı demiryolu hattının yakınlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmada; 0.75 m genişliğindeki açık hendeklerin derinliklerini 1 m ve 2 m olarak değiştirerek saha testleri gerçekleştirmiştir. Bu testlerde; 1 m derinliğindeki açık hendek, demiryolu trafiğinin 120 km/sa hızla ürettiği yüksek frekanslı titreşimleri %10-60 oranında azaltırken, 2 m derinlikte bu oran %50-70'e çıkmıştır. Ayrıca, 20 Hz üzerindeki frekanslara sahip titreşimlerin açık hendeklerin varlığında belirgin şekilde zayıfladığı ifade edilmiştir.

Ülgen ve Toygar (2015), açık hendek, su dolu hendek ve geofoam dolgulu hendeklerin; yapay bir darbe çekicinin ürettiği titreşimlere karşı yalıtım performanslarını tam ölçekli saha testleri ile karşılaştırmıştır. Çalışmada, 80 cm genişliğinde ve 6 m uzunluğunda bir açık hendek, 4.5 m derinliğe kadar kazılmıştır. Test sonuçları, açık hendeklerin diğer bariyerlere kıyasla beklenenden daha üstün bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Kontrol parametresi olarak seçilen

frekansın (25 Hz, 50 Hz ve 70 Hz) artmasıyla; daha büyük Rayleigh dalga boylarına ulaşılmış ve normalize edilmiş hendek derinliklerinin etkinliği vurgulanmıştır. Toygar ve Ülgen (2021), açık hendeklerin geometrik boyutlarının yanı sıra titreşim kaynağının tipi ve yerel saha koşullarının titreşim izolasyonu üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla tam ölçekli saha deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ise titreşim izolasyon performansının hendek derinliğinin gerçek boyutuna bağlı olduğunu ve normalize edilmiş derinliğin artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Ayrıca titreşim frekansının; yalıtım etkinliğini hendek derinliğinden daha fazla etkilediği ifade edilmiştir.

Zou ve ark. (2015, 2017), trenlerin neden olduğu titreşimlerin çevredeki binalar üzerindeki etkilerini ölçmüştür. Çalışmada, tren rayları boyunca yerleştirilen açık hendekler, drenaj kanalları ve hafif agregalı beton kullanılmıştır. Bu yöntemlerin titreşimlerin azaltılmasında etkili olduğunu ve belirli frekanslardaki titreşim genliklerinin analiz edilebilmesi için ivme/hız verilerinin 1/3 oktav bant analizi vb. tekniklerle işlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Sitharam ve ark. (2018), Hindistan'daki bir uzay ajansı binasının, içinde bulunduğu kampüsteki iç ve dış titreşim kaynaklarının ürettiği yer hareketlerine karşı izole edilebilmesi için; tren geçişi, yol silindiri hareketi ve bunların kombinasyonundan oluşan farklı durumlardaki titreşim genliklerinin ölçümünü yapmış; analizler sonucunda 1.5 m genişliğinde ve 5.5 m derinliğinde bir açık hendek önermişlerdir. Çalışmada; hendek derinliğinin izolasyon performansı bakımından önemli bir parametre olup, hendek genişliğinin ise etkisiz olduğu sonucuna varmışlardır.

Mahdavisefat ve ark. (2018), kaynağa göre farklı konumlarda 60 cm genişliğinde, 3 m derinliğinde açık bir hendek kullanmışlardır. Stabilite, güvenlik ve çevre ile ilgili konular göz önünde bulundurularak, hendek ayrıca farklı bileşimlerdeki kum-kauçuk karışımları ile doldurulmuştur. Açık hendek üstün izolasyon performansı göstermiş ve $1.5 \lambda_R$ derinliğinde bir hendek önerilmiştir.

Chew ve Leong (2019), 0.25 m genişliğinde, 1.1 m uzunluğunda, 1 m derinliğinde bir açık hendek kullanmış ve farklı yönlerdeki titreşimlerin genliklerini ölçmüştür. En iyi titreşim azaltma performansı hendeğin merkez hattında elde edilmiş ve bariyere olan mesafenin artmasıyla azalmıştır.

Huang ve ark. (2021), açık hendeklerin ve kompozit dalga bariyerlerinin izolasyon performanslarını karşılaştırmak amacıyla tam ölçekli saha testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, her iki tarafında 10 cm kalınlığında güçlendirilmiş beton bulunan, poliüretan tabakadan oluşan kompozit bariyerler kullanılmıştır. Bu bariyerler, 28 cm kalınlığında, 1.52 m derinliğinde ve 1.22 m uzunluğunda prekast ünitelerden oluşmuş ve farklı düzenlemelerle (tek bariyer, 2.6 m aralıklı çift bariyer ve 2.44 m uzunluğunda birleşik bariyer) yerleştirilmiştir. Sonuçlar, uzun bir bariyerin yakın çevresinde daha iyi izolasyon sağladığını, ancak açık hendeklerin her durumda en iyi performansı göstermediğini ve çift bariyerlerin de her zaman tek bariyerlerden üstün olmadığını ortaya koymuştur. Bariyerlerin etkinliği, frekans bandı boşluklarıyla ifade edilmiş ve etkin oldukları frekans aralıkları belirtilmiştir. Çift bariyerin tek bariyerden daha etkili olmamasının, bariyerler arasındaki mesafeden kaynaklandığı belirtilmiştir. Araştırmada, jeofonlar kullanılarak titreşim kayıtları alınmış ve diğer çalışmalardan farklı olarak bu kayıtlar ivme verilerine dönüştürülmüştür. Titreşim kaynağı olarak sismik çalışmalarda yaygın kullanılan T-Rex adı verilen üç eksenli sarsıcı kamyon kullanılmıştır.

İstegün (2024), İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren hattı yakınında, alüvyon zemin koşulları üzerine inşa edilmiş bir test binasının demiryolu kaynaklı titreşimlerden korunmasını incelemek amacıyla tam ölçekli saha çalışmaları gerçekleştirmiştir. Çalışmada, ince cidarlı gaz beton panellerle desteklenmiş dikdörtgen açık hendek tipi bir dalga bariyerinin izolasyon performansı değerlendirilmiştir. Hendek tasarımı; hem zemindeki stabilite sorunlarını çözmek hem de düşük yoğunluklu malzemeler kullanarak dalga genliklerinin büyümesini engellemek hedeflenmiştir. Bariyer tasarımı kullanılan gaz beton panellerin yanı sıra, odun talaşı, genişletilmiş cam kürecik ve strafor köpük gibi geri dönüştürülebilir dolgu malzemelerinin titreşim yalıtımına katkıları da incelenmiştir. Çalışma kapsamında, hendek derinliği 1 m, 1.5 m ve 2.5 m olarak değiştirilmiş, uzunluğu ise 5 m'den 10 m'ye artırılmıştır. Sonuçlar, artan derinliğin daha iyi izolasyon sağladığını, ancak uzunluğun izolasyon performansı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Ayrıca, PLAXIS 3D yazılımı kullanılarak saha verileriyle uyumlu bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve parametrik analizlerle gaz beton panellerle desteklenmiş hendek tipi bir ideal dalga bariyer modeli önerilmiştir.

Jauhari ve ark. (2023), saha çalışmalarında tekli ve ikili açık hendekler ile geofoam hendeklerin izolasyon performansını incelemiştir. Bu çalışmada, 0.5 m genişliğinde, 1 m derinliğinde ve 4.5 m uzunluğundaki açık hendekler, 2 m aralıklarla kazılmış ve kaynak ile ilk bariyer arasındaki mesafe 2 m ile 12 m arasında değişiklik göstermiştir. Çift açık hendeklerin, beklenildiği gibi diğer bariyerlere kıyasla daha yüksek bir performans sergilediği görülmüştür. Bariyerlerin kaynağa yakın konumlandırılması izolasyon etkinliğini artırmış ve en iyi performans, uyarım frekansının en yüksek olduğu durumda, %76'lık bir azalma ile elde edilmiştir. Ayrıca, tek ve çift açık hendeklerin normalize edilmiş derinliklerinin; sırasıyla 0.27 ve 0.14'ten büyük olduğu durumlarda, %50'den fazla titreşim azalma sağladığı belirlenmiştir.

Ahmad ve Al-Hussaini (1991), yüzeyde yayılan harmonik Rayleigh dalgalarının neden olduğu zemin titreşimlerini azaltmak amacıyla Sınır Elemanlar Yöntemi (BEM) kullanarak dikdörtgen açık ve dolu hendeklerin etkinliğini incelemiştir. Çalışmalarında, açık ve beton dolgulu hendeklerin düzlem-gerilme koşulları altında pasif izolasyon problemini çözme potansiyeli değerlendirilmiş, geometrik ve malzeme parametreleri dikkate alınarak homojen zeminlerde dikdörtgen hendeklerin titreşim azaltma etkinliğini öngörmek için tasarım parametreleri geliştirilmiştir. Ayrıca, tabakalı zeminlerin dalga yalıtımı üzerindeki etkilerine odaklanılmış ve çok katmanlı zeminlerin bir hendeğin dalga bariyeri performansını nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, açık hendeklerin zemin kaynaklı titreşimleri etkili bir şekilde izole edebilmesi için normalize edilmiş derinliğin 0.8'den büyük olması gerekmektedir. Sığ hendeklerde bariyer genişliği yalıtım performansı açısından önemli bir parametre olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, dolu hendeklerde hem derinliğin hem de genişliğin eşit derecede kritik olduğu tespit edilmiştir. Zeminin Poisson oranının dalga yalıtımı üzerindeki etkisi göz ardı edilebilirken, kayma dalgası hızı ve bariyer malzemesinin birim hacim ağırlığının titreşim genliklerinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Dolu hendekler için normalize edilmiş derinlik ve genişlik değerlerinin sırasıyla 1 ve 0.8'den büyük olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Coulter ve Hunt (2014), Rayleigh yüzey dalgasının engelleyici koşullardaki yayılımını laboratuvar ortamında incelemek amacıyla, doğal saha koşullarındaki elastik zemin ortamını içi jelatin dolu mikadan yapılmış bir hazne ile modellemiştir. Bu çalışmada rijit dalga bariyerini temsil etmek için sıkıştırılmış strafor kirişler kullanılmış ve

bariyerin etkisi yapay elektro-dinamik bir sarsıcının ürettiği harmonik titreşimler altında değerlendirilmiştir. Bu yöntem, laboratuvar koşullarında Rayleigh dalgalarının yayılımına ilişkin deneysel bir yaklaşım sunmaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Jet grout kolonlarının yapımı ve rijit dalga bariyeri uygulaması (Coulier ve ark, 2014).

Klein ve ark. (1997), harmonik dış yüklerin frekans içeriğini ve farklı kayma dalgası hızlarına sahip zemin özelliklerini göz önünde bulundurarak, yüzey dalgalarının yayılım mekanizmasını bariyerin konumuyla ilişkilendirerek analiz etmişlerdir.

Forchap ve Verbic (1994) ise arazi deneyleri yoluyla titreşim etkilerinin yayılımını kontrol altına almak amacıyla, zemin içerisinde ana kaya özelliği taşıyan yapay bir taban kaya modeli geliştirmiştir. Çalışmalarında, rijit tabanlı tek tabakalı bir zemin ortamında temel frekansın dış yükün frekans değerlerinden düşük olması durumunda dalga yayılımının gerçekleşmediğini göstermişlerdir.

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının neden olduğu çevresel titreşimler, katar yükü, seyahat hızı, trafik yoğunluğu ve etkiye süresi gibi parametreler dikkate alınarak araştırılmış ve zemindeki dalga yayılım mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için birçok saha çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Auersch (1988), Almanya’da işletilen ICE tipi yüksek hızlı yolcu trenlerinin 100-300 km/sa hızları arasında ürettiği titreşim genliklerini detaylı bir şekilde raporlamıştır. Benzer şekilde, Branderhorst (1997), Amsterdam ile Utrecht arasında 40-160 km/sa hızla seyreden yolcu trenlerinin oluşturduğu çevresel titreşimleri ölçerek, elde ettiği veri setini sayısal modellerin doğrulanması amacıyla araştırmacılara sunmuştur. Degrande ve Schillemans (2001) ise Paris ile Brüksel arasında 223-314 km/sa hızla hareket eden Thalys HST tipi yüksek hızlı trenin demiryolu hattında ve çevresindeki (4-72 metre arası

mesafelerdeki) titreşim etkilerini analiz etmişlerdir. Aynı zamanda, Adolfsson ve diğerleri (1999), İsveç'in Göteborg-Malmö arasındaki batı sahil hattında 200 km/sa üzerinde hızla seyreden X2000 tipi trenlerin çevresel titreşim üzerindeki etkilerini kayıt altına almıştır. Bu çalışmaların sonuçları, çevresel titreşimlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve yeni ulaşım sistemlerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli girdiler olarak öne çıkmaktadır.

Pek çok Avrupa ülkesinde olduğu gibi, Türkiye'de de yüksek hızlı demiryolu taşımacılığıyla birlikte yolcu trafiği yoğunlaşmış ve dingil yükleri artmıştır. Araştırmacılar, yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki yoğun tren hareketlerinin çevredeki yapılar, zemin ve altyapı üzerindeki etkilerini incelemeye; hassas bölgelerde ya da korunması gereken yapılar çevresinde titreşimlerin azaltılmasına ve en uygun demiryolu altyapı tasarımlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalara yönelmiştir. Xia ve diğerleri (2005), Çin'in Shenyang-Harbin demiryolu hattında, farklı hızlardaki yük ve yolcu trenlerinin titreşim etkilerini binalarda, köprü ayağında ve serbest zeminlerde incelemişlerdir. Titreşimlerin bina katlarında hız ve yük artışıyla arttığı, demiryolundan uzaklaştıkça ise serbest zeminde hızla azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, bazı bölgelerdeki jeolojik yapı nedeniyle enerji dalgalarının büyüdüğü ve bu durumun insan konforunu olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

Xia ve ark. (2009) Beijing-Guangzhou bölgesinde yaptığı başka bir çalışmada, farklı hızlardaki ağır yük ve hafif yolcu trenlerinin, demiryolu hattına yakın bir binadaki titreşim etkileri Amerikan FTA standartlarına göre değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, Galvin ve Dominguez (2009), İspanya'daki Cordoba-Malaga hattında AVE tipi trenlerin farklı hızlarda oluşturduğu titreşimleri ölçmüş ve bu verilerle geliştirdikleri 3D sayısal modelleri kalibre ederek modelleme yöntemlerinin kapasitesini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalar, yüksek hızlı trenlerin çevresel titreşimlerini azaltmaya ve altyapı tasarımlarını iyileştirmeye yönelik önemli veriler sağlamaktadır.

Kouroussis ve ark. (2016), demiryolu hattındaki destek koşullarının zemin kaynaklı titreşimlerin oluşumu ve yayılımı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, üç farklı destek tipi (kesme, dolgu ve eğimli bölüm) için yüksek hızlı demiryolu titreşimlerine ilişkin bir deneysel çalışma ve sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, Belçika'daki üç farklı demiryolu sahasında yürütülen deneylerde titreşim seviyeleri ve saha zemin özellikleri ölçülmüştür. Bu verilerden hareketle, her bir sahanın karmaşık zemin topolojisini modellemek amacıyla bir sonlu eleman modeli

geliştirilmiş ve modelin doğrulaması yapılmıştır. Çalışma, dolgu profillerinin, kesme ve eğimli profillere kıyasla daha düşük titreşim seviyeleri ürettiğini ve farklı hafriyat profillerinin zemin titreşim özellikleri üzerinde belirgin farklılıklar yarattığını göstermiştir. Bu doğrultuda, titreşim değerlendirmelerinde hafriyat profillerinin dikkate alınmasının önem taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lyratzakis ve ark. (2021), yüksek hızlı trenlerin (YHT) sebep olduğu trafik kaynaklı titreşimlerin hassas yapılar üzerindeki etkisini incelemiş ve bu titreşimleri azaltmak için kesit şevlerine genişletilmiş polistiren (EPS) blokları yerleştirilmesini önermiştir. Paris-Brüksel hattındaki saha ölçümleriyle doğrulanan üç boyutlu sayısal simülasyonlar, EPS bloklarının YHT kaynaklı zemin titreşimlerini etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir.

Baziar ve ark. (2019), yüksek hızlı trenlerin neden olduğu zemin titreşimlerinin yayılımını ve azaltılmasını incelemek için sekiz santrifüj testi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, tekli ve çiftli düzenlerde kullanılan geofoam bariyerlerin etkinliği değerlendirilmiştir. Sonuçlar, geofoam malzemesinin zemin titreşimlerini azaltmada etkili olduğunu ve tekli bariyerlerin titreşimleri %54.5'e kadar azaltabildiğini göstermiştir. Ancak, düşük giriş frekanslarında tekli bariyerlerin performansı yetersiz bulunmuştur. Çiftli bariyerlerin kullanımı ise bu sorunu gidererek titreşim azaltımını %14-35 oranında artırmıştır.

Li ve ark. (2016), Şanghay'daki ilk ticari Maglev hattında, Maglev trenlerinin neden olduğu titreşimleri saha ölçümleriyle incelemiştir. 150-430 km/sa hız aralığında, yedi test bölgesinde yapılan ölçümlerle köprü ayakları ve zeminin üç yöndeki ivme tepkileri analiz edilmiştir. Titreşimlerin tren hızı ve hat mesafesiyle ilişkisi incelenmiş, zemin titreşimlerinin 30 metreye kadar azaldığı görülmüştür. Kılavuz ray tasarımının özellikle enine titreşimlerde etkili olduğu, ancak düşey ve boyuna titreşimlerde daha zayıf bir etkisi bulunduğu tespit edilmiştir. Geleneksel yüksek hızlı trenlerle yapılan karşılaştırmalarda, Maglev trenlerinin farklı titreşim imzalarına sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma, Maglev sistemlerinin kentsel çevre ve yaşam kalitesi üzerindeki etkilerine yönelik önemli bulgular sunmaktadır.

Demiryolu ulaşım sistemlerine ilişkin çalışmalar incelendiğinde; genellikle kent içi hafif raylı sistemlerin titreşim genliklerini azaltmaya yönelik birçok çalışmada yapay dinamik yük kaynaklarının kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bununla birlikte,

demiryolu trafiğinin yüksek hızda seyrettiği ve güzergâhın zayıf zemin koşullarına sahip olduğu senaryolarda, tren kaynaklı zemin titreşimlerinin hem serbest zemin hem de korunması gereken yapılar üzerindeki etkilerini birlikte ele alan deneysel araştırmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Çelebi ve ark. (2009), elektrodinamik bir cihaz kullanarak 10-100 Hz frekans aralığında üretilen titreşimlerin dalga genliklerinin azaltılmasına yönelik kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, 1 m genişliğinde ve 2.5 m derinliğinde bir açık hendek inşa edilmiş, ancak hendeğin iç duvarlarında karşılaşılan stabilite sorunları nedeniyle bu duvarlar 15 cm kalınlığında betonarme kaplama ile güçlendirilmiştir. Araştırma kapsamında açık hendek, su dolu hendek, bentonit dolgulu hendek ve beton dolgulu hendek türleri test edilmiş; elde edilen bulgular, pasif izolasyonun aktif izolasyona kıyasla daha etkili bir yalıtım sağladığını ve bariyer performansının titreşim kaynağının frekansına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Karşılaştırmalar sonucunda ise açık hendeklerin en yüksek izolasyon performansını sunduğu belirlenmiştir.

François ve ark. (2012) çalışmalarında, Brüksel toplu taşıma sisteminin yakınlarındaki bir test sahasında, toprağa gömülü titreşim yalıtım panelinin tasarımını, kurulumunu ve etkinliğini incelemişlerdir. Bu yalıtım paneli, 20 Hz ve üzerindeki frekansları izole etmek amacıyla genişletilmiş polistren malzeme kullanılarak tasarlanmış olup, kurulum sırasında panelin yerinden hareket etmesini engellemek için beton yan panellerle desteklenmiştir. Deney sahasında yapılan çekiç darbeleri ile panelin performansı test edilmiş ve ayrıca sonlu eleman-sınır eleman yöntemleriyle yapılan sayısal modelleme ile ideal bir açık hendek kullanımı ve beton desteklerin etkisiz olduğu durumlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, polistren panelin açık hendeğe göre daha düşük performansa sahip olduğunu, ancak beton yan panellerin etkinliği üzerinde önemli bir değişiklik yapmadığını göstermiştir. Ayrıca, zemin ve dolgu malzemesi arasındaki rijilik farkının dolgu malzemesinin performansını belirlemede önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir.

Coulter ve ark. (2015), İspanya’da zayıf zemin üzerine yerleştirilen bir demiryolu hattı boyunca tam ölçekli arazi deneyleri yaparak, zemine göre daha rijit bir dalga bariyerinin etkinliğini test etmeyi amaçlamışlardır. Bariyerin inşa edilmeden önce zemin jet grout yöntemiyle güçlendirilmiş, ardından üst üste binen jet grout kolonlarından oluşan 7.5 m derinlik, 1 m genişlik ve 55 m uzunluğundaki rijit bariyerin

titreşim genliklerini azaltma performansı, hem deneysel hem de nümerik analizler ile değerlendirilmiştir.

Feng ve ark. (2017) tarafından, Çin'deki Pekin-Şanghay demiryolu hattında menfez, viyadük ve geçiş bölgelerinde yüksek hızlı trenlerin (250-350 km/sa) neden olduğu zemin titreşimleri incelenmiştir. Çalışmada, tren hattına paralel, dik ve düşey olmak üzere üç farklı doğrultuda ölçümler yapılmış ve hattın merkezinden uzaklık ile tren hızının titreşim genlikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, düşey ivme tepkisinin yakın alanlarda en yüksek seviyede olduğunu, ancak uzak alanlarda enine ivmelerin baskın hale geldiğini göstermiştir. Ayrıca, menfez veya viyadük varlığının yakın alanlarda boyuna titreşim genliklerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Naghizadehrokni ve ark. (2020) ise maksimum dinamik kuvvet genliği 15 kN olan bir yük kaynağı kullanarak oluşturulan titreşimlerin azaltılmasında dikdörtgen prizması ve üçgen biçimindeki hendeklerin aktif ve pasif yalıtım durumlarındaki etkinliğini 2D ve 3D sayısal modelleme yöntemleriyle araştırmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca, zemini kum-çakıl karışımı olan bir test sahasında geofoam dolgulu bir hendeğin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Deney bulgularıyla uyumlu sayısal modeller temel alınarak yapılan parametrik analizlerde, dikdörtgen prizması biçimindeki hendeklerde normalize edilmiş bariyer derinliğinin (D) 0.5'ten büyük olması gerektiği, ancak bu değer artmasının pasif yalıtım üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, üçgen biçimindeki yalıtım sistemlerinde bariyer derinliğinin daha belirleyici bir faktör olduğu ifade edilmiştir. Genel bir sonuç olarak, hem aktif hem de pasif yalıtım durumlarında bariyer derinliğinin dalga boyunun en az 0.6 katı olması gerektiği belirtilmiştir.

Titreşim sorunlarının sıkça görüldüğü yumuşak zeminlerde, literatür taramaları düşey (Jones ve Block, 1996; Pflanz ve ark, 2002; El Naggar ve Chehab, 2005; Buonsanti ve ark, 2009; Howard ve Warren, 2009; 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 performanslarına ilişkin geniş bir teorik çalışma alanı oluşturduğunu göstermektedir.

Ju ve Lin (2004), Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılımını ve tren geçişleri sırasında zeminde oluşan titreşimleri üç boyutlu sonlu elemanlar modeliyle incelemiş ve kritik hızın Rayleigh dalga hızına eşit olduğu durumlarda rezonans etkisinin meydana

geldiğini ifade etmişlerdir. Ju ve Li (2011) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, farklı seviyelerde su içeren açık hendeklerin titreşim izolasyon performansını değerlendirmek amacıyla üç boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, açık ve su dolu hendeklerin X ve Z yönlerindeki titreşimlerin izolasyonunda benzer davranış sergilediğini, ancak su dolu hendeklerin Y yönündeki titreşimlerin izolasyonunda etkisiz olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan 3 Hz'lik uyarım frekansı çok uzun bir Rayleigh dalga boyu ile sonuçlanmış ve bu durum açık hendeklerin performansında düşüşe neden olmuştur.

Adam ve von Estorff (2005), tren kaynaklı titreşimlerin azaltılması amacıyla farklı yoğunluklarda ve geometrik düzenlemelerde bentonit dolgulu hendekler kullanarak iki boyutlu sınır elemanı ve sonlu eleman yöntemlerini birleştiren analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında, açık hendeklerin daha iyi bir izolasyon performansı sağladığı görülmüş olsa da, bentonit dolgulu hendeklerin kullanımı sayesinde çökmeyi önleyici herhangi bir destek önlemine ihtiyaç duymaksızın daha derin bariyerlerin pratik olarak uygulanabildiği belirtilmiştir. Aynı zamanda, Adam ve Estorff (2005) geliştirdikleri zaman tanım aralığı algoritması ile yapı-zemin-dalga bariyer sistemini iki boyutlu olarak modellemiş, balastlı demiryolu üstyapısından geçen tren trafiğini periyodik davranış sergileyen darbe yükleriyle simüle etmişlerdir. Bu bağlamda, düşey dalga bariyerlerinin aktif ve pasif durumlarda çevredeki yapı titreşimlerini ne ölçüde azalttığını kontrol parametrelerine bağlı olarak incelemişlerdir.

Çelebi ve Göktepe (2012), hızlı demiryolu hattına yakın ve yumuşak zemin koşullarında inşa edilmiş yapıların kuvvetli titreşimlerden korunması amacıyla dalga bariyeri olarak yapay anakaya modelini araştırmışlardır. Geliştirdikleri iki boyutlu matematiksel modelde, Almanya'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında (ICE) kullanılan Lokomotif 103'ü dinamik yük kaynağı olarak dikkate alarak yapay taban kaya bariyer modelinin aktif ve pasif yalıtım performanslarını değerlendirmişlerdir. Elde edilen bulgular, bu tür bariyerlerin özellikle yumuşak zeminlerde etkin bir yalıtım sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Li ve ark. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, periyodik titreşim izolasyon bariyerlerinin (PVIBs) çevresel titreşimlerin yayılma yolu boyunca zayıflatılmasında önemli bir yöntem olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Bu çalışmada prefabrik montaj özelliklerine sahip bir periyodik kompozit kauçuk-beton bariyer

önerilmiş ve laboratuvar testleriyle bu bariyerin zemin kaynaklı titreşimleri zayıflatma performansı doğrulanmıştır.

Bose ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, yüzey (Rayleigh) dalgalarının yayılmasından kaynaklanan yer titreşimlerini azaltmak için hendeklerin kullanımına odaklanılmıştır. Çalışmada, açık ve dolgulu hendeklerin titreşim izolasyon verimliliğini etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla PLAXIS kullanılarak iki ve üç boyutlu (2D ve 3D) sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Parametrik çalışmalar yapılarak, hendeklerin geometrik ve malzeme özelliklerine dair optimum değerler belirlenmiştir. Sonuçlar, açık hendeklerde normalize edilmiş derinliğin, çok sık hendeklerde ise genişliğin belirleyici faktörler olduğunu göstermiştir. Dolgulu hendeklerde ise düşük yoğunluklu malzemelerin iyi performans gösterdiği, ancak performanslarının dolgulu malzeme ile zemin arasındaki kayma dalgası hızı oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, poliüretan köpük dolgulu hendeklerin harmonik yüklerden kaynaklanan titreşimleri azaltma performansı incelenmiş ve geofoam bariyerlerinin hareketli trenlerin oluşturduğu titreşimleri sönümleme etkinliği araştırılmıştır. Tren hızının artmasıyla bariyer verimliliğinin arttığı belirlenmiştir.

1.2.2. Hava kaynaklı titreşimlerin azaltılmasına yönelik yaklaşımlar

Demiryolu taşımacılığı, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlara sahip olsa da, özellikle yüksek hızlı trenlerin yaydığı gürültü, hem yolcular hem de çevrede yaşayan insanlar için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Özellikle de gürültüye uzun süre maruz kalmanın; stres hormonlarının salınmasına yol açarak kan basıncı ve kalp atış hızı gibi faktörleri etkilediğine ve insan sağlığı için büyük bir tehdit oluşturduğuna dair pek çok çalışma yapılmıştır (Babisch ve ark, 1994; Maschke ve ark, 2000; Selander ve ark, 2009; Haralabidis ve ark, 2011; Floud ve ark, 2013; Banerjee ve ark, 2014; Wothge ve ark, 2017). Bununla birlikte; Beutel ve ark. (2020) Orta Almanya’da gürültüye maruz kalan bir grup katılımcının 5 yıllık takip değerlendirmeleri sonucunda yayınladıkları çalışmada; gürültünün fiziksel sorunların yanı sıra uyku bozuklukları ve zihinsel sorunlara da neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, demiryolu gürültüsünün azaltılmasına yönelik çeşitli mühendislik çözümleri geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri gürültü bariyerleri olup, bu bariyerler demiryolu hattının çevresinde konumlandırılarak ses dalgalarının yayılımını sınırlamayı amaçlamaktadır.

Gürültü bariyerlerinin tasarımında temel bir yaklaşım sunarak mühendislik hesaplamalarına ışık tutan öncü araştırmacılardan Maekawa (1968), gürültü bariyerlerinin ses azaltım performansını değerlendirmek amacıyla deneysel ve analitik çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada, ses dalgalarının bir bariyer tarafından gölgelenmesi durumunda oluşan ek kayıplar analiz edilmiştir. Bariyerin izolasyon etkisini belirlemek için geometrik parametreler ve frekans bağımlılığı dikkate alınarak bir model geliştirilmiştir. Araştırmada, bariyerin kırınım nedeniyle sağladığı ek ses kaybının, ses kaynağı ile alıcı arasındaki yol farkına ve frekansa bağlı olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, ses kırınımı nedeniyle bariyerin sağladığı ek kayıp, belirli bir frekans aralığında lineer olmayan bir eğilim göstermektedir. Özellikle düşük frekansta kırınım etkisi daha belirgin olup, yüksek frekansta daha fazla zayıflama sağlanmaktadır. Bu bağlamda, bariyer yüksekliğinin artırılması ile sağlanan ek ses kaybının logaritmik bir fonksiyon ile ifade edilebileceği belirtilmiştir.

Ban ve Miyamoto (1975), yüksek hızlı demiryollarında gürültü kontrolü üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında, Shinkansen trenlerinin neden olduğu gürültünün kaynağını analiz etmiş ve farklı gürültü azaltma tekniklerini değerlendirmiştir. Çalışmalarında hava kaynaklı gürültü ile yapı kaynaklı gürültüyü ayrı ayrı ele almışlardır. Gürültü azaltma önlemleri arasında tekerlek titreşim yalıtımı, tekerlek-şasi etkileşimini azaltan yapısal düzenlemeler ve ses bariyerleri gibi çeşitli yöntemler test edilmiştir. Özellikle, tekerlek-ray temas noktasındaki gürültünün en baskın kaynak olduğu belirlenmiş ve bu noktaya yönelik ses emici malzemeler kullanılmıştır. Bununla birlikte, yapı kaynaklı gürültüyü azaltmada balast-mat ve beton viyadük altı kaplamalarının önemli ölçüde gürültü azalımı sağladığı tespit edilmiştir.

Rathe (1977), demiryolu gürültüsünün yayılma karakteristiklerini incelemiş ve özellikle hareketli gürültü kaynaklarının oluşturduğu ses basıncı dağılımını analiz etmiştir. Çalışmasında, demiryolu gürültüsünün bir dizi ayrı ses kaynağından meydana geldiğini ve her bir tekerleğin kendine özgü bir gürültü profiline sahip olduğunu belirtmiştir. Gürültünün yayılma sürecinde; geometrik zayıflama, hava ve zemin emilimi gibi faktörlerin etkisini değerlendirmiştir. Ayrıca; demiryolu tekerleklerinin dipol karakterine sahip olduğu ve bu durumun gürültü yayılımı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, demiryolu gürültüsünün yayılma modellenmesinde, nokta kaynağı modelinin yerine çizgisel kaynak modellerinin daha gerçekçi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Makarewicz ve ark. (1989), demiryolu gürültüsünün yayılımını ve gürültü bariyerlerinin etkinliğini inceleyen analitik ve deneysel bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, bariyerin farklı mesafelerdeki alıcılara sağladığı gürültü azaltımı, frekans bazında değerlendirilmiş ve deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır. Demiryolu kaynaklı gürültünün modellenmesinde, özellikle yüksek hızlı trenlerin aerodinamik ve mekanik gürültü bileşenleri dikkate alınmıştır. Sonuçlar, bariyerin etkinliğinin frekansa bağlı olarak değiştiğini ve yüksek frekansta daha büyük bir gürültü azaltımı sağlandığını göstermektedir. Alıcı noktalarının uzaklığı arttıkça bariyerin sağladığı toplam ses izolasyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, çalışma, meteorolojik değişkenlerin ve ölçüm belirsizliklerinin bariyer etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır.

De Vos (1996), demiryolu gürültüsünün kontrolüne yönelik modern yaklaşımların temelini oluşturması açısından literatürde önemli bir yer tutan çalışmada, TWINS programının geliştirilmesiyle optimize edilmiş tekerlekler gibi yenilikçi çözümlerin mümkün hale geldiğini vurgulamıştır. Ayrıca, mikrofon dizileriyle yapılan ölçüm tekniklerinin, gürültü kaynaklarının daha doğru ve ayrıntılı bir şekilde tanımlanmasına olanak tanıdığı ve bu sayede gürültü oluşumu ve yayılımı hakkında daha iyi bir anlayış sağladığı belirtilmiştir.

Hohenwarter (1996), bir demiryolu hattına farklı mesafelerde bulunan bir gürültü bariyerinin iletim kaybını belirlemek amacıyla ölçümler gerçekleştirmiştir. Yük trenlerinin geçişi sırasında alınan ölçümler; demiryolu hattına 25 m, 50 m ve 100 m uzaklıkta, farklı yüksekliklere yerleştirilmiş mikrofonlar kullanılarak yapılmıştır. Çalışma, müstakil evlerin bulunduğu bir yerleşim alanındaki dar bir sokak boyunca yürütülmüştür. Gürültü kaynağını tanımlamak amacıyla, herhangi bir gürültü bariyeri olmaksızın demiryolu hattından 25 m uzaklıkta gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu yöntem, belirli bir mesafede sabit bir gürültü kaynağı sağlayarak bariyerlerin gürültü azaltma etkisini hesaplamada yaygın olarak kullanılan yaklaşımların doğruluğunu inceleme imkânı sunmuştur. Ölçümlerde, gürültü kaynağının demiryolu eksenini üzerinde 0,3 m yükseklikte olduğu varsayılmış ve 10 m uzunluğundaki bölümlere ayrılarak her bir kaynak noktası için enerji eşdeğer gürültü seviyesi hesaplanmıştır. Gürültü bariyerinin iletim kaybı, Maekawa'nın deneysel sonuçları kullanılarak belirlenmiş ve gürültü bariyerinin sağladığı A-ağırlıklı ses seviyesindeki azalmanın, ölçüm mesafesi ve yüksekliğine bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir.

Bariyerin arkasındaki ölçüm noktalarında, serbest alan ölçümlerine kıyasla yaklaşık 13-26 dB arasında bir gürültü azaltımı elde edilmiştir.

Yüksek performanslı gürültü bariyerleri tasarlamak, sayısal modelleri doğrulamak ve tam ölçekli geliştirilmiş bariyerleri test etmek amacıyla Euroecran (1995) adlı bir iş birliği projesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel bulgularına göre, bariyerin raydan uzaklığı, yüksekliği ve üst kısmının şekli gürültü azaltımında en önemli parametrelerdir. Buna karşılık, bariyerin kalınlığının gürültü azaltımı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Etkin bir sonuç elde edebilmek için, bariyerin en az üçte birinin ses emici malzeme ile kaplanması gerektiği tespit edilmiştir. Ancak, gürültü azaltımı açısından bariyerin tamamının emici malzeme ile kaplanmasının ek bir avantaj sağlamadığı belirlenmiştir. Çalışmalar, tren ile bariyer arasındaki yansımaların, ses emici malzeme veya eğimli bariyerler kullanılarak sınırlandırılması gerektiğini göstermektedir. Raydan 5 metreden daha uzak mesafeye yerleştirilen bariyerlerde, eğimli bariyerler ile ses emici malzeme kullanılan düşey bariyerlerin aynı seviyede iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Chew (2000), tren gürültüsünün düşey düzlemdeki yönlülük karakteristiğini incelemiş ve yüksek binalardan gelen şikayetler doğrultusunda, tren gürültüsünün yükseklik arttıkça artış gösterdiğini tespit etmiştir. Çalışmada hem zeminde bulunan ray hattı hem de yükseltilmiş viyadük üzerindeki ray hattı için ölçümler gerçekleştirilmiş ve her iki durumda da ses seviyesinin, gözlem açısının artışıyla yaklaşık 6 dBA yükseldiği belirlenmiştir. Mevcut tren gürültüsü modellerinin bu durumu yeterince açıklayamadığını belirten Chew, modifiye edilmiş bir dipol modeli önererek, ölçülen gürültü profilleri ile daha iyi bir uyum sağlandığını göstermiştir. Sonuç olarak, tren gürültüsünün özellikle yüksek binalarda daha belirgin hissedildiği ve modellemelerde bu etkinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Kim ve Kim (2011), yüksek hızlı tren gövde yapısının ses iletim kaybını, hem deneysel hem de sayısal analizler kullanarak incelemiştir. Çalışmada, raylı taşıtlarda kullanılan hafif yapısal malzemelerin ses yalıtım performansının, ağırlık azalmasıyla birlikte düştüğü vurgulanmış ve yeni yöntemler geliştirilerek bu kaybın telafi edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada, bal peteği yapısına sahip panellerin ses yalıtım özellikleri değerlendirilmiş ve farklı frekans aralıklarında rezonans etkilerinin önemli olduğu tespit edilmiştir.

Belingard ve ark. (2012), yüksek hızlı trenlerin (YHT) neden olduğu çevresel gürültünün azaltılmasında gürültü kaynağı ve iletim yolu üzerinde yapılan iyileştirmeleri incelemiştir. Çalışmada, 380 km/sa hızla hareket eden YHT'lerin neden olduğu gürültüyü azaltmada gürültü bariyerlerinin etkinliği deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle, literatür taraması yapılarak mevcut bariyerlerin etkinliği ve olası iyileştirme yöntemleri değerlendirilmiş, ardından “Y” şekilli modüler bir gürültü bariyeri prototipi geliştirilmiştir (Şekil 1.4). Fransa'daki bir TGV hattı boyunca inşa edilen prototip, farklı konfigürasyonlarla test edilmiştir. Sonuçlar, ses yutucu malzemelerin ve çoklu kırınım kenarlarının bariyerin etkinliğini artırdığını göstermiştir. Ticari hızda (320 km/sa), ses yutucu malzemeler kullanılan bariyerler, serbest saha koşullarına kıyasla 4-5 dBA ek gürültü azalımı sağlamıştır. Daha yüksek hızlarda (375 km/sa), çoklu kırınım kenarlarının geleneksel bariyerler kadar etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, tren hızları arttıkça çatıdan yayılan aerodinamik gürültünün baskın hâle geldiği ve bariyer yüksekliğinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, yüksek hızlar için bariyer yüksekliğinin artırılması veya aerodinamik gürültünün kaynağında azaltılması önerilmiştir.



Şekil 1.4. Modüler gürültü bariyeri uygulaması (Belingard ve ark, 2012).

Deng ve ark. (2014), yüksek hızlı trenlerin dış gürültü spektrumlarını belirlemek için bir şema geliştirmiştir. Çalışmada, Çin'de yüksek hızlı trenlerin dış gürültü karakteristikleri analiz edilmiş ve gürültü kaynaklarını tespit etmek için gelişmiş ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Ayrıca, ölçümün zor olduğu noktalarda gürültü seviyesini tahmin eden bir model geliştirilmiş ve test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model ve şema, yüksek hızlı trenlerin gürültü yönetimine katkı sağlamakta ve ölçüm yapılamayan alanlarda dış gürültü spektrumlarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Li ve ark. (2015), Çin'deki yüksek hızlı demiryolu ve kent içi raylı sistemlerde yaygın olarak kullanılan öngermeli beton kutu kirişli köprülerin akustik performansını incelemiştir. Çalışma kapsamında, Chengdu–Dujiangyan Banliyö Demiryolu üzerindeki Pixian Viyadüğü'nde saha ölçümleri gerçekleştirilmiş ve 32 m açıklığa sahip tek ve çift hatlı köprülerin gürültü ve titreşim karakteristikleri analiz edilmiştir. Köprü altındaki, köprüden uzak mesafedeki ve açıklık bölgesine yakın konumlardaki gürültü zaman ve frekans alanında incelenmiş, ayrıca kutu kirişin alt plakası üzerindeki titreşimler ölçülmüştür. Gürültü seviyesinin mesafeye ve tren hızına bağlı değişimi değerlendirilmiş ve matematiksel ifadelerle modellenmiştir. Sonuçlar, çift hatlı köprülerde 50 Hz, tek hatlı köprülerde ise 63 Hz'de belirgin tepe frekansları olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte köprü kaynaklı gürültüde titreşim rezonansının akustik çakışmadan daha belirgin olduğunu ve gürültü azaltımında kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Kitagawa ve ark. (2015), demiryolu hatları boyunca gürültünün azaltılması amacıyla ses bariyerlerinin akustik performanslarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, tipik Shinkansen demiryolu koşullarında çeşitli ses bariyerlerinin akustik performansları, ölçekli modelleme yoluyla laboratuvar ortamında değerlendirilmiştir. Ölçekli modelleme çalışmalarında, farklı tür ve şekillerdeki ses bariyerlerinin Shinkansen gürültüsü üzerindeki etkileri araştırılmış ve en etkili bariyer tipinin Y-profil olduğu belirlenmiştir. Y-profil bariyerin etkinliği, bariyer ile araç yüzeyi arasındaki çoklu yansımaların neden olduğu gürültü artışını azaltması ve çift kırınım etkisiyle bariyerin arkasındaki gölge alanı genişletmesi ile açıklanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, Y-profil bariyerin gerçek Shinkansen araçları ile yapılan saha testleriyle etkinliği değerlendirilmiş ve laboratuvar ölçümleriyle benzer eğilimler gözlemlenmiştir.

Poisson (2015), yüksek hızlı trenlerde (YHT) gürültü kaynaklarını, ölçüm yöntemlerini ve azaltım stratejilerini incelemiştir. Çalışmada, yuvarlanma, aerodinamik ve ekipman gürültüsünün tren hızına ve bakım durumuna bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Yuvarlanma gürültüsünün, ray ve tekerlek yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu ve bakım ile 3-4 dBA azaltılabileceği gösterilmiştir. Aerodinamik gürültünün ise 320 km/sa hızın üzerinde baskın hale geldiği ve burun tasarımı, pantograf ve bogi alanlarının bu gürültüye katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Gürültüyü azaltmak için tek kollu pantograf, aerodinamik burun tasarımı ve

inter-vagon diyaframları önerilmiştir. Ekipman gürültüsü özellikle durağan durumda ve düşük hızlarda önemli hale gelmekte olup, fanlar ve kompresörlerin optimize edilmesiyle 8-10 dBA azaltım sağlanabileceği belirtilmiştir. Gürültü bariyerlerinde ise, çatı monteli sistemlerin pantograf kaynaklı gürültüyü 7-8 dBA azaltabileceği gösterilmiştir.

De Vos (2016), *Railway Noise in Europe* adlı raporunda; Avrupa'daki demiryolu gürültüsünün mevcut durumunu, etkilerini ve gürültü azaltma yöntemlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Rapora göre; demiryolu taşımacılığında gürültü azaltma önlemleri, çevre koşullarına ve elde edilmek istenen gürültü basıncı azaltma seviyesine bağlı olarak farklı konumlarda uygulanabilmektedir. Genellikle, en yaygın olarak kullanılan çözümler yayılma yolu seviyesinde veya alıcı seviyesinde uygulanan çözümler olup, konut yoğunluğunun yüksek olduğu yerlerde yayılma yolu üzerinde hareket eden çözümler ekonomik açıdan daha avantajlıdır. Gürültüyü azaltmaya yönelik geleneksel önlemler arasında yüksek ses bariyerleri, bina cephe yalıtımları ve fren sistemlerinde yapılan teknolojik iyileştirmeler bulunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek bariyerlerin görsel kirlilik ve mekânsal kapanma gibi dezavantajları nedeniyle, demiryolu sektöründe daha düşük yükseklikte ve ses emici malzemelerle donatılmış bariyerlere yönelik araştırmalar artmaktadır.

Bunn ve Zannin (2016), kentsel bölgelerde demiryolu gürültüsünün neden olduğu çevresel etkileri inceleyerek, Curitiba şehrindeki demiryolu hattının çevresinde gürültü seviyelerini değerlendirmiş ve olası azaltım stratejilerini analiz etmiştir. Çalışmalarında, gürültünün özellikle hastaneler ve okullar gibi hassas alanlarda ciddi çevresel sorunlara yol açtığını tespit etmişlerdir. Gürültü azaltımı için üç senaryo simüle edilmiştir: (1) tren düdüğünün kaldırılması, (2) akustik bariyerlerin inşası ve (3) demiryolu hattının kentsel alandan çıkarılması. Yapılan modelleme çalışmaları, tren düdüğünün kaldırılmasının seviyeleri 10-30 dBA arasında düşürdüğünü, akustik bariyerlerin ise hastaneler çevresinde 2 dBA, okullar çevresinde ise 8 dBA kadar gürültü azalımı sağladığını göstermiştir. Demiryolunun kentsel alandan kaldırılması durumunda ise hastanelerde 4-6 dBA, okullarda ise 12 dBA azalma gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu tedbirlerin tek başına yeterli olmadığı, demiryolu gürültüsünün yasal sınırların altına düşürülebilmesi için birden fazla önlemin entegre edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Vogiatzis ve Kouroussis (2017), kentsel raylı sistemlerin neden olduğu yer kaynaklı titreşim ve gürültünün çevresel etkilerini incelemiş ve tahmin yöntemlerini değerlendirmiştir. Avrupa'daki metropollerden elde edilen veriler, tren tipi ve tekerlek-ray temas koşullarının titreşim oluşumunda önemli rol oynadığını göstermiştir. Gürültü haritalama yöntemleri, yoğun raylı sistem trafiğinin yol açtığı gürültü maruziyetini büyük ölçekli bir şekilde değerlendirebilmek için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, ray kaynaklı gürültüyü azaltmaya yönelik etkili çözümler sunmayı amaçlayan Quiet-Track projesi ele alınmıştır. Bu proje, ray tabanlı gürültü azaltım sistemleri ve bakım stratejileri geliştirerek en az 6 dBA düzeyinde bir azalma sağlamayı hedeflemiştir. Atina'daki Attiko Metro hattında gerçekleştirilen simülasyon ve saha testlerinde; raylar arasına yerleştirilen ses emici paneller, ses yansıtıcı bariyerler ve ray sönümleyicileri olmak üzere üç farklı gürültü önleme tipi değerlendirilmiştir. Bu önlemler uygulandıktan sonra, gürültü seviyesinin 78.1 dBA'den 68.9 dBA'ya düştüğü ve toplamda 9.2 dBA azalma sağlandığı tespit edilmiştir.

Fei (2017), yüksek hızlı demiryolu gürültü bariyerlerinin akustik performansını incelemek amacıyla, farklı yüksekliklere sahip bariyerlerin iletim kaybı değerlerini çeşitli koşullar altında analiz etmiştir. Öncelikle, demiryolu gürültüsünün oluşumu ve yayılımını incelemek için tekerlek-ray etkileşiminden kaynaklanan gürültü, aerodinamik gürültü, pantograf gürültüsü ve köprü yapısal gürültüsünü içeren çoklu gürültü kaynaklarına dayalı bir model oluşturulmuştur. Bu model, simülasyon sonuçları ve ölçüm verileriyle doğrulanmıştır. Daha sonra, bu model kullanılarak farklı yüksekliklerdeki gürültü bariyerlerinin çeşitli tren hızlarında, hem altyapı hem de köprü kesitlerinde gürültü azaltma üzerindeki etkileri simüle edilmiştir. Demiryolu sınırındaki farklı alıcılarda elde edilen iletim kaybı değerleri analiz edildikten sonra, bariyer yüksekliği (h) ile iletim kaybı arasındaki ilişki formülize edilmiştir. Buna göre, Çin'deki altyapı kesitleri için uygun dikey gürültü bariyeri yüksekliğinin 3.45 veya 3.95 m, köprü kesitleri için ise en az 3.15 m olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Demiryolunun 350 km/sa üzerindeki hızlar için tasarlanması durumunda ise bariyer yüksekliğinin artırılması önerilmektedir.

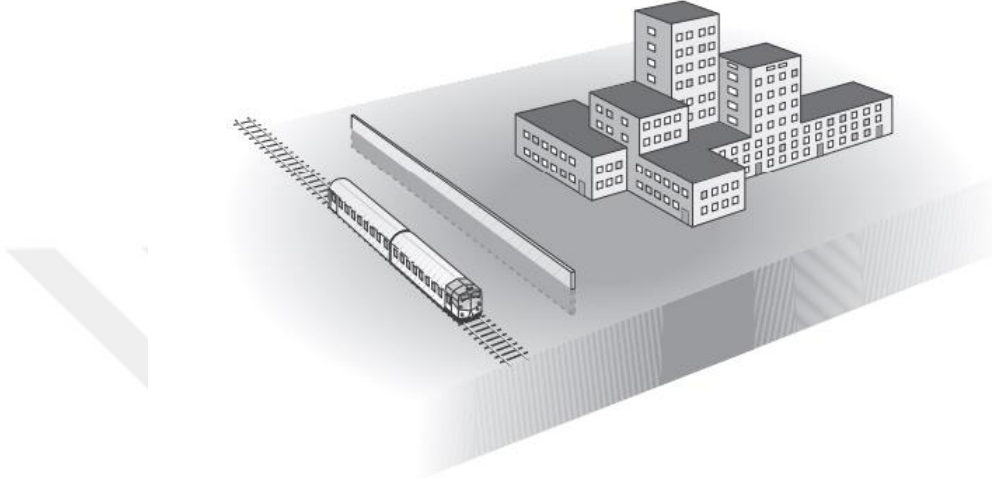
Sarıkavak ve Boxall (2019), Türkiye'deki yüksek hızlı tren hatlarının gürültü ve titreşim etkilerini değerlendirmiş ve ulusal ile uluslararası düzenlemeleri inceleyerek, yüksek hızlı tren sistemleri için aşılmaması gereken sınır mesafelerini hesaplamıştır.

87 dBA geçiş gürültüsü için (ray ekseninden 25 m uzaklıkta ve ray başından 3,5 m yükseklikte llen $L_{pAeq, Tp}$) belirlenen mesafe 28 m iken, 65, 60 ve 55 dBA eşdeğer ses seviyeleri için ($L_{pAeq, gündüz}$; $L_{pAeq, akşam}$ ve $L_{pAeq, gece}$) bu mesafeler sırasıyla 160, 272 ve 469 m olarak hesaplanmıştır. Bu sınır mesafeler, Türkiye demiryolu haritasında tampon bölge olarak tanımlanmış ve nüfus haritası ile birleştirilerek, gürültüye maruz kalacak kişi sayısı belirlenmiştir. Yoğun nüfuslu şehirler için yapılan hesaplamalarda, 87 dBA sınırını aşan gürültüye maruz kalan kişi sayısı Ankara’da 2325, İştambul’da 22.839 ve İşmir’de 3184 olarak belirlenmiştir. Türkiye yönetmeliklerine göre 65, 60 ve 55 dBA sınır değerleri esas alındığında, bu sayıların Ankara’da 10.767, 19.298 ve 35.951; İştambul’da 125.033, 210.360 ve 357.041; İşmir’de ise 17.340, 29.026 ve 49.318 olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, Türkiye’de insan sağlığını korumak için gürültü azaltım önlemlerinin gerekliliğini göstermekte ve bu doğrultuda olası stratejiler tartışılmaktadır.

Zhang ve ark. (2019), yüksek hızlı tren (YHT) gürültüsünü azaltmada etkili bir yöntem olarak yarı kapalı gürültü bariyeri (SCNB) geliştirmişlerdir. SCNB, geleneksel düşey bariyerlere kıyasla daha karmaşık hizmet koşullarına sahiptir; trenin hava akımı basıncı ve köprü tabliyelerinden iletilen titreşim dalgaları, bariyerin akustik performansını etkileyebilir. Bu alışmada, SCNB’nin gerçek hizmet koşullarındaki akustik performansı; saha ölçümleri ve sayısal simülasyonlarla değerlendirilmiş, özellikle gürültü azaltma etkisi ve yayılım yolları incelenmiştir. Sonuçlar, SCNB’nin mevcut 3.15 m yüksekliğindeki düşey bariyerlere kıyasla yaklaşık 6 dBA daha fazla gürültü zayıflatma sağladığını göstermiştir. Ayrıca bariyerin titreşimlerinden kaynaklanan yapısal gürültünün toplam gürültüye katkısının düşük olduğu, ana kaynağın ise iletilen gürültü olduğu ifade edilmiştir. Genel olarak, SCNB’nin gerçek hizmet koşullarında yüksek performans gösterdiği, geleneksel düşey bariyerlerden daha etkili olduğu ve gürültü azaltma açısından önemli bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır.

Peplow ve ark. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, zemin titreşimi ve gürültü bariyerlerinin birleştirilmesinin etkinliği incelenmiştir (şekil 1.5). Bu amaçla, yer titreşimi için yarı-analitik sonlu elemanlar yöntemi ve ses yayılımı için sınır elemanlar yöntemi ile sayısal deneyler yapılmıştır. Çalışmada, yer yüzeyine sağlam bir şekilde bağlı veya toprağa gömülmüş düşey bariyerlerin çeşitli konfigürasyonlarının titreşim ve gürültü azaltma üzerindeki etkisi parametrik analizlerle incelenmiştir. Ardından,

gürültü ve yer titreşimi bariyerlerinin birleşik etkisi değerlendirilerek, bu bariyerlerin, hattın kenarındaki sakinler üzerindeki olumsuz etkileri azaltma potansiyeli araştırılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmanın sonucunda, tren hattından 80 m uzaklıkta yerleştirilen ve gömülü bir şekilde 4 m'lik beton duvarla entegre edilmiş tipik 3 m'lik gürültü perdesinin, 12 dB'lik bir gürültü kaybı sağladığı ve titreşim genliklerinde %8'lik bir azalma yarattığı gözlemlenmiştir.



Şekil 1.5. Gürültü ve zemin titreşimi bariyerlerinin birleşik olarak uygulanması (Peplow ve ark, 2021).

Hızlı transit demiryolları, genellikle tünel açma işlemlerinin yüksek sermaye maliyeti ile havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin işletme giderlerinden kaçınmak amacıyla mümkün olduğunca yer üstünde inşa edilmektedir. Ancak, yerleşim ve ticari binaların veya konutların yakınındaki yükseltilmiş demiryolu hatlarından ya da viyadüklerden geçen trenlerin oluşturduğu gürültü, pek çok şehirde önemli bir sorun teşkil etmektedir. Otoyol, ana yollar ve inşaat sahalarındaki gürültüyü azaltmak için gürültü bariyerleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna karşın, yükseltilmiş demiryolu hatları veya viyadüklerdeki tren gürültüsünü azaltmaya yönelik gürültü bariyerlerinin tasarımı ve performansı üzerine yapılmış çalışma sayısının sınırlı olduğu bilinmektedir.

He ve ark. (2015), yüksek hızlı trenlerin (YHT) geçtiği viyadüklerde kullanılan gürültü bariyerlerinin hem akustik performansını hem de değişken rüzgâr basıncına bağlı olarak oluşan aerodinamik yük etkilerini incelemiştir. Çalışmada, farklı yük azaltıcı bariyerlerin ses yalıtım performansı sayısal modellemelerle değerlendirilmiş ve MLE yöntemi kullanılarak doğrulanmıştır. YHT gürültüsünün kaynağını belirlemek için yapılan ölçümlerde; tekerlek-ray, kapı, bağlantı ve pantograf bölgelerinin temel

gürültü kaynakları olduğu tespit edilmiştir. Özellikle tekerlek-ray bölgesinde yuvarlanma ve aerodinamik gürültünün diğer bölgelere kıyasla çok daha yüksek seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, V şeklindeki bariyerin en yüksek ses yalıtım performansına sahip olduğunu göstermektedir. 30 m uzaklıkta ve 1.5 m yükseklikteki V bariyer için ölçülen iletim kaybı 2.6 dB olarak bulunmuştur. Panjur şeklindeki bariyer, yakın alanda silindirik bariyere göre daha iyi performans gösterirken, uzak mesafede daha düşük yalıtım sağlamaktadır. Ayrıca, bariyerlerin ses yalıtım performansının frekansa bağlı olarak değiştiği, yüksek frekanslarda girişim etkisinin arttığı belirlenmiştir.

Lee ve ark. (2021) tarafından Singapur Demiryolu Gürültü Bariyeri Programı kapsamında yürütülen çalışmada, Singapur'daki çeşitli konut bölgelerinde yerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, tren gürültüsünü azaltma açısından farklı gürültü bariyerlerinin etkileri incelenmiş ve Singapur MRT sisteminde kullanılan dikey gürültü bariyerleri ile Tayvan'ın Taipei metro hattındaki gürültü bariyerlerinin performansları karşılaştırılmıştır. Akustik haritalama sonuçlarına göre, simüle edilen gürültü bariyerlerinin konutlara ulaşan gürültü seviyelerinde 5-12 dBA arasında bir azalma sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 1.6. Yükseltilmiş raylarda gürültü bariyeri uygulaması (Lee ve ark, 2021).

Lázaro ve ark. (2022), demiryolu trafiğinde kullanılmak üzere, düşük yükseklikte bir akustik bariyer geliştirmişlerdir. Bu çözüm, bariyer geometrisinin optimize edilmesi ve akustik performansı artırmak amacıyla gözenekli bir malzemenin entegrasyonunu içeren iki aşamalı bir süreçle tasarlanmıştır. Porto metropol bölgesindeki demiryolu çevresinden elde edilen ses basıncı düzeyi kayıtları kullanılarak; gözenekli malzemenin eşdeğer bir akışkan olarak simüle edildiği ve malzemenin akustik soğurma özelliklerini dahil eden çok bölgeli Sınır Eleman Yöntemi (BEM) ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım, yansımaların kaynağa ve ray hattına doğru

yönlendirilmesini sağlayarak, enerjinin büyük bir kısmını gürültü kaynağına geri göndermektedir. Bu çözümde, ray hattının akustik soğurma kapasitesinden yararlanılmış ve enerjinin bir kısmı absorbe edilmiştir. Ayrıca, bariyer ve demiryolu aracı arasındaki yansımaların neden olduğu enerjiyi soğurmak amacıyla, iyi bir akustik soğurma kapasitesine sahip ve açık hava koşullarına dayanıklılık sağlayan gözenekli bir beton tabakası eklenmiştir. Sonuçlar, gözenekli malzeme kullanımının enerji soğurma performansını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Gözenekli malzemeye desteklenen kavisli çözüm, tüm hesaplanan frekans aralığında tanımlanan alıcılarda 10 dB'i aşan bir iletim kaybı (IL) sağlamıştır.

Lourenço De Sousa ve ark. (2022), demiryolu trafiğinden kaynaklanan gürültünün azaltılması hakkında yaptığı çalışmada, düşük yükseklikteki (1.5 m) gürültü bariyerlerinin etkinliğini CNOSSOS-EU ve FTA metodolojileriyle karşılaştırmalı olarak incelemiş ve Sınır Elemanlar Modeli (BEM) kullanarak analiz etmişlerdir. Sonuçlar, düşük yükseklikteki bariyerlerin korunan bölgelerde ses basınç seviyelerini düşürdüğünü ve bariyer yüzeyine gözenekli malzeme eklenmesinin bu etkiyi daha da artırdığını göstermektedir. CNOSSOS-EU ile hesaplanan ses basıncı seviyelerinin, FTA metodolojisiyle elde edilen değerlere kıyasla 2 ila 5 dB daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, BEM ile yapılan analizler, özellikle düşük kotlardaki alıcılarda önemli ölçüde gürültü azalımı sağlandığını ortaya koymaktadır. Bariyer yüksekliği arttıkça etkinlik artmakla birlikte, 1.5 m yüksekliğindeki bariyerin de 1000 Hz frekansında 10 dB'den fazla zayıflama sağladığı görülmüştür.

Eski buharlı lokomotiflerin gürültüsü buharlı motorlar tarafından üretilirken, modern elektrikli yüksek hızlı trenlerin gürültüsü tekerlek-ray yuvarlanma gürültüsü ve tren hava akımının neden olduğu aerodinamik gürültüden oluşur. Bu nedenle demiryolu ulaşımından kaynaklanan gürültünün azaltılmasına yönelik literatür incelendiğinde; tekerlek-ray yuvarlanma gürültüsünün azaltılması (Peters, 1974; Rathe, 1977; Ten Wolde ve van Ruiten, 1983; Makarewicz ve ark, 1989; Hohenwarter, 1990; Kurze, 1996; Dittrich ve Janssens, 2000; Thompson ve Jones, 2000; Zhang ve ark, 2000) ya da aerodinamik gürültünün azaltılmasına (King, 1977; Yang ve ark, 2013; Thompson ve ark, 2015; Wang, 2016; Zhang, 2017; Xiao-Ming ve ark, 2018; Dai ve ark, 2018; Liang ve ark, 2020; Li ve ark, 2020) odaklanan pek çok çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir.

Mellet ve ark. (2006), yüksek hızlı trenlerin neden olduğu aerodinamik ve yuvarlanma gürültüsünü inceleyerek, farklı hızlardaki gürültü seviyelerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, TGV-Duplex trenleri üzerinde yapılan deneysel ölçümler kullanılmış ve trenin hızı arttıkça aerodinamik gürültünün baskın hale geldiği belirlenmiştir. 200-250 km/sa hızlarında yuvarlanma gürültüsü baskınken, 300 km/sa üzerindeki hızlarda güç vagonlarından kaynaklanan aerodinamik gürültünün daha belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Özellikle pantograf yuvası ve ön cam çevresindeki akış türbülanslarının önemli bir gürültü kaynağı olduğu ortaya konmuştur. Yapılan akustik haritalama ve mikrofön dizilimleriyle, tekerlek, pantograf ve bogi alanlarının ses emisyonları detaylı olarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak, aerodinamik gürültü kaynağının tren hızıyla birlikte arttığı ve belirli hızların üzerinde yuvarlanma gürültüsünden daha baskın hale geldiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, gürültüyü azaltmaya yönelik tasarım değişikliklerinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Liu ve ark. (2023), yüksek hızlı trenlerin (HST) geçişi sırasında dikey gürültü bariyerlerinde oluşan aerodinamik yükleri ve bunların dinamik etkilerini incelemiştir. Çalışmada, aerodinamik basınç karakteristikleri, ölçüm yöntemleri ve mevcut basınç modelleri ele alınmış, ayrıca bariyerlerin dinamik tepkileri ve yorulma analizleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tren geçişi sırasında bariyerlerde yüksek genlikli basınç ve emme zirvelerinin oluştuğunu, basıncın tren hızıyla arttığını ve bariyer ile hat merkezi arasındaki mesafenin bu yükleri etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, mevcut aerodinamik yük modellerinin her tren koşulu için yeterli olmadığı ve tasarımda yorulma dayanımının dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

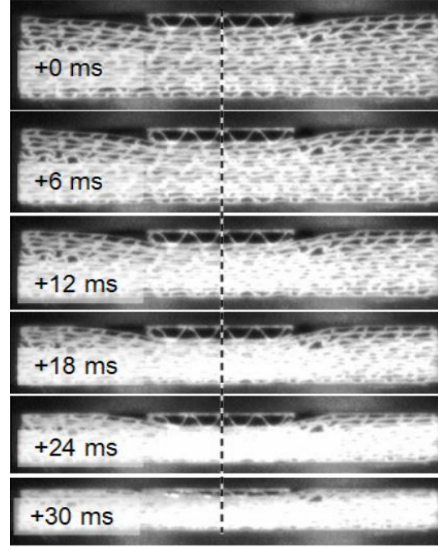
Ouyang ve ark. (2023), uzun tünellerde hareket eden yüksek hızlı trenlerin neden olduğu düzensiz akış alanı ve yakın alan aerodinamik gürültüsünü incelemiştir. Çalışmada, 1/25 ölçekli sekiz vagonlu bir tren modeli kullanılarak, açık hava ve tünel ortamlarında rüzgar tüneli testleri ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Analizler, tünel içinde tren hareket ettiğinde maksimum ters yönde rüzgar hızının 28 m/s'ye ulaştığını ve tünel duvarlarının akustik yansımalarının, tren gövdesinde toplam ses basıncını artırdığını göstermiştir. Tünel içindeki ses gücü seviyesindeki artışın %84,7'sinin akustik yansımalar nedeniyle olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 520 Hz ve 800 Hz'de tünel boşluğu rezonansının, 1440 Hz'de pantograf yuvası dikey modunun ve 2600 Hz'de bogi boşluğu rezonansının belirgin gürültü kaynakları olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek hızlı trenlerin tünel içindeki aerodinamik gürültü

seviyelerini azaltmak için akustik yutucu duvar kaplamalarının ve aerodinamik tasarım optimizasyonlarının önemli olduğu vurgulanmıştır.

1.2.3. Titreşim ve gürültü yalıtımında kullanılan yenilikçi malzemeler: oluklu mukavva örneği

Düşük empedans ve yüksek enerji soğurma kapasitesine sahip olması nedeniyle oluklu mukavva, bu tez çalışması kapsamında üretilen kutu bariyerin ana malzemesi olarak kullanılmış; zemin ve hava kaynaklı titreşimleri azaltmaya yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Oluklu yapıya sahip malzemeler; enerji soğurma kapasiteleri nedeniyle literatürdeki pek çok çalışmanın konusu olmuştur. (Eyvazian, 2016; Fortin ve ark, 2018; Alkhatib ve ark, 2019; Pan ve ark, 2019; Xing ve ark, 2022; Cáceres-Naranjo ve ark, 2023). Oluklu mukavva ise; kendine özgü oluklu geometrisi, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve üstün enerji soğurma kapasitesi nedeniyle; ambalaj sektörü, yapısal uygulamalar ve darbe enerjisi sönmeme gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Çok katmanlı yapısı, darbe kuvvetlerini emme ve iletilen titreşimleri azaltma kapasitesini artırarak, hafif ve sürdürülebilir malzemelere yönelik mühendislik uygulamalarında umut verici bir seçenek haline getirmektedir.

Sek ve Rouillard (2005), ürünlerin taşınması süreçlerinde mekanik darbelerden ve titreşimlerden korunması amacıyla, çok katmanlı oluklu mukavva (MCPB) yapılarının performansını inceleyen bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışma, MCPB'nin darbe yükleri altındaki davranışını ve bu malzemenin elastik-plastik özelliklerini araştırmayı amaçlamıştır. Geleneksel ambalaj tasarımında, darbe yastıklarının maksimum beklenen darbe seviyelerine veya eşdeğer düşme yüklerine dayanacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Yüksek hızlı video ekipmanları kullanılarak oluklu yapıların deformasyon mekanizması incelenmiş, darbe yükleri sırasında ortaya çıkan karmaşık ivme sinyalleri şok tepki spektrumu ile analiz edilmiştir (Şekil 1.7). Elde edilen sonuçlar, MCPB yastıklarının üzerine yerleştirilen ek bir oluklu mukavva katmanının şok tepki spektrumunu önemli ölçüde düşürdüğünü ve aşırı durumlarda ürünlerin korunma seviyesini artırdığını göstermiştir.



Şekil 1.7. Oluklu yapıların deformasyon mekanizmalarının incelenmesi (Sek ve Rouillard, 2005).

Wang (2010), çok katmanlı oluklu mukavva yapılarının enerji emme özelliklerini analiz etmek için statik sıkıştırma deneylerine dayalı bir model geliştirmiştir. Bu model, çok katmanlı oluklu mukavva yapılarının sıkıştırma gerilme-gerinim eğrisini üç ana bölüme ayırmaktadır: doğrusal elastik bölge, yerel çökme ile birlikte alt burkulma bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi. Model, oluklu hücre duvarlarının yapısal faktörlerini dikkate alarak enerji emilimini karakterize etmiş ve farklı temel malzemeler için geçerli olacak şekilde genelleştirilmiştir. Sonuçlar, çok katmanlı oluklu mukavvaların standart enerji emme kapasitesinin, oluklu yapının geometrik özelliklerine, temel malzemesine ve üretim sürecine bağlı olduğunu göstermiştir.

Wang ve Yu-Ping (2011), farklı çevresel nem koşullarında çok katmanlı oluklu mukavva (MLCP) yapıların enerji emme özelliklerini modellemek için bir matematiksel çözüm geliştirmiştir. Geliştirilen matematiksel model, lojistik süreçlerde karşılaşılan gerçek çevresel nem koşullarını simüle ederek MLCP'nin enerji emme özelliklerini tahmin etmiştir ve farklı kalınlıklara sahip MLCP'ler için çeşitli nem koşullarında en uygun enerji emme noktalarının belirlenmesini sağlamıştır. Model, kontrollü atmosferde test edilen oluklu çekirdek malzemenin elastik modülü ile normalize edilmiştir ve bu sayede farklı temel malzemelerden üretilen MLCP'ler için evrensel olarak uygulanabilir hale getirilmiştir. Bu çalışma, çok katmanlı oluklu mukavva kullanılarak yapılan yastıklama ambalajlarının optimum tasarımı için uygulanabilir bir çerçeve sunmuştur.

Xia ve ark. (2013), ulaştırma mühendisliğinde X-PLY olarak bilinen çapraz katmanlı oluklu mukavvanın titreşim modlarını simülasyon yoluyla analiz etmiştir. Çalışmada, X-PLY yapıların dinamik özellikleri ve titreşim davranışları incelenmiş, bu yapıların taşımacılık sırasında maruz kaldığı titreşim yükleri altında performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, X-PLY oluklu mukavvanın titreşim modlarının anlaşılmasının, taşımacılık süreçlerinde yapısal bütünlüğün korunması ve ürün güvenliğinin sağlanması açısından kritik olduğunu göstermektedir. Bu alışma, taşımacılık mühendisliğinde kullanılan ambalaj malzemelerinin tasarım ve optimizasyonuna yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

San Ha ve Lu (2020), oluklu yapılarının kontrollü çökme davranışı sergileyerek geleneksel düz yüzeyli yapılara kıyasla daha yüksek enerji soğurma verimliliğine sahip olduğunu vurgulamış ve bu yapıların farklı geometrilerdeki uygulamalarını, çarpışma dayanımı üzerindeki etkilerini, tasarım ve üretim süreçlerindeki mevcut zorlukları ele alarak gelecekteki araştırma yönelimlerine ışık tutmuştur.

Son yıllarda yapılan araştırmalar; oluklu mukavvanın geleneksel kullanım alanlarının ötesine geçerek, farklı mühendislik disiplinlerinde de yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir. Özellikle titreşim ve gürültü kontrolü konularında yrtlen çalışmalar; bu malzemenin hafıflığı, sürdürülebilirliği ve maliyet etkinliği gibi avantajlarının yanı sıra, belirli koşullar altında akustik yalıtım ve titreşim snleme açısından dikkate değer bir performans sergileyebileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan deneysel ve sayısal analizler; oluklu mukavvanın içyapısının, özellikle dolgu malzemeleri veya yüzey kaplamaları ile optimize edildiğinde, ses dalgalarının yayılımını engelleyebileceğini ve titreşimleri absorbe edebileceğini göstermektedir.

Asdrubali ve ark. (2015), geleneksel olarak ambalaj endüstrisinde kullanılan oluklu mukavva panellerin termal ve akustik yalıtım performanslarını deneysel laboratuvar analizleriyle incelemiştir (şekil 1.8). Çalışmada, bu panellerin ısı iletkenliği ve ses yalıtım özellikleri ölçülerek, sürdürülebilir inşaat sektöründe kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Oluklu mukavva panellerin akustik yalıtım performansı incelendiğinde, özellikle 1200 Hz'in üzerindeki frekanslarda 80 dB'e kadar iletim kaybı sağladığı grlmştur. Ancak, ses emilim özelliklerinin belirgin olmadığı tespit edilmiştir. Isı iletkenlik analizleri ise bu panellerin yüksek performanslı ticari yalıtım ürünleriyle aynı seviyeye ulaşamamasına rağmen, 0.0524 W/mK değerinde bir iletkenlik sergilediğini ve bu özelliğin kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, panellerin mekanik dayanımı, akustik ve termal yalıtım özellikleriyle birleştiğinde; özellikle hafif iç bölme duvarlarında yalıtım çözümü olarak, açık ofis alanlarının akustik kontrolünde ve geçici sergi alanlarında da kullanılmaya uygun olduğu ifade edilmiştir.



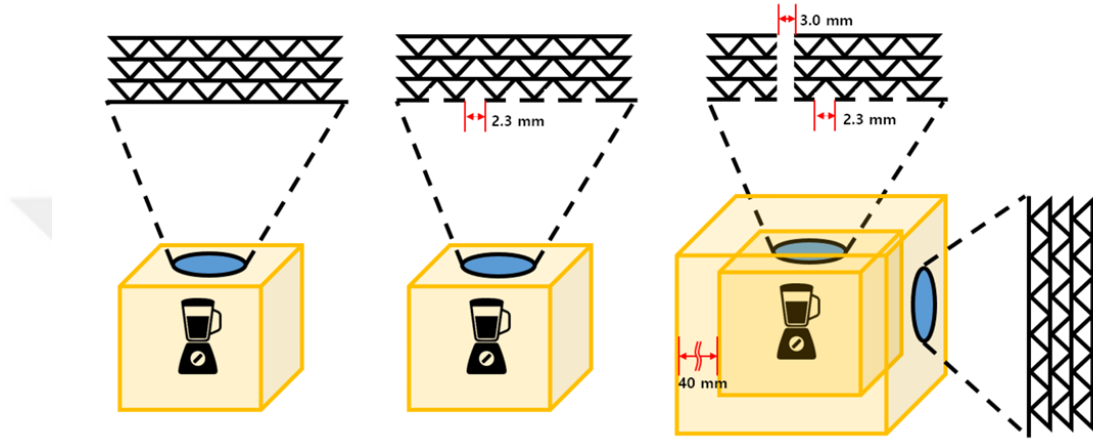
Şekil 1.8. E ve C tipi oluklu mukavvalarla üretilen sandviç panel numuneler (Asdrubali ve ark, 2015).

Kang ve Seo (2018), deliksiz ve delikli üç katmanlı oluklu mukavvanın ses yutuculuk kapasitesi ve ses iletim kaybını ses transfer fonksiyonu yöntemiyle incelemiştir. Ses iletim kaybı açısından değerlendirildiğinde, deliksiz mukavvanın ortalama iletim kaybı 17.08 dB olarak belirlenirken, sadece dış yüzey astarının delindiği numunede 11.84 dB ve tüm astar katmanlarının delindiği numunede 7.55 dB seviyesine düştüğü gözlemlenmiştir. Genel olarak, delikli numunelerin ses iletim kaybının, deliksiz mukavvaya kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

Kang ve ark. (2020), gürültü kontrolü amacıyla; gözenekli bir sünger ile desteklenmiş oluklu mukavvadan geliştirilmiş bir ses bariyerinin, ev tipi blender üzerindeki etkinliğini değerlendirmiştir. Çalışmada, üç katmanlı oluklu mukavvanın ses yutuculuk katsayısı; transfer fonksiyonu yöntemiyle, ses iletim kaybı ise transfer matris yöntemiyle hesaplanmıştır. Çift katmanlı 1.5 cm kalınlığındaki oluklu mukavvanın ortalama ses yutuculuk katsayısı 0.10 olarak belirlenirken, 3 cm kalınlığındaki gözenekli sünger ile desteklenmiş oluklu mukavvanın bu değeri 0.58'e yükselmiştir. Ayrıca, 3-4 kHz frekans aralığında ses yutuculuk katsayısının 0.82'ye ulaştığı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda; gözenekli sünger ile desteklenen oluklu mukavvanın, blender gürültüsünü yaklaşık 20 dB azalttığı belirlenmiştir.

Kang ve ark. (2021), gürültünün azaltılması için oluklu mukavvanın bir kaynak olarak kullanım potansiyelini araştırdıkları bu çalışmada; deliksiz oluklu mukavva (NPCC), delikli oluklu mukavva (PCC) ve çok frekanslı rezonatörlere sahip delikli oluklu mukavvanın (PCCM) ses yutma ve yalıtım performanslarını incelemiştir. Ses

yutma ve yalıtım özellikleri, transfer fonksiyonu ve iletim matrisi yöntemleri kullanılarak ölçülmüş ve malzemenin bir ev tipi blenderdeki gürültü azaltma etkisi analiz edilmiştir. PCC'nin ses azaltma katsayısı değeri 0.346, PCCM'nin ise 0.423 olarak ölçülmüştür. PCCM, diğer doğal fiber kompozit levhalar ve ahşap mikrodelikli panellere kıyasla daha yüksek ses yutma yeteneği göstermiştir. Sonuç olarak; delikli oluklu mukavvanın, sürdürülebilir ve çevre dostu bir ses yutucu ve yalıtıcı malzeme olarak önemli bir potansiyele sahip olduğu ortaya konulmuştur.



Şekil 1.9. Delikli ve deliksiz oluklu mukavvalar ile blender gürültüsünün azaltılması (Kang ve ark, 2021).

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, düşük empedansa sahip, geri dönüştürülebilir ve hafif malzemeler kullanılarak üretilen kutu bariyerin, zemin kaynaklı titreşimlerin ve hava yoluyla iletilen gürültü dalgalarının yayılımı üzerindeki sönümleyici etkisini, tam ölçekli arazi deneyleriyle değerlendirmektir. Geleneksel açık hendek tipi yalıtım sistemlerinin özellikle zayıf zeminlerde uygulanabilirliği sınırlı olup, derin kazılar gerektirdiğinden stabilite problemleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, rijit ve yüksek empedanslı dalga bariyerleri teorik olarak etkili olsa da, inşaat maliyetleri ve mühendislik gereksinimleri nedeniyle geniş ölçekli uygulamalarda kısıtlı bir çözüm sunmaktadır. Düşük empedanslı malzemelerden üretilen dalga bariyerleri ise, zemin ortamıyla aralarındaki empedans farkı sayesinde; kaynaktan iletilen titreşim enerjisini daha etkin biçimde dağıtarak yutma eğiliminde olan, dalga yayılımına direnç gösteren ya da yönlendiren yapılardır. Bu kapsamda; düşük empedanslı, ulaşılabilir ve çevre dostu malzemelerden üretilen kutu bariyer, açık hendek sistemlerine alternatif bir titreşim yalıtım çözümü olarak değerlendirilmiştir.

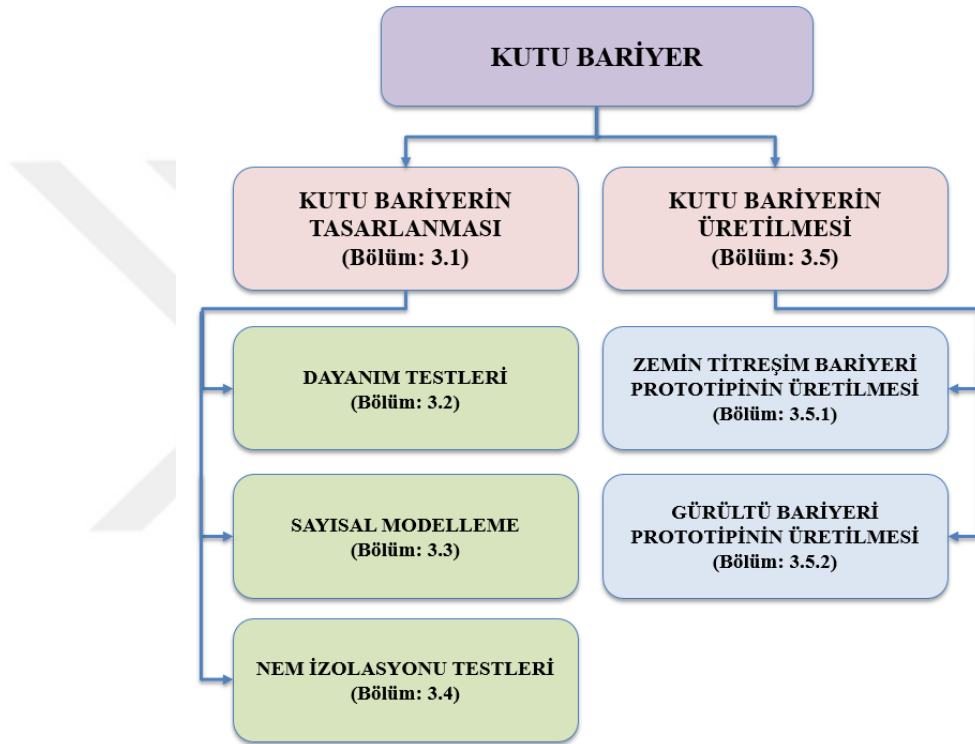
Önerilen titreşim sönümleyici kutu bariyer modeli; konut alanları, sanayi tesisleri ve hassas cihazlarla donatılmış laboratuvarlar gibi titreşimden korunması gereken yapılar ile dinamik yük kaynağı arasına yerleştirilerek hem zemin kaynaklı hem de hava kaynaklı titreşim enerjisinin yayılma alanında doğrudan sönümlenmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu doğrultuda; tam ölçekli arazi deneyleri, laboratuvar testleri ve SAP2000 tabanlı sayısal modelleme yaklaşımları bir arada kullanılmıştır. İlk aşamada, balsa odunu ve çift oluklu mukavvadan üretilen test numuneleri, farklı iç iskelet konfigürasyonlarında hazırlanmış ve üç noktalı eğilme testleri ile dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak, SAP2000 yazılımı ortamında nümerik analiz gerçekleştirilmiş ve model doğrulaması yapılmıştır. Bariyerin farklı tiplerdeki zemin yüklemeleri altındaki dayanıklılığını incelemek amacıyla bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiş, bariyerin inşası için en optimum tasarım belirlenmiştir. Buna ek olarak, bariyerin su yalıtım performansını değerlendirmek amacıyla, test numuneleri 3 farklı tipteki yalıtım malzemeleriyle kaplanmış ve su emme testleri uygulanmıştır.

Laboratuvar testleri ve modelleme çalışmalarının ardından, zemin kaynaklı titreşimleri azaltma performansının inceleneceği 1.5 m yüksekliğindeki kutu bariyer prototipi inşa edilerek tez çalışmasının ikinci aşamasına geçilmiştir. Saha testleri için, Türkiye'nin en yoğun yüksek hızlı tren hatlarından biri olan İstanbul-Ankara güzergâhına yakın konumlanan ve zayıf zemin özellikleriyle öne çıkan sanayi ve yerleşim bölgesi Pamukova ilçesi seçilmiştir. Kutu bariyerin, zemin kaynaklı titreşim azaltma performansını değerlendirmek amacıyla iki farklı yük kaynağı seçilmiş; balyoz kaynaklı darbe titreşimleri ve yüksek hızlı trenlerin ürettiği zemin titreşimleri kullanılarak saha testleri gerçekleştirilmiştir. Her iki durumda da, bariyerin titreşim sönümleme kapasitesi ivmeölçerler aracılığıyla ölçülerek serbest zemin ile bariyerli zemin arasındaki performans farkı analiz edilmiştir. Buna ek olarak, kutu bariyerin içine düşük empedansıyla bilinen strafor köpük malzemesi doldurularak dolgu malzemesinin titreşim sönümleme performansına katkısı değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü ve son aşamasında, kutu bariyerin hava kaynaklı titreşimleri azaltma performansını değerlendirmek amacıyla, ilk aşamada belirlenen tasarım esas alınarak 2.5 m yüksekliğinde bir prototip inşa edilmiş ve gürültü bariyeri olarak test edilmiştir. Yüksek hızlı trenlerin ürettiği çevresel gürültü üzerinde gerçekleştirilen saha deneyleri sonucunda, kutu bariyerin akustik yalıtım kapasitesi kapsamlı

ölçümlerle analiz edilmiştir. Kutu bariyerin tasarlanıp üretilmesini anlatan diyagram Şekil 1.10’da sunulmuştur.

Bu kapsamlı deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda, düşük empedanslı kutu bariyer modelinin zemin ve hava kaynaklı titreşim dalgalarını azaltma etkinliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir (Şekil 1.11). Çalışmadan elde edilen bulgular, alternatif bir dalga bariyer modeli olarak kutu bariyerin mühendislik uygulanabilirliğini ve çevresel titreşim kontrolündeki potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 1.10. Kutu bariyerin tasarlanıp üretilme sürecine ait akış diyagramı.



Şekil 1.11. Titreşim ölçümlerinin yapıldığı saha deneylerine ait akış diyagramı.

2. ZEMİN VE HAVA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN YAYILIMI: MEKANİZMALAR VE KONTROL STRATEJİLERİ

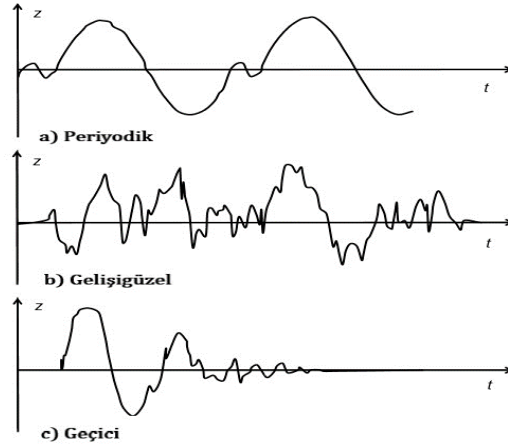
Tez çalışmasının bu bölümünde, titreşim ve gürültünün yayılımına ilişkin teorik temeller ele alınacaktır. Öncelikle, zemin kaynaklı titreşimlerinin oluşumu, yayılım mekanizmaları ve alıcı üzerindeki etkileri incelenecektir. Bu bağlamda, özellikle Rayleigh dalgalarının zemindeki yayılımı ve bu titreşimlerin yapılar, hassas ekipmanlar ve insanlar üzerindeki etkileri üzerinde durulacaktır. Ardından, hava yoluyla iletilen gürültü ve bunun çevresel etkileri tartışılacaktır. Son olarak, titreşim ve gürültü seviyelerinin azaltılmasına yönelik teorik yaklaşımlar ve yaygın olarak kullanılan kontrol yöntemleri ele alınacaktır.

2.1. Zemin Kaynaklı Titreşim Üreten Mekanizmalar

Zemin üzerinde tekrarlayan veya düşük frekanslı herhangi bir dış etki, yer kaynaklı olarak nitelendirdiğiniz titreşimlerin oluşumuna neden olmaktadır. Titreşim kaynakları genel olarak sürekli titreşimler ve geçici (transient) titreşimler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Toygaz, 2023). Bu ayrımın temel kriteri, uyarımın frekans karakteristiğidir. Sürekli titreşim kaynakları belirli bir zaman diliminde tekrar eden hareketler üretirken, geçici titreşim kaynakları tek seferlik veya düşük frekanslı uyarımlar oluşturur. Sürekli titreşim kaynakları, karayolu ve demiryolu trafiği, makine temelleri ve sıkıştırma, titreşimli kazık çakma gibi inşaat faaliyetlerini içermektedir (Şekil 2.1a-b). Öte yandan; düşme bilyeleri, patlatmalar ve darbe tipi kazık çakma işlemleri geçici titreşim kaynakları olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.1c).

Titreşim kaynaklarının sınıflandırılmasının yanı sıra, insan algısı da önemli bir parametredir. İnsanların titreşimlere verdiği tepki, maksimum parçacık hızı (PPV) cinsinden ifade edilen titreşim genliğine bağlı olarak değişmektedir. Sürekli titreşimler ve geçici (transient) titreşimler için algılama eşikleri farklılık göstermektedir. Güçlü şekilde hissedilebilir titreşim seviyelerinin PPV değerleri sırasıyla; sürekli titreşimler için 0.254 cm/s, geçici titreşimler için ise 2.286 cm/s olarak belirlenmiştir. Belirgin şekilde hissedilebilir titreşimler için PPV değerleri sırasıyla, sürekli titreşimlerde 0.089 cm/s, geçici titreşimlerde ise 0.610 cm/s seviyesindedir. Zor algılanabilir

titreşimlerde ise bu değerler; sürekli titreşimler için 0.030 cm/s, geçici titreşimler için 0.089 cm/s olarak belirlenmiştir. Bu değerler; insanların sürekli titreşimlere karşı daha duyarlı olduğunu ve geçici titreşimlerin algılanması için daha yüksek bir genliğe ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir (Toygır, 2023).



Şekil 2.1. Titreşim hareketi türleri a) Periyodik b) Gelişigüzel c) Geçici (Alzawi, 2011).

Birçok ülke, titreşime maruz kalma konusunda belirli sınırlamalar ve düzenlemeler getirmiştir. Kowalska-Koczwara ve Stypula (2016), Almanya (DIN 4150-2), Polonya (PN 88/B-02171), Birleşik Krallık (BS 6482-1) ve uluslararası (ISO 2631-2) standartları karşılaştırarak yerleşim alanlarında insan titreşim maruziyetine yönelik düzenlemeleri analiz etmiştir. Bu standartlar farklı değerlendirme yöntemleri içerse de, ortak nokta titreşim frekanslarının genellikle 1 Hz ile 80 Hz arasında olmasıdır. Bu nedenle, titreşim yalıtımı çalışmalarında, bu frekans aralığının dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

Titreşim kaynakları, hareketlerine göre de sınıflandırılabilir. Trenler ve tramvaylar, hareketli titreşim kaynakları olarak değerlendirilirken, inşaat faaliyetleri ve makine temelleri sabit titreşim kaynakları kategorisinde yer alır. Titreşim kaynağının tipi, herhangi bir titreşim yalıtım çalışmasının en önemli faktörüdür. Kaynağın yükleme türü, büyüklüğü, frekansı ve konumu gibi parametreler, sayısal analizlerde kolayca modellenebilirken; deneysel çalışmalarda titreşim kaynağının kapasitesiyle sınırlıdır. Küçük ölçekli laboratuvar testlerinde, deney sistemlerinin sınırları göz önünde bulundurularak titreşim kaynağı özel olarak tasarlanmaktadır. Bu kapsamda, demiryolu titreşimlerini simüle etmek için piezoelektrik aktüatörler kullanılmıştır (Baziar ve ark, 2019). Model testlerinde ise elektromanyetik dinamik sarsıcılar yaygın

olarak tercih edilmiştir (Pu ve ark, 2020). Saha testlerinde, doğrudan tren geçişi veya gerçek zamanlı inşaat faaliyetleri gibi titreşim kaynakları kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir (Dijkmans ve ark, 2016; İstegün ve ark, 2023; Kouroussis ve ark, 2014; Li ve ark, 2016; Pu ve Shi, 2020; Pu ve ark, 2018). Alternatif olarak, metro ve karayolu trafiğinden kaynaklanan titreşimler kaydedilerek, belirli ivme-zaman geçmişleri laboratuvar ortamında yeniden üretilmiştir (Sheng ve ark, 2020; 2021). Bunun yanı sıra, yapay titreşim kaynakları kullanılarak da saha testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, titreşim üreten mekanik osilatörler, vibrodin sistemleri ve elektrodinamik sarsıcılar tercih edilen kaynaklardan biridir. (Woods, 1968; Çelebi ve ark, 2009; Alzawi, 2011; Alzawi ve El Naggar, 2011; Garinei ve ark., 2014). Bu yapay titreşim kaynakları, hedeflenen frekans aralıklarında istenen titreşimlerin başarılı bir şekilde üretilmesini sağlamıştır. Bu tez çalışması kapsamında; Bu tez çalışması kapsamında; zemin ve hava kaynaklı titreşimlerin yayılımı ve kontrolü üzerine yapılan araştırmalar doğrultusunda, farklı titreşim kaynaklarının etkileri incelenmiştir. Ön arazi testlerinde, yapay darbe üreten balyoz kullanılarak zemin titreşimlerinin yayılımı değerlendirilmiş, ardından yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu titreşimlerin hem zemin içinde hem de hava yoluyla yayılımı analiz edilmiştir.

2.1.1. Zemin kaynaklı titreşimlerin yayılması

Dalga bariyerleri aracılığıyla titreşim yalıtımı problemlerinin incelenmesinde; elastik dalgaların yarı sonsuz zemin ortamındaki yayılım mekanizmasının anlaşılması, büyük bir öneme sahiptir. Elastik dalgalar, depremler, patlatma faaliyetleri, kazık çakma işlemleri veya titreşimli makine temelleri gibi birçok farklı şekilde oluşabilir. Temel veya zemin hareketine neden olan enerji, elastik dalgalar şeklinde kaynaktan zemin ortamına iletilir. Bu elastik dalgaların kaynağı, yarı uzay içinde yer alabileceği gibi yüzeyde de bulunabilir. Çoğu makine temeli ve bina temeli zemin yüzeyinde veya yüzeye yakın olduğundan, yüzey kaynaklarından üretilen dalgalar, titreşim yalıtımı çalışmalarında birincil öneme sahiptir. Ayrıca, bu tür dalga yayılımı analizlerinde, zemin ortamının homojen, izotropik ve elastik bir yarı uzay olarak modellenebileceği varsayımı yaygındır. Elastik yarı uzay teorisi, iki temel elastik dalga türünü tanımlar: cisim dalgaları ve yüzey dalgaları. Bu iki dalga türünün özellikleri, burada kısaca açıklanmaktadır.

2.1.1.1. Cisim dalgaları

Sonsuz elastik bir ortamda iki tür cisim dalgası bulunabilir: P dalgası (birincil ya da basınç dalgası olarak da bilinir) ve S dalgası (kayma dalgası olarak da bilinir). P dalgası, geçtiği ortamda herhangi bir kayma ya da dönme oluşturmada ilerler. Bu dalga türü, ortamın mekanik özelliklerine bağlı olarak belirli bir hızla (V_P) yayılır (Denklem 2.1).

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

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.2)$$

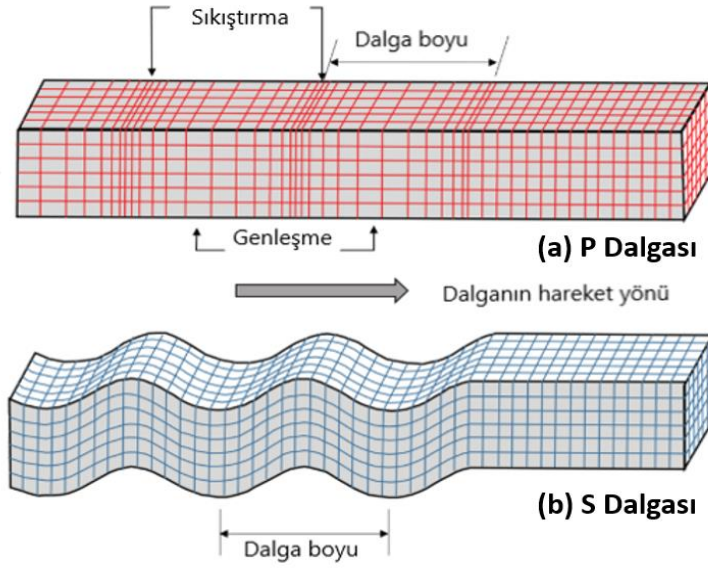
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.3)$$

Burada, E sembolü Young modülünü, ρ sembolü zeminin yoğunluğunu ve ν ise Poisson oranını ifade etmektedir. Ayrıca; G, kayma modülü ve λ , Lamé sabitleri olarak adlandırılır. P dalgalarında parçacıkların yer değiştirmesi, dalganın yayılma yönüne paralel bir şekilde gerçekleşir.

Cisim dalgalarının ikinci türü olan S dalgası ise herhangi bir hacim değişimi oluşturmaz ve ortam içinde şu hızla yayılır:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.4)$$

S dalgalarında parçacık hareketi, dalganın yayılma yönüne dik bir düzlemle sınırlıdır. Bunun yanı sıra, S dalgaları genellikle iki dik bileşene ayrılır ya da bu iki bileşenin vektörel toplamı olarak ifade edilir: SH dalgaları ve SV dalgaları. SH dalgaları için parçacık hareketi yalnızca yatay düzlemde gerçekleşirken, SV dalgaları için parçacık hareketi dikey düzlemde gerçekleşir. Bir S dalgası, SH ve SV bileşenlerinin vektörel toplamı olarak temsil edilebilir. P ve S dalgalarının hareketine ilişkin genel özellikler, Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



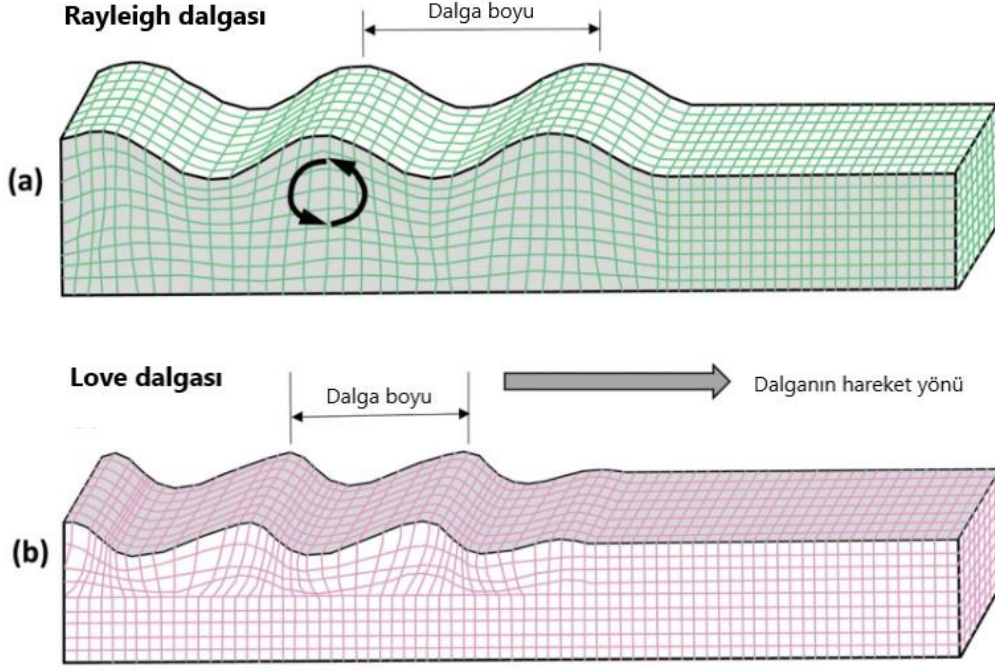
Şekil 2.2. P ve S dalgalarının yayılma biçimi (Kramer ve Stewart, 2024).

2.1.1.2. Yüzey dalgaları

Titreşim problemlerinde, zemin genellikle yarı sonsuz bir ortam olarak modellenir. Cisim dalgaları, homojen, izotrop ve sonsuz bir elastik ortamda serbestçe yayılabilirken, yüzey dalgalarının oluşabilmesi için sınırlandırılmış, yani yarı sonsuz bir ortam gereklidir. Cisim dalgaları zemin yüzeyine ulaştığında, yüzey ve jeolojik malzemelerin sık katmanları arasındaki etkileşim sonucunda, dalga hareketinde önemli bir değişim meydana gelir ve farklı tipte yüzey dalgaları oluşur. Mühendislik açısından en önemli yüzey dalgaları Rayleigh ve Love dalgalarıdır.

Rayleigh dalga hareketi, yatay ve düşey olmak üzere iki bileşenden oluşur. Bu iki bileşenin vektörel toplamı, hareketin yörüngesini belirler. Bu yörünge; dikey eksenin yatay eksene göre daha büyük olduğu, tersine dönük eliptik bir hareket şeklindedir (Şekil 2.3). Bu hareket dikey düzlemde gerçekleşir ve elipsin yatay ekseni, dalga yayılma yönüne paraleldir.

Love dalgaları ise, yalnızca tabakalı ortamlarda meydana gelir ve oluşumları SH dalgalarının yüzey tabakası içerisindeki etkileşimi ile belirlenir.



Şekil 2.3. Rayleigh ve Love dalgalarının yayılma biçimi (Kramer ve Stewart, 2024).

Bu çalışmada, insan yapımı kaynakların ürettiği titreşimler ele alınmaktadır. İnsan yapımı titreşim kaynakları, zemin yüzeyinde veya yüzeye yakın konumlandığından, yüzey kaynaklı titreşimler sonucu oluşan Rayleigh dalgaları, titreşim yalıtımı çalışmalarında büyük önem taşımaktadır.

Rayleigh dalgası, yarı sonsuz ortamın yüzeyi boyunca faz hızı V_R ile yayılmakta olup; kayma dalgası hızı, V_S ve Poisson oranı, ν ile ilişkilidir. Rayleigh dalgasının yayılma hızı V_R , Denklem 2.5-8’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

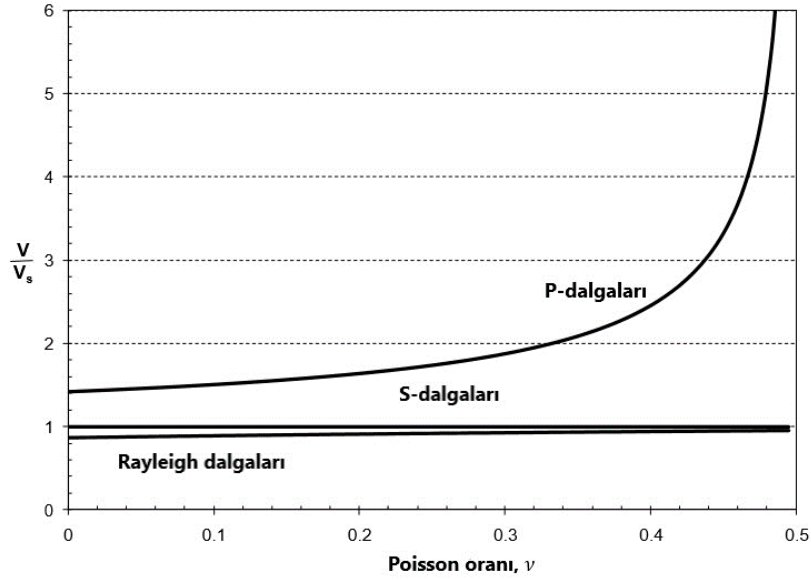
$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad (2.5)$$

$$K = \frac{V_R}{V_S} \quad (2.6)$$

$$\alpha = \frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}} \quad (2.7)$$

$$V_R = \frac{0.86 + 1.14\nu}{(1 + \nu)} V_S \quad (2.8)$$

Poisson oranı değeri 0 ile 0.5 arasında değıştikçe, Rayleigh dalgasının yayılma hızı 0.862 ile 0.955 arasında doğrusal bir artış göstermektedir. Poisson oranının cisim dalgaları üzerindeki etkisi ve V_P , V_S ve V_R hızlarının bu orana bağılı olarak değışimleri Şekil 2.4'te sunulmaktadır.

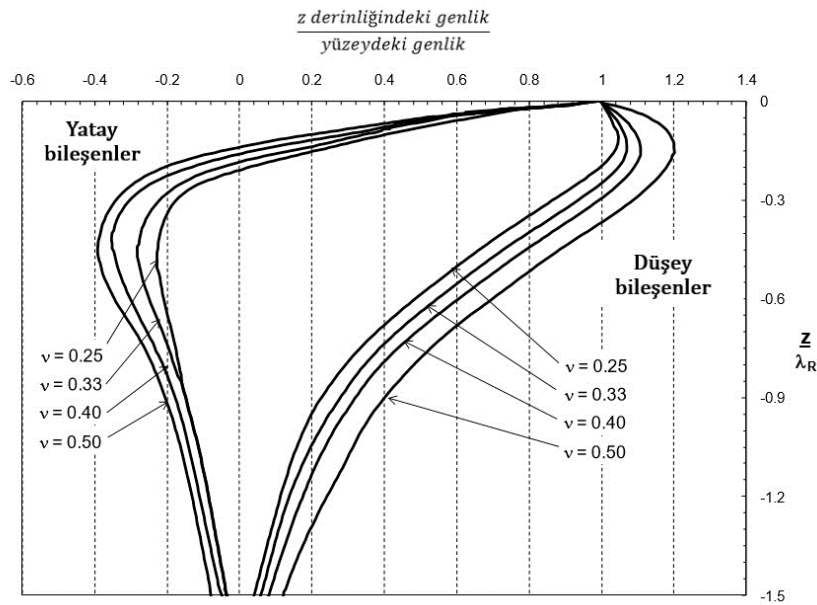


Şekil 2.4. V_P , V_S ve V_R hızlarının Poisson oranı ile değışimleri (Alzawi, 2011).

Rayleigh dalgaları, diğer dalgalara kıyasla genliklerinin mesafe ile daha yavaş azalması nedeniyle önemlidir. Dalgalar kaynak noktasından uzaklaştıkça giderek daha büyük bir zemin hacmiyle etkileşime girer. Bu durum, dalgaların enerji yoğunluğunun mesafe ile azalmasına neden olur. Enerji yoğunluğundaki ya da yer değıştirme genliğindeki bu azalma, geometrik sönümlenme olarak adlandırılır. Geometrik sönümlenme nedeniyle cisim dalgalarının genliği, kaynak noktasından olan mesafeye (r) bağılı olarak; zemin içinde $1/r$, yüzey boyunca ise $1/r^2$ oranında azalırken, Rayleigh dalgaları için bu azalma oranı $1/r^{0.5}$ olarak hesaplanmıştır (Richart ve ark, 1970). Bu nedenle Rayleigh dalgaları, cisim dalgalarına kıyasla çok daha yavaş bir şekilde sönümlenir.

Rayleigh dalgalarının en belirgin özelliklerinden biri de, genliklerinin derinlikle birlikte hızla azalmasıdır. Rayleigh dalgalarının genliğinin zemin derinliği boyunca nasıl zayıfladığını inceleyen Richart ve ark. (1970), yarı sonsuz zemin ortamı homojen, izotropik ve elastik olarak modellemiş ve Poisson oranı 0.25 ile 0.5 arasında değışen farklı senaryoları değerlendirmişlerdir. Rayleigh dalgasının yatay ve düşey bileşenleri, yüzey seviyesindeki Rayleigh dalgası genliği esas alınarak normalize edilmiştir.

Ayrıca derinlik de boyutsuz bir gösterim sağlamak amacıyla Rayleigh dalga boyu (λ_R) ile normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, normalize edilmiş $0.2 \lambda_R$ derinliğe (D) kadar olan bölgede yatay bileşen azalırken, düşey bileşende belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Daha büyük derinliklerde ise düşey bileşenin genliği azalmaya başlamış ve bu durum beklendiği gibi düşey hareketin yüzeye yakın bölgelerle sınırlı olduğunu doğrulamıştır. Rayleigh (1885) tarafından ortaya konan bu durum, Rayleigh dalgalarının etkili olduğu bölgenin yüzeye yakın bir tabaka ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Haupt (1995), Rayleigh dalgalarının nüfuz ettiği bölgenin yaklaşık bir dalga boyu derinliğe kadar uzandığını belirtmiştir. Ayrıca, $0.2 \lambda_R$ ile $0.5 \lambda_R$ arasındaki derinliklerde yatay bileşenin ters yönde genlik artışı göstermesi, Rayleigh dalgasının tersine eliptik hareketi ile ilişkilendirilmiştir. Ancak, bu derinliğin ötesinde yatay bileşenin genliği tekrar azalma eğilimi göstermektedir. Sonuç olarak, Richart ve ark. (1970) ile Haupt (1995) tarafından da ortaya konulduğu üzere, Rayleigh dalgalarının genliğinin derinlikle birlikte azaldığı ifade edilebilir. Rayleigh dalgalarının bileşenlerinin derinlikle nasıl değiştiği Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey bileşenlerinin derinlikle değişimi (Richart ve ark, 1970).

Homojen, izotropik ve elastik bir yarı uzayda, Poisson oranı 0.25 olan dikey salınım yapan dairesel bir enerji kaynağı için, toplam enerji girdisinin elastik dalgalar arasındaki dağılımı şu şekilde belirlenmiştir: %67'si Rayleigh dalgaları, %26'sı S dalgaları ve %7'si P dalgalarıdır (Miller ve Pursey, 1955). Titreşim kaynağından

yayılan toplam enerjinin %67'sinin Rayleigh dalgaları formunda iletildiği ve bu dalgaların diğer dalgalara kıyasla daha yavaş sönümlendiği göz önüne alındığında, Rayleigh dalgalarının titreşim yalıtımı problemleri açısından kritik bir öneme sahip olduğu açıktır. Bu nedenle, dalga bariyerlerinin titreşim sönümleme performansını değerlendirirken; bariyer ile titreşim kaynağı arasındaki mesafe, bariyerin genişliği, uzunluğu ve derinliği gibi parametreler, Rayleigh dalga boyu (λ_R) açısından ele alınmalıdır. Dikey salınım yapan bir titreşim kaynağına bağlı olarak zemin ortamında Rayleigh dalga boyu şu denklemle hesaplanabilir:

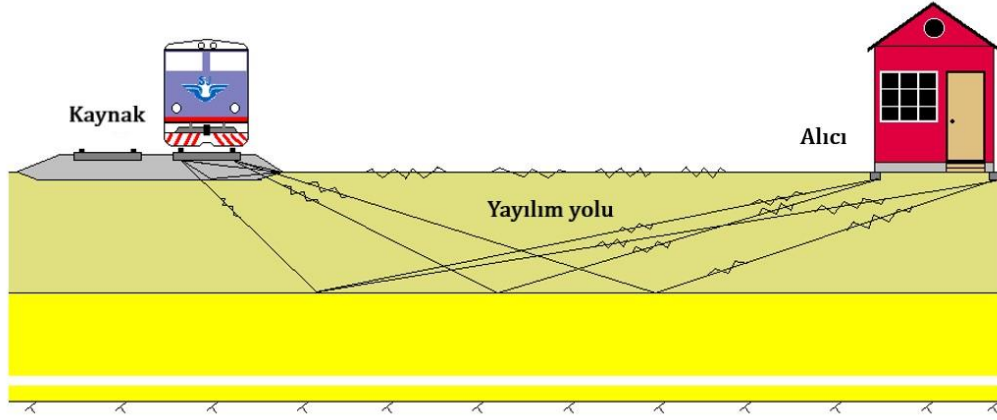
$$\lambda_R = \frac{V_R}{(f)} \quad (2.9)$$

Burada f , titreşim kaynağının çalışma frekansını ifade etmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda (Richart ve ark, 1970; Sanchez-Sesma ve ark, 2011), yarı uzay; homojen, izotropik ve elastik olarak modellenmiştir. Ancak, gerçek saha koşullarında, özellikle zemin profiline bağlı tabakalaşma gibi faktörler nedeniyle farklılıklar gözlemlenebilir. Titreşimler, zemin ortamında elastik dalgalar halinde yayılır. Tabakalı yarı uzay koşullarında, elastik dalgalar farklı tabaka arayüzlerinde yansıyabilir veya kırılabilir. Bu nedenle, dalga bariyerlerinin yalıtım performansı büyük ölçüde Rayleigh dalgalarının yansıması, kırınımı ve saçılmasına bağlıdır (Jain ve Soni, 2007). Ayrıca, zeminden daha yumuşak veya daha sert bariyer malzemelerinin etkinliği, Rayleigh dalgalarının bariyer etrafındaki kırınım ve yansıma özelliklerine göre değişiklik gösterebilir (Alzawi, 2011).

Sonuç olarak, zemin ortamındaki dalga yayılım özellikleri, titreşim yalıtımı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir ve uygun dalga bariyeri tasarımı için bu faktörlerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

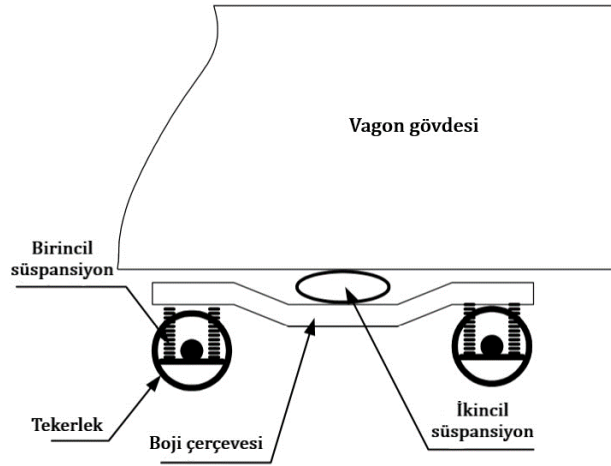
2.1.2. Demiryolu trafiğinden kaynaklanan zemin titreşimleri

Genel olarak, tren trafiğinden kaynaklanan zemin kaynaklı titreşim sorununun üç temel bileşenden oluştuğu söylenebilir: kaynak, yayılım yolu ve alıcı. Şekil 2.6'da şematik olarak gösterildiği üzere, bu üç bileşenin her birinin titreşim durumu üzerindeki etkisini anlamak, problemin öngörülmesi ve önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



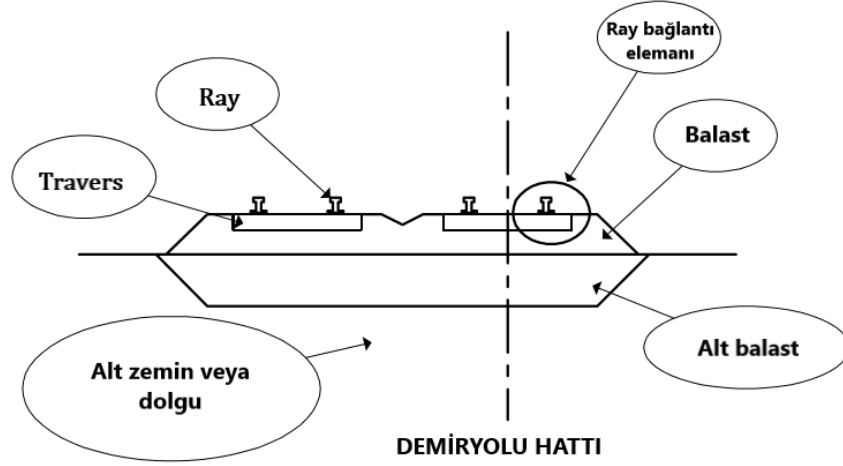
Şekil 2.6. Zemin kaynaklı titreşim sorununun üç temel bileşeni (Bahrekazemi, 2004).

Genel olarak, hareket halindeki trenin, üzerinde bulunduğu zemin ile temas eden raylarla etkileşimi sonucu titreşim oluştuğu kabul edilmektedir. Titreşim oluşumu açısından trenin temel bileşenleri Şekil 2.7’de şematik olarak gösterilmektedir. Vagon gövdesi, genellikle modern yolcu trenlerinde hava yastığından oluşan ikincil süspansiyon sistemi aracılığıyla bojiye bağlanmaktadır. Vagon gövdesinin ağırlığı daha sonra, tekerleklerle bağlanan birincil süspansiyon sistemiyle boji çerçevesine aktarılmaktadır. Tekerlekler ise yükü raylara iletmektedir.



Şekil 2.7. Titreşim üretimi açısından trenin temel bileşenleri (Bahrekazemi, 2004).

Bir demiryolu hattı; raylar, ray yastıkları ve ray bağlantı elemanları, traversler, balast ve alt balasttan oluşmaktadır. Trafiğin türüne bağlı olarak, hattın farklı bölümleri farklı özelliklere sahip olabilir. Bir demiryolu hattının şematik resmi ve farklı parçalarının isimleri Şekil 2.8’de sunulmuştur.



Şekil 2.8. Bir demiryolu hattının şematik resmi (Bahrekazemi, 2004).

Tren trafiğinden kaynaklanan zemin titreşimleri, birçok faktörden etkilenmektedir. Tekerek ve ray pürüzlülüğü, hat destek yapısı, taşıt dinamikleri, ray rijitliği, zemin özellikleri ve bina yapısı gibi unsurlar, titreşim seviyelerini belirleyen temel etmenler arasındadır (Nelson ve Saurenman, 1983). Titreşimlerin oluşumu, hem yarı-statik hem de dinamik bileşenler içermekte olup, enerjinin farklı modlar arasında eşit dağılmadığı görülmektedir. Özellikle Rayleigh dalgaları, uzak mesafelere taşınan titreşim enerjisinde baskın rol oynamaktadır. Ayrıca, trenin hızı zemin titreşimlerinin yayılma hızını aşarsa, şok dalgaları oluşarak çevredeki yapılar üzerinde ciddi etkiler yaratabilmektedir. Deneysel çalışmalar; travers geçiş frekansına karşılık gelen maksimum değerlerin, trenin kütlesi ile doğrudan ilişkili olduğunu ve dolu trenlerin boş trenlere kıyasla yaklaşık 12 dB daha fazla titreşim ürettiğini göstermektedir (Dawn ve Stanworth, 1979).

Tren hızının çevreye aktarılan enerji miktarı üzerindeki etkisi de önemli bir araştırma konusudur. Bazı çalışmalar, hızın titreşim seviyesi üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu belirtirken (Krylov, 1995; Madshus ve ark, 1996; Bodare, 1999; Jones ve ark, 2000; Degrande ve Lombart; 2000), diğer araştırmalar 30 km/sa'ın üzerinde hareket eden ağır yük trenleri için bu etkinin sınırlı kaldığını öne sürmektedir (Dawn, 1983). Zemin özellikleri de titreşim seviyelerini etkileyen önemli unsurlardan biridir. Kohezyonlu zeminlerde baskın titreşim frekansının genellikle 0-10 Hz aralığında olduğu, sürtünmeli zeminlerde ise daha yüksek frekanslara ulaşıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, dolgu malzemesinin kütlesi azaldıkça ve temel kaya derinliği arttıkça titreşim seviyesinin yükseldiği gözlemlenmiştir (Hannellius, 1974).

Farklı frekans aralıklarında meydana gelen titreşimler, çeşitli mekanizmalarla açıklanabilmektedir. Ray ek yerlerinden geçiş sırasında oluşan darbe etkisi, aks geçiş frekansı ve harmoniklerinde zirve değerler oluşturmakta ve titreşimlerin zemine yayılımına neden olmaktadır (Fujikake, 1986). Ray pürüzlülüğü, travers geçiş frekansı ve hareketli yüklerin neden olduğu yarı-statik titreşimler de tren kaynaklı zemin titreşimlerinin oluşum mekanizmaları arasında yer almaktadır (Jones, 1994). Düşük frekanslı zemin titreşimleri açısından, tekerleklerin yarı-statik basıncının bu titreşimlerin oluşumunda etkili olduğu ve Rayleigh dalgalarının dikey titreşim spektrumunda baskın olduğu belirlenmiştir (Krylov ve Ferguson, 1994). Ayrıca, ray ve tekerlek pürüzlülüğünden kaynaklanan ray titreşimlerini modelleyen çalışmalar da bulunmaktadır (Remington, 1987).

2.1.3. Zemin kaynaklı titreşimlerin ölçülmesi ve değerlendirilmesi

Titreşim, belirli bir denge noktası etrafında tekrarlayan salınım hareketlerinden oluşan dinamik bir olgudur. Bu hareketin büyüklüğü, farklı fiziksel parametrelerle ifade edilebilir. Literatürde titreşim genliği genellikle ivme, hız ve yer değiştirme kavramları ile tanımlanmaktadır (Baziar ve ark, 2019). Titreşim ölçümlerinde kullanılan parametre, çalışmanın amacına ve titreşim karakteristiğine bağlı olarak değişir. Örneğin, yüksek frekanslı titreşimlerde genellikle ivme parametresi öne çıkarken, düşük frekanslı büyük genlikli titreşimlerde yer değiştirme daha anlamlı bir ölçüt olabilir. Hız ise, birçok uygulamada genel bir gösterge olarak kullanılır ve özellikle yapıların titreşime maruziyet değerlendirmelerinde sıkça tercih edilmektedir. Bu doğrultuda, titreşim ve titreşim yalıtımı üzerine yapılan çalışmalarda, uygun parametre seçimi büyük önem taşımakta olup, deneysel analizlerde bu üç göstergeden biri kullanılarak titreşim genliği belirlenmektedir.

Önceki çalışmalarda, titreşim ölçümü ve değerlendirmesi için farklı sensörler ve parametreler kullanılmıştır. Bu çalışmalar, kullanılan sensör türleri ve değerlendirme yöntemleri açısından çeşitlilik göstermektedir. PPA, titreşim sinyalinde gözlenen en yüksek ivme değerini ifade eder ve kısa süreli, yüksek genlikli titreşim darbelerinin belirlenmesinde önemli bir göstergedir. PPV, birim zamanda parçacıkların ulaştığı maksimum hız değerini temsil eder ve yapıların titreşime bağlı hasar riskinin değerlendirilmesinde sıkça kullanılan kritik bir parametredir. RMS değeri ise, ölçülen titreşim sinyalinin genel enerji içeriğini ortaya koyar ve sürekli titreşimlerin şiddetini daha dengeli biçimde yansıtan istatistiksel bir ölçüttür. Bu bağlamda, ivmeölçerler;

hem anlık hem de zamana bağılı ortalama titreşim düzeylerinin değerlendirilmesi amacıyla çok boyutlu veri sağlayabilen sensörler olarak literatürde geniş yer bulmuştur (Ainalis ve ark, 2018; Baziar ve ark, 2019; Jauhari ve ark, 2023). Bunun yanı sıra, jeofonlar özellikle titreşim hız seviyesi ve en yüksek parçacık hızı gibi parametrelerin ölçümünde kullanılmıştır (Alzawi ve El Naggat, 2011; Dijkmans ve ark, 2016; Mahdavisefat ve ark, 2018). Üç eksenli ivmeölçerler ve üç eksenli sismometreler, farklı yönlerde titreşim bileşenlerinin detaylı olarak incelenmesini sağlamış ve frekans ağırlıklı analizler için kullanılmıştır (Kouroussis ve ark, 2014; İstegün ve ark, 2023). Hız dönüştürücüler ise özellikle dikey hız ölçümleri için tercih edilmiştir (Woods, 1968).

Çalışmalarda kullanılan değerlendirme yöntemleri de sensör türüne bağılı olarak farklılık göstermektedir. Tepe ivme (PPA) ve tepe hız (PPV) değerleri, titreşim seviyesini belirlemek için yaygın olarak kullanılmıştır (Huang ve ark, 2021; Madheswaran ve ark, 2009). Bunun yanı sıra, RMS ivme ve hız, uzun süreli titreşim etkilerini değerlendirmek için önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir (Sica ve ark, 2014; Ülgen ve Toygar, 2015). Spektral analizler, titreşim bileşenlerinin frekans bazında incelenmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Hao ve ark, 2001). Ayrıca, titreşim hızı seviyesi ve frekans ağırlıklı titreşim seviyeleri, insan ve yapıların titreşime maruziyetini değerlendirmek için kullanılan parametreler arasındadır (Li ve ark, 2016; Naghizadehrokhni ve ark, 2020).

Sonuç olarak, titreşim ölçümlerinde kullanılan sensörler ve değerlendirme yöntemleri, çalışmanın amacına bağılı olarak farklılık göstermektedir. İvmeölçerler, en yaygın kullanılan sensörler olup, PPA, PPV, RMS ivme ve hız gibi parametrelerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Jeofonlar ve hız dönüştürücüler, özellikle hız bazlı titreşim analizlerinde etkili olurken, frekans ağırlıklı parametreler ve spektral analizler, daha detaylı değerlendirmeler için tercih edilmektedir.

Titreşim yalıtımı hakkındaki çalışmaların en önemli amacı, önerilen sistemin titreşimlere karşı etkinliğini ortaya koymaktır. Bu etkinlik, dalga bariyerinin varlığı ve yokluğu durumlarında ölçülen titreşim değerlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenebilir. Ancak, yalıtım sistemlerinin etkinliği, titreşim kaynağının frekans içeriğine bağılı olarak değişmektedir. Yüksek hızlı trenler ve metro geçişleri gibi bazı titreşim kaynakları geniş bir frekans aralığında titreşim üretirken, makine temelleri gibi diğer kaynaklar belirli bir baskın frekansa sahiptir. Bireysel frekanslardaki titreşim

genliklerinin değerlendirilmesi amacıyla, 1/3 oktav bant analizi başta olmak üzere çeşitli spektral analiz yöntemleri uygulanarak ivme ve hız kayıtları frekans bileşenlerine ayrılmakta ve detaylı değerlendirmeler yapılmaktadır. (Zou ve ark, 2015; 2017; 2020; Dijkmans ve ark, 2016; Cao ve ark, 2018). 1/3 oktav bant analizi, sabit oranlı bant genişliğine sahip filtreler kullanılarak yapılan bir frekans çözümleme yöntemidir. Bu yöntemde her bir frekans bandı, merkez frekansın altına ve üstüne belirli oranlarda yayılacak şekilde tanımlanır; bu yapı sonucunda, bant genişliği merkez frekansın yaklaşık %23'ü kadar olmaktadır. Bu oran, 1/3 oktav analizinin logaritmik temelli bir bant sistemi olmasından kaynaklanır ve frekans çözünürlüğünün her bantta oransal olarak sabit kalmasını sağlar. En yaygın kullanılan sabit oranlı filtre türü olan 1/3 oktav filtreleri, özellikle 500 Hz üzerindeki bantlarda insan işitme sisteminin frekans algısıyla benzerlik göstermesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca, birbirine komşu üç adet 1/3 oktav bandı birleştirildiğinde bir tam oktav bandı oluşturulabilir; bu da yöntemin ölçeklenebilirliğini ve uygulama esnekliğini arttırmaktadır (Öztürk ve Arlı, 2010).

Titreşim genlikleri hem belirli frekanslarda ayrı ayrı hem de frekans aralığı boyunca sürekli olarak elde edilerek, desibel (dB) cinsinden titreşim hız seviyesi olarak da ifade edilmektedir. Yalıtım sistemlerinin etkinliği; izolasyon sisteminin varlığı ve yokluğundaki titreşim hızı seviyeleri veya logaritmik ölçekte bir referans hız seviyesi arasındaki fark olan Insertion Loss (IL) kavramıyla da değerlendirilmektedir. Insertion Loss, yalıtım uygulanmadan önceki referans hız seviyesi ile yalıtım uygulandıktan sonraki hız seviyesi arasındaki farkı gösterir. Başka bir ifadeyle; IL değeri, yalıtım bariyerinin belirli bir frekans bandında ne kadar titreşim azaltımı sağladığını nicel olarak ortaya koyar. Bu yöntem genellikle geniş bir frekans aralığına sahip gerçek titreşim kaynakları kullanıldığında tercih edilmektedir. Sahada yapay titreşim kaynakları kullanıldığında ise; uyarım frekansı istenilen aralıkta olacak şekilde ayarlanabildiğinden; oktav bant analizi gibi ek analizlere ihtiyaç duyulmamaktadır. IL değeri, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$IL = 20 \times \log \left(\frac{v_{ref}}{v} \right) dB \quad (2.10)$$

Burada, v_{ref} ; bariyersiz durumda ölçülen referans hız değerini; v , bariyerli durumda ölçülen hız değerini temsil etmektedir.

Titreşim yalıtımının nicel olarak değerlendirilmesi için farklı araştırmacılar çeşitli parametreler kullanmıştır. Woods (1968), genlik azaltma oranı (Amplitude Reduction Ratio, A_R) terimini tanımlarken, Herbut (2016) ve Baziar ve ark. (2019) bu kavramı sırasıyla genlik azaltma faktörü (Amplitude Mitigation Factor) ve azaltma faktörü (Reduction Factor, RF) olarak adlandırmıştır. Farklı terminolojilere rağmen, bu terimler bariyerin varlığı ve yokluğu durumunda bir ölçüm noktasındaki titreşim genlikleri arasındaki oranı ifade etmektedir. A_R değeri, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$A_R = \frac{A_{\text{bariyerli durum}}}{A_{\text{bariyersiz durum}}} \quad (2.11)$$

Burada A, belirli bir ölçüm noktasındaki titreşim genliğini temsil etmektedir. Bariyerin izolasyon performansının değerlendirilmesi, bariyerin varlığı ve yokluğu durumlarındaki ivme, hız veya yer değiştirme ölçümleri kullanılarak yapılmaktadır (Alzawi ve El Naggar, 2011). Bu nedenle, genlik azaltma oranı (A_R), ivme, hız veya yer değiştirme değerleri üzerinden hesaplanabilmektedir.

Bir diğer değerlendirme yöntemi, titreşim genliğindeki azalmanın yüzde olarak ifade edilmesidir. Madheswaran ve ark. (2009) tarafından azaltma faktörü olarak tanımlanan bu kavram, daha sonra bariyer etkinliği (Barrier Efficiency, BE) olarak adlandırılmıştır (Baziar ve ark, 2018; 2019). Baziar ve ark. (2019), bariyer etkinliğini değerlendirmek için aşağıdaki eşitliği kullanmıştır:

$$BE = 100x(1 - A_R) \quad (2.12)$$

Titreşim yalıtım sistemlerinin etkinliği, çeşitli parametrelerle değerlendirilebilmektedir. Insertion Loss (IL), genlik azaltma oranı (A_R) ve bariyer etkinliği (BE) gibi metrikler, literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. İvmeölçerler, jeofonlar ve hız dönüştürücüler, farklı çalışmalar tarafından kullanılan temel sensörler olup, ölçüm sonuçları frekans bazlı analizlerle desteklenmektedir. Yalıtım sistemlerinin performans değerlendirmesinde kullanılan bu yöntemler, sistemin gerçek titreşim kaynakları karşısında ne kadar etkili olduğunu belirlemek için kritik öneme sahiptir.

2.1.4. Zemin kaynaklı titreşimlerinin azaltılması

Zemin kaynaklı titreşimlerinin kontrol altına alınabilmesi için, titreşimin kaynakta oluşumu, ortam içinde yayılımı ve alıcı ile etkileşimi dikkate alınarak kapsamlı bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, zemin titreşimlerine karşı geliştirilen önlemler üç ana grupta incelenebilir:

- Kaynakta titreşimi azaltmaya yönelik yöntemler, titreşimin oluşum aşamasında minimize edilmesini hedeflemektedir.
- Titreşimlerin yayılım yolunda azaltılmasına yönelik yöntemler, dalgaların kaynaktan alıcıya ulaşmasını önlemeye odaklanmaktadır.
- Alıcıda titreşimin etkisini azaltmaya yönelik yöntemler, yapılar ve hassas cihazlar üzerindeki titreşim seviyesini düşürmeyi amaçlamaktadır.

Titreşimleri kontrol altına almak için başvurulacak ilk yöntemlerden biri, titreşim kaynağının izole edilmesi veya iyileştirilmesidir. Raylı sistemlerde, hat kalitesinin artırılması ve yerel kusurların giderilmesi, zemin titreşimlerini azaltmada etkili olabilmektedir (Kouroussis ve ark, 2014). Bunun yanı sıra, düşük kauçuk sertliğine sahip esnek tekerleklerin kullanımı, tramvay kaynaklı titreşimlerin %70 oranında azalmasını sağlamaktadır. Taban izolatörleri, titreşimlerin azaltılmasında etkili yöntemlerden biri olarak kullanılmaktadır. Çelik yaylar, yapı üstyapısı ile temeli arasında yerleştirilerek aşırı metro titreşimlerini Çin standartlarında kabul edilebilir seviyelere indirmek amacıyla uygulanmıştır (Yang ve ark, 2019). Titreşim yalıtımına ek olarak, eylemsizlik blokları kullanılması hem titreşim hem de dönme hızını azaltırken, sistemin genel stabilitesini artırmaktadır (Yun ve Mak, 2010). Çelik yaylar ve eylemsizlik kütlelerinin birlikte kullanılması, yüksek hassasiyetli cihazların zemin kaynaklı titreşimlerden izole edilmesini sağlamış, tel ağlarla kaplanmış çelik helezon yaylar üzerinde yerleştirilen eylemsizlik kütlesi, sismik sınırlayıcılar yardımıyla salınım deformasyonlarını kontrol altına almıştır (Ülgen ve ark, 2016). Yaylar ve sönümleme çerçevelerinden oluşan doğrusal olmayan izolatörler, önemli ölçüde titreşim izolasyonu sağlamıştır (Liu ve ark, 2023). Bunun yanı sıra, üst üste yerleştirilmiş kum torbalarından oluşan taban izolatörleri, demiryolu ve araç trafiğinden kaynaklanan titreşimleri azaltmak amacıyla kullanılmıştır (Sheng ve ark, 2020). Demiryolu kaynaklı zemin titreşimlerinin azaltılmasıyla ilgili yöntemler Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Demiryolu kaynaklı zemin titreşimlerinin azaltılması.

Kaynakta titreşim azaltma	Yayıma yolunda titreşim azaltma	Alıcıda titreşim azaltma
Kaynaklı ray kullanımı	Açık hendekler	Bina izolasyonu
Esnek tekerlekler	Esnek bariyerler	Elastik destek sistemleri
Tekerlek tornalama	• Geofoam • Kauçuk • Su dolu • Bentonit	Yaylar
Ray sabitleyici	Rijit bariyerler	Sönümleyiciler
Yüzer plakalar	• Diyafram duvar tipi • Kazık tipi • Palpanj levha tipi	
Zemin stabilizasyonu	Kompozit bariyerler	

Titreşim azaltma yöntemleri arasında titreşim üreten makinelerin dengelenmesi ve zemin stabilizasyonu gibi uygulamalar da bulunmaktadır (Jain ve Soni, 2007). Bunun yanı sıra, zemin iyileştirme çalışmaları da titreşim azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Zemin sertliğini artırmak için orijinal zemin daha rijit bir malzeme ile değiştirilerek, titreşimlerin yayılımı azaltılabilmektedir (Andersen & Nielsen, 2005).

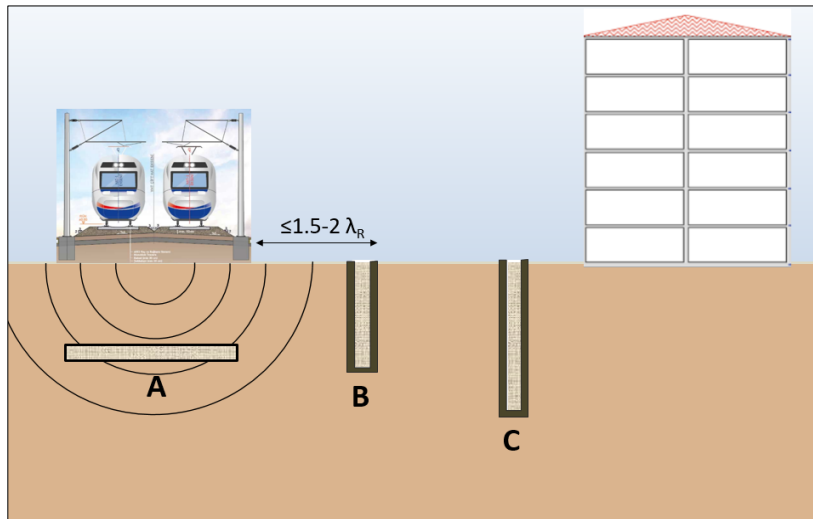
Ancak, bazı durumlarda titreşim kaynağının doğrudan veya dolaylı izolasyonu mümkün olmayabilir. Bu tür durumlarda, titreşimlerin yayılımı önlenerek veya azaltılarak etkili bir kontrol sağlanabilir. Titreşim dalgalarının kaynaktan alıcıya ulaşmasını önlemek amacıyla dalga bariyerleri kullanılmaktadır. Dalga bariyerleri, açık hendekler ve dolgulu hendekler olmak üzere iki farklı türde uygulanmaktadır. Açık hendekler, ek bir malzeme kullanılmadan kazı yapılarak oluşturulan bariyerlerdir ve bu nedenle bağımsız bir dalga bariyeri türü olarak kabul edilmektedir. Açık hendeklerden farklı olarak, dolgulu hendeklerin etkinliği genişlik ve derinlik gibi parametrelere bağlıdır. Araştırmalar, dolgulu hendeklerin optimum derinliğinin Rayleigh dalga boyunun yaklaşık 1.2 katı olması gerektiğini göstermektedir (Ahmad ve Al-Hussaini, 1991).

Bariyerlerin yapısında kullanılan malzeme, çevreleyen zemin ortamına kıyasla daha yumuşak veya daha rijit olabilir. Geofoam, kauçuk parçacıkları, su ve bentonit ile doldurulmuş hendekler, esnek dalga bariyerleri olarak sınıflandırılmaktadır. Buna karşılık, diyafram duvarlar, kazık temeller ve çelik plakalar gibi sert yapı

elemanlarından oluşan bariyerler rijit dalga bariyerleri olarak adlandırılmaktadır. Bunun yanı sıra, farklı türde bariyerlerin birlikte kullanılması veya kompozit malzeme uygulamalarının dalga bariyeri olarak değerlendirilmesi, başka bir sınıflandırma altında ele alınmaktadır.

Eğer zemin kaynaklı titreşimler yalnızca belirli yapıları etkiliyorsa, alıcıda titreşim azaltma önlemleri etkili bir çözüm sunmaktadır. Özellikle sanayi yapılarında, hassas cihazların korunması için yalnızca belirli bölümlerin veya ekipman temellerinin izole edilmesi tercih edilebilir. Bu tür izolasyon yöntemleri, tüm binayı yalıtmaktan ziyade kritik yapısal bileşenlerin korunmasına odaklanmakta olup, sanayi tesislerinde yaygın olarak uygulanmaktadır.

Titreşim azaltıcı sistemlerin bir diğer sınıflandırma yöntemi ise yük kaynağına yakın veya uzak konumlandırılmasına göre değerlendirilmesidir. Zemin titreşimi üreten kaynağa yakın yerleştirilen izolasyon sistemine "aktif yalıtım", korunması amaçlanan yapı sistemine yakın yerleştirilen izolasyon sistemine ise "pasif yalıtım" adı verilmektedir (Şekil 2.9). Haupt (1995), aktif yalıtımın genellikle yakın alan içinde, yani maksimum $1.5 \lambda_R - 2 \lambda_R$ mesafesi içinde alınan önlemler olarak tanımlandığını belirtmiştir. Pasif yalıtım için ise hendek derinliğinin en az $1.2 \lambda_R$ ile $1.5 \lambda_R$ arasında olması gerektiğini önermiştir. Bu tez kapsamında üretilen izolasyon sistemi ile yapılan tüm çalışmalarda, pasif yalıtım yaklaşımı benimsenmiştir.



Şekil 2.9. Yalıtım durumları: A)Aktif yalıtım-yatay dalga bariyeri, B)Aktif yalıtım-düşey dalga bariyeri, C)Pasif yalıtım-düşey dalga bariyeri

2.2. Hava Kaynaklı Titreşim Üreten Mekanizmalar

Gürültü, titreşen yüzeylerin veya hava akımlarının neden olduğu ses dalgalarının havada yayılmasıyla oluşur. Özellikle endüstriyel ortamlarda, makinelerin ve donanımların çalışması sırasında yüksek düzeyde gürültü üretilmektedir. Bunun yanı sıra, şehir içi ve şehirlerarası trafik, sanayi tesisleri, inşaat faaliyetleri ve eğlence sektöründeki yüksek sesli etkinlikler gibi çeşitli kaynaklar da çevresel gürültüye önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre, 55 dB üzerindeki gürültü seviyeleri çevresel gürültü kirliliği olarak kabul edilmekte ve 65-75 dB arasındaki maruziyet, kardiyovasküler hastalıklar, arter rahatsızlıkları ve miyokard enfarktüsü gibi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Demiryolu trafiği, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği nedeniyle en çok tercih edilen ulaşım türlerinden biri olmasına rağmen, çevresel gürültü açısından karayolu trafiğinin ardından ikinci en büyük gürültü kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bu çerçevede, özellikle yüksek hızlı trenlerin neden olduğu gürültü önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Yüksek hızlı trenlerden kaynaklanan gürültü, diğer raylı sistemlerle benzerlik gösterse de, yüksek hızlardan kaynaklanan bazı kendine özgü akustik özellikler taşımaktadır. Genellikle çelik tekerlekli, elektrikli veya fosil yakıtlı olarak çalışan ve 250 km/sa üzeri hızlara ulaşabilen bu sistemler, kara taşımacılığında önemli bir gürültü kaynağıdır. Yüksek hızlı trenlerin neden olduğu çevresel gürültü; Kaynak-Yol-Alıcı çerçevesinde ele alınan bir konu olup, bu çerçeve gürültünün kaynağından alıcıya kadar izlediği yolu ve bu süreçte maruz kaldığı zayıflamaları tanımlamaktadır. Gürültünün yayılım yolu; kaynaktan uzaklaştıkça meydana gelen zayıflama, atmosferik soğurma, zemin etkileri ve arazi yapısı ile ses bariyerleri gibi unsurlar tarafından sağlanan akustik perdeleme gibi faktörleri içermektedir. Bu bağlamda, yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu gürültünün bileşenlerinin anlaşılması ve kontrol edilmesi, çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

2.2.1. Gürültü tanımları

Çevresel gürültünün evrensel olarak kullanılan ölçütü, A ağırlıklı ses seviyesi olarak adlandırılmaktadır. Bu ölçüt, belirli bir anda alıcıda ölçülen gürültü seviyesini ifade eder ve gürültü izleme cihazlarında "A" ağırlıklandırma modu etkinleştirilerek doğrudan okunabilir. Tipik A ağırlıklı ses seviyeleri değerlendirildiğinde; 40 dBA oldukça sessiz bir ortamı, 90 dBA ise oldukça yüksek bir gürültü seviyesini ifade etmektedir. Bu ölçek, "dBA" olarak gösterilmekte olup, A ağırlıklı ses seviyelerinin

yaygın kullanım biçimini temsil etmektedir. "dB" ifadesi desibel birimini ifade eder ve genel olarak sesin gücünü belirtir. "A" harfi ise, insan kulağının duyma karakteristiğini taklit edecek şekilde düşük ve yüksek frekanstaki seslerin azaltıldığı bir filtreleme işlemini gösterir. A ağırlıklı ses seviyesindeki her 10 desibellik artış, algılanan ses şiddetinin yaklaşık iki katına çıkmasına neden olmaktadır.

Ses basınç seviyesi, çevremizdeki gürültü şiddetini belirleyen bir ölçüt olup, desibel (dB) birimiyle ifade edilir. Sesin şiddeti, kaynaktaki ses güç seviyesinin sesin geçtiği ortama ve mesafeye bağlı olarak değişir. SPL (Sound Pressure Level) veya L_p ile gösterilen bu seviye, ölçülen ses basıncının referans bir değere oranının logaritmasıyla hesaplanır. $20 \mu\text{Pa}$, insan duyum eşiği olarak kabul edilen referans ses basıncıdır.

$$L_p = 20 \times \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (2.13)$$

L_p , desibel (dB) cinsinden ses basınç seviyesini, p , ölçülen ses basınç değerini, p_0 ise referans ses basınç seviyesi olan 20×10^{-6} Pa değerini ifade etmektedir.

Eşdeğer Gürültü Seviyesi (L_{eq}), belirli bir T zaman aralığında ölçülen toplam ses enerjisinin süreye bölünmesiyle hesaplanan ve dBA biriminde ifade edilen bir gürültü ölçüsüdür. Gürültü analizlerinde sıkça kullanılan bu parametre, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$L_{eq} = 20 \times \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \text{ dB} \quad (2.14)$$

Formülde: T, ses seviyesinin toplam ölçüm süresini, $p(t)$, anlık ses basıncını, p_0 , referans ses basınç seviyesi olan $20 \mu\text{Pa}$ değerini ifade etmektedir. L_{gag} (Gündüz, akşam, gece gürültü göstergesi): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesi ortalaması olup, günlük rahatsızlık düzeyini belirlemek için kullanılır.

$L_{gündüz}$ (Gündüz gürültü göstergesi): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesi ortalaması olup, yıl boyunca gündüz süresine göre hesaplanır ve gündüz süresince rahatsızlık düzeyini gösterir.

$L_{akşam}$ (Akşam gürültü göstergesi): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesi ortalaması olup, yıl boyunca akşam süresine göre hesaplanır ve akşam süresince rahatsızlık düzeyini gösterir.

L_{gece} (Gece gürültü göstergesi): A ağırlıklı uzun dönem ses seviyesi ortalaması olup, yıl boyunca gece süresine göre hesaplanır ve gece süresince uyku kaçırıcı rahatsızlık düzeyini gösterir.

2.2.2. Demiryolu gürültüsü karakterizasyonu

Demiryolu gürültüsü, araç ve ekipman kaynaklı gürültüler ile araç/yol etkileşimi sonucu oluşan gürültüler olarak iki ana gruba ayrılabilir. Raylı ulaşım sistemlerinde gürültüye neden olan temel unsurlar, lokomotifler ile vagonlardır. Lokomotifler ve vagonlar tarafından üretilen en baskın gürültü, tekerlek-ray etkileşimi sonucu ortaya çıkan yuvarlanma gürültüsüdür. Bununla birlikte, çekiş sistemlerinden kaynaklanan sesler de belirli ölçüde etkili olmaktadır. Çekiş sistemine bağlı olarak ortaya çıkan gürültü, diğer gürültü bileşenlerinden farklı olarak hızdan daha az etkilenmektedir. Ancak, motor gücünün artırıldığı durumlarda belirgin hale gelebilir. Özellikle dizel araçlarda çekiş gürültüsü daha önemli bir sorun oluştururken, elektrikli araçlarda da belirli seviyelerde gözlemlenebilmektedir.

Demiryolu trafiği kaynaklı başlıca gürültü türleri şunlardır:

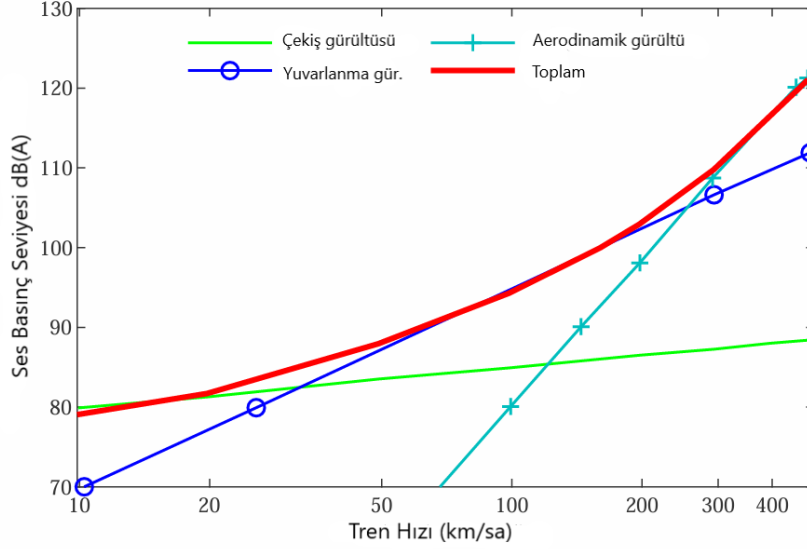
- Tahrik (çekiş) gürültüsü
- Tekerlek-ray etkileşim (yuvarlanma) gürültüsü
- Kurbalardaki gürültü
- Köprü üzerindeki gürültü
- Aerodinamik gürültü
- Yapısal gürültü

Gürültü seviyelerinin araç hızına bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı, farklı gürültü bileşenlerini ayırt edebilmek ve hıza bağlı olarak gürültü seviyesini tahmin edebilmek için matematiksel modeller geliştirmiştir (King III, 1977; King III ve Bechert, 1979; Mauclaire, 1990; Mellet ve ark, 2006; Poisson ve ark, 2008). Sonuçlardaki ve ifadelerdeki değişkenliğe rağmen, gürültü tahmini genellikle iki farklı matematiksel ifade temelinde yapılmaktadır. Bu ifadeler, baskın gürültü kaynağına bağlı olarak farklılık göstermektedir: Yuvarlanma gürültüsü Denklem 2.15 ile ifade edilirken, aerodinamik gürültü Denklem 2.16 ile tanımlanmaktadır (Thompson, 2008).

$$L_p = 30 \times \log V \text{ dB} \quad (2.15)$$

$$L_p = 60 \times \log V \text{ dB} \quad (2.16)$$

Demiryolu gürültüsünün seviyesi; açık alanlarda, eğimli hat kesitlerinde, travers ve balastlı hatlarda gerçekleştirilen, hattan belirli bir mesafede ve standart yüksekliklerde konumlandırılan mikrofonlarla yapılan ses basınç ölçümleriyle değerlendirilmektedir. Şekil 2.10'da tren hızının artışına bağlı olarak gürültü kaynaklarının katkısının değişimi gösterilmektedir. 40 km/sa hızın altında, çekiş sistemlerinden kaynaklanan sesler baskınken, 40-250 km/sa hız aralığında en önemli gürültü kaynağı yuvarlanma sesidir. 250 km/sa'in üzerinde ise aerodinamik gürültüler ön plana çıkmaktadır. Raylı sistemlerin büyük bir kısmı 40-250 km/sa hız aralığında çalıştığından, en yaygın gürültü kaynağı yuvarlanma gürültüsüdür.



Şekil 2.10. Hız artışına bağlı olarak gürültü kaynaklarının katkısındaki değişim (dos Santos, 2024).

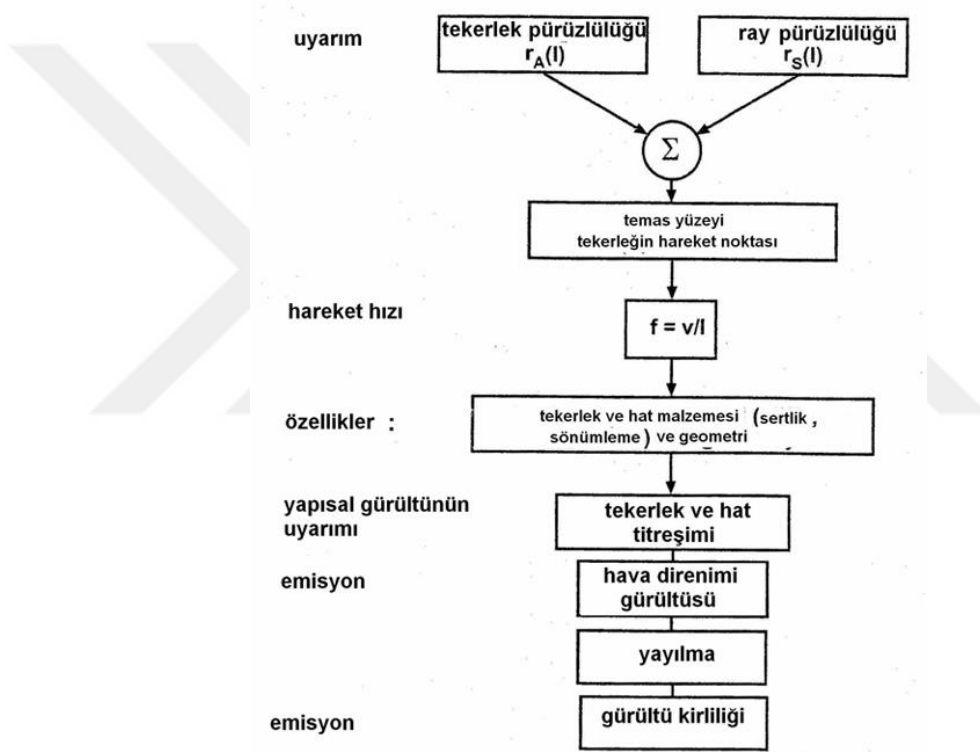
2.2.2.1. Tekerlek-ray etkileşimi (yuvarlanma) gürültüsü

Tekerlek-ray etkileşim (yuvarlanma) gürültüsü, demiryolu trafiği kaynaklı en önemli gürültü bileşeni olarak kabul edilmektedir. Bu gürültü, ray ve tekerlek yüzeylerindeki düzensizlikler, pürüzlülük ve yüzey bozulmaları nedeniyle oluşan mekanik titreşimler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Ray ve tekerlek tamamen pürüzsüz yüzeylere sahip olmadığından, bu düzensizlikler temas noktalarında göreceli hareketlere neden olur ve bu hareketler yüksek frekanslı titreşimler oluşturarak gürültüye sebep olur. Bu titreşim, akustik ortama enerji aktararak ses dalgaları şeklinde yayılmaktadır. Ray ve tekerlek yüzeyindeki pürüzlerin belirli bir dalga boyuna (λ) sahip olduğu kabul

edilirse, aracın belirli bir hızda (V) hareket etmesi durumunda sürekli bir sinusoidal titreşim meydana gelir. Bu titreşimin frekansı (f), şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (2.17)$$

Şekil 2.11, tekerlek-ray etkileşiminden kaynaklanan gürültünün oluşum sürecini şematik olarak göstermektedir. Ray ve tekerlek yüzeyinin pürüzlü yapısı, temas noktalarında sürekli bir etkileşim oluşturarak gürültüye sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, ray ve tekerlek titreşimiyle bağlantılı olan diğer yapısal elemanlar da yuvarlanma gürültüsünün oluşumuna katkıda bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Yuvarlanma gürültüsünün oluşum süreci (Lichtberger, 2005).

Demiryolu sistemindeki elemanların titreşimi, gürültü oluşumunda önemli bir rol oynar ve hattın kendisi dalga yayılımını yönlendirerek farklı frekanstaki titreşimlerin yayılmasını sağlar. Bu süreçte, titreşim sönümlleme mekanizmaları, enerjinin yol boyunca kısmen dağılmasını sağlayarak gürültü seviyelerini etkilemektedir. Gürültü ve titreşim sönümlleme, bağlantı sistemleri ve alt yapı elemanları aracılığıyla sağlanmaktadır. Özellikle traverslerin altına yerleştirilen sönümleyici malzemeler, enerji yayılımını zemine ileterek titreşimi azaltmaktadır. Yüksek hızlı tren hatlarının

gelişimiyle birlikte, beton zeminli ray sistemleri yaygın hale gelmiştir; ancak balastlı hatlar, daha yüksek ses emme kapasitesine sahip olup, beton hatlara kıyasla daha fazla akustik sönümleme sağlamaktadır. Buna karşılık, beton hatlarda dalga yayılımı daha uzun süre devam etmekte ve düşük frekanslı gürültü seviyeleri daha yüksek olmaktadır.

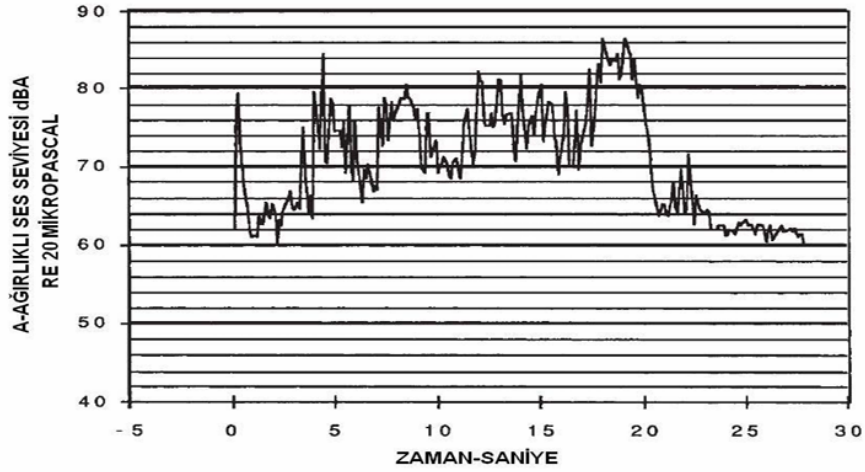
Yuvarlanma gürültüsüne neden olan bir diğer sebep ise, demiryolu trafiği ve ray yüzeyindeki düzensizliklerin neden olduğu dalgalı aşınma yani, ondülasyon fenomenidir. Bu aşınma, tekerlek ve ray yüzeylerinde zamanla ilerleyen dalga formlu deformasyonlara yol açarak gürültü seviyelerini artırmaktadır. Araçların tekrarlayan geçişleri ile bu aşınma şiddetlenmekte ve kalıcı hasarlara yol açmaktadır. Bu tür aşınmalar, farklı dalga boylarına sahip olup, belirli frekans aralıklarında karakterize edilebilmektedir (Grassie, 2009).

Tekerlek-ray gürültüsünün şiddeti, tekerlek ve ray yüzeylerinin pürüzlülük durumu ile doğrudan ilişkilidir. Yüzeydeki düzensizlikler, ray dalgalanmalarından ve rastgele yüzey bozulmalarından kaynaklanabilir. Ayrıca, yol altyapısının yapısı ve durumu da gürültünün yayılımı ve şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, tekerlek ve ray yüzeylerinin düzenli bakımı, temas dinamiklerinin iyileştirilmesi, yüzey düzensizliklerinin giderilmesi ve yol altyapısının optimize edilmesi, gürültüyü azaltmak için titreşim sönümleme kapasitesi yüksek malzemeler kullanılarak ray-travers titreşimlerini dengeleyen mühendislik çözümleri geliştirilmesi yuvarlanma gürültüsünün kontrol altına alınması açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte yüksek hızlardaki aerodinamik gürültüye geçiş noktasının belirlenerek, tasarım optimizasyonlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

2.2.2.2. Kurbalardaki gürültü

Demiryolu araçları bir kurbada dönerken, tekerlek akslarının ray ile tam temas sağlayamaması nedeniyle gürültü oluşmaktadır. Bu durum, arka aksın dışa, ön aksın ise kurbanın içine doğru yönelme eğilimi göstermesiyle ortaya çıkar. Kurbalardaki demiryolu taşıtının davranışı; araç hızı, kurba yarıçapı ve ray geometrisine bağlıdır. Demiryolu araçlarının aksları, iki tekerleğin birbirine rijit olarak bağlanmasıyla oluşur. Araç kurbaya girdiğinde, arka aks merkezkaç kuvvetleri nedeniyle dışa doğru kayma eğiliminde olur, bu da dış tekerleğin iç tekerleğe göre daha uzun bir mesafe kat etmesine neden olur.

Kurba gürültüsü, hem düz hatlarda meydana gelen tipik yuvarlanma gürültüsünü hem de kurbaya özgü olarak tekerlek sırtının ray üzerinde yanal kaymasıyla oluşan ek gürültüyü içermektedir. Yanal kayma sonucu oluşan bu gürültü, sürekli ve yoğun bir çınlama şeklinde duyulmakta olup, sürtünme ve negatif sönümleme etkileriyle ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.12’de, bir demiryolu aracının neden olduğu çınlama örneklendirilmiştir.



Şekil 2.12. Hafif ray aracının tekerlek çınlama gürültüsü (Öztürk ve Arlı, 2010).

Kurba boyunca hareket eden bir tekerleğin hızı, tekerlek düzlemine teğet hız bileşeni ve tekerlek yüzeyine dik hız bileşeni olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Dış tekerlek, düz bir hat üzerinde ilerlemeye çalışırken ve aracın ön aksı kurbanın dışına doğru yönelirken, yüksek ray üzerindeki tekerlek flanşı tarafından sınırlandırılır. Ancak arka aks, yüksek ve düşük raylar arasında hareket eder ve düşük raydaki tekerlek flanşı, düşük ray açıklığının yüzeyine temas eder. Bunun sonucunda tekerlek ile ray arasında bir sürtünme kuvveti oluşur. Bu sürtünme kuvveti, tekerleğin titreşmesine neden olarak gürültü yayılımına yol açar.

Kurba gürültüsü, belirli noktalarda yoğunlaşan bir etkiye sahip olmasına rağmen, demiryolu trafiğinde en rahatsız edici gürültü türlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Yapılan araştırmalar, bu gürültünün 250 Hz ile 5000 Hz arasındaki frekans aralığında yayıldığını ve insan kulağı tarafından son derece rahatsız edici olarak algılanan tonal bir karaktere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmaya göre, Avrupa nüfusunun yaklaşık %7’si kurba gürültüsüne maruz kalmaktadır. Bu oran,

özellikle sık dönüşlerin bulunduğu kentsel demiryolu ağlarında daha yüksek olup, düşük yarıçaplı kurbalarda gürültü seviyeleri belirgin şekilde artmaktadır.

Kurba gürültüsüne neden olan başlıca faktörler arasında tekerleklerin ray başı üzerinde sürtünerek kayması, ray flanşı ile ray arasındaki sürtünme etkisi ve tekerleklerin iç ve dış kısımlarındaki hız farkı nedeniyle oluşan kayma hareketleri yer almaktadır. Bu mekanizmalar arasında, ray başı ile tekerlek arasındaki sürtünme hareketi en büyük gürültü kaynağını oluşturmaktadır. Dolayısıyla, düşük yarıçaplı kurbalarda gürültü seviyelerinin kontrol altına alınması ve azaltılması için etkili çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Kurba gürültüsünün azaltılmasına yönelik çeşitli stratejiler öne sürülmektedir:

- Araçların kurba alma yeteneklerinin iyileştirilmesi ve ray profillerinin optimize edilmesi,
- Ray ve tekerlek yüzeylerinin düzenli olarak yağlanması,
- Tekerlek tasarımında sürtünmeyi minimize edecek çözümler uygulanması,
- Raylarda titreşim sönümleyici malzemelerin kullanılması.

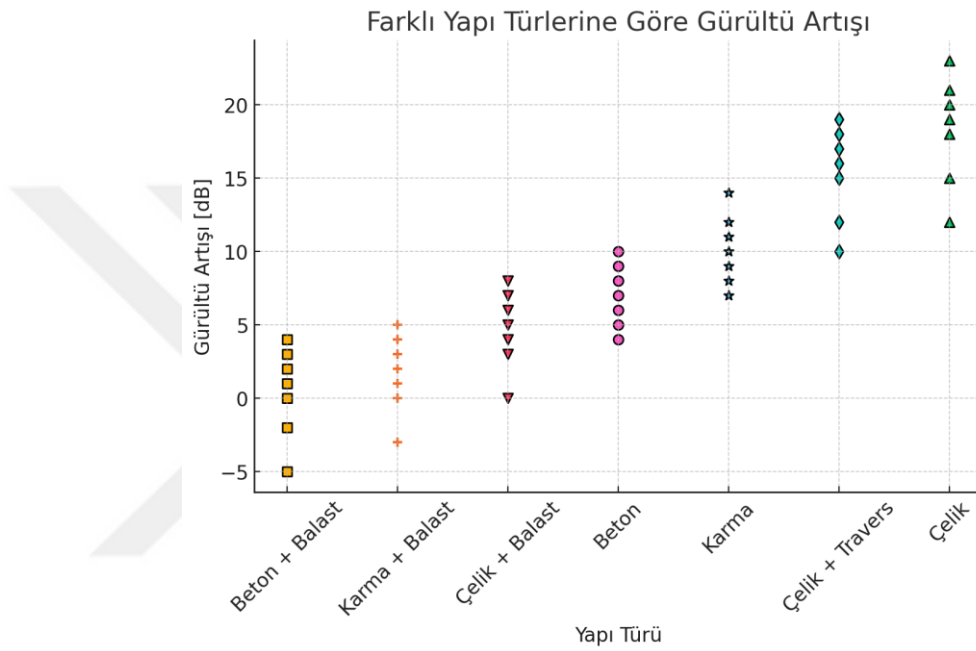
2.2.2.3. Köprü ve viyadük kaynaklı gürültü

Demiryolu ağlarının önemli bir parçası olan köprüler ve viyadükler gibi yükseltilmiş yapılardan kaynaklanan gürültü tipidir. Geleneksel hatlarla kıyaslandığında, bu yapıların varlığı nedeniyle ses basınç seviyelerinde 10 dB'e kadar artış gözlemlenebilmektedir (Kurzweil, 1977; Janssens ve Thompson, 1996). Bu nedenle, köprü ve viyadük kaynaklı gürültü çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiş ve bu gürültünün karakterize edilmesi ile azaltılmasına yönelik çeşitli müdahaleler önerilmiştir (Thompson, 2008; Bos, 1997; Janssens ve ark, 1998; Poisson ve Margiocchi, 2006). Bu tipteki gürültünün oluşum nedenleri iki temel mekanizmayla ilişkilidir (Thompson, 2008):

- 1- Araçların geçişi sırasında yükseltilmiş yapıya iletilen titreşimler, genellikle büyük ölçekli olan bu tür yapıların yüzeyine yayılarak yüksek seviyelerde gürültü yayılımına neden olmaktadır.
- 2- Rayların üst yapıya bağlanma şekli, rayın titreşim seviyelerini doğrudan etkilemektedir.

Şekil 2.13'te, farklı yapı türleri ve ray bağlantı yöntemlerine bağlı olarak gürültü seviyelerindeki değişimler gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, metal köprülerde,

rayların doğrudan yapıya veya yapının üzerine yerleştirilmiş traverslere sabitlendiği durumlarda gürültü seviyeleri 15-20 dB'e kadar artış göstermektedir. Bununla birlikte, beton köprülerde ve balastlı hat sistemlerinde ise gürültü artışı daha sınırlı düzeyde kalmaktadır. Şekil 2.13'te gösterilen veriler, aynı kategorideki yükseltilmiş yapılar arasında bile gürültü seviyelerinin değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yapının tasarımına, dinamik özelliklerine ve gürültü yayılım verimliliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Bewes, 2005).



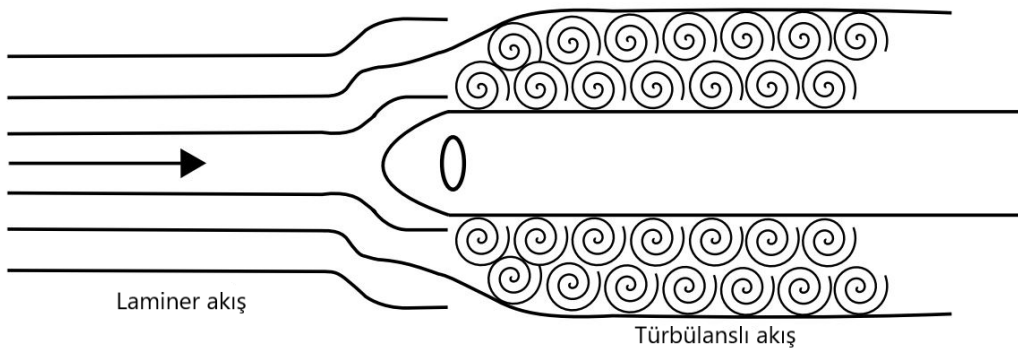
Şekil 2.13. Farklı yapı tipleri ve ray bağlantı yöntemlerine bağlı olarak gürültü seviyelerindeki değişimler (dos Santos, 2024).

Thompson, yükseltilmiş yapılardan kaynaklanan gürültünün seviyelerini belirleyen temel unsurları araştırdığı çalışmasında, bu tipteki gürültünün azaltılmasına yönelik çeşitli yöntemler önermiştir (Thompson, 2008):

- Ray bağlantı elemanlarının rijitliğinin değiştirilmesi,
- Rayların sönümleme koşullarının iyileştirilmesi,
- Balast tabakasının altına elastik izolasyon katmanlarının yerleştirilmesi,
- Yapının genel titreşim sönümleme kapasitesinin artırılması,
- Kapalı yapıların inşa edilmesi,
- Akustik bariyerlerin kullanılması.

2.2.2.4. Aerodinamik gürültü

Aerodinamik gürültü, yüksek hızlı trenlerin işletimi sırasında ortaya çıkan bir gürültü türüdür. Bu gürültünün kaynağı, yüksek hızda hareket eden trenin çevresinde oluşan hava akışıdır. Tren yüzeyinin etrafında meydana gelen türbülanslı akış, aerodinamik gürültünün temel mekanizmasını oluşturmaktadır. Aracın yüzeyindeki girintiler veya yapının dışına taşan bileşenler, türbülansı artırarak gürültünün yayılmasına neden olmaktadır (De Vos, 2013). Yüksek hızlı trenin etrafındaki türbülanslı akışın oluşumu Şekil 2.14'te şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.14. Tren etrafında türbülanslı akış oluşumunun şematik gösterimi (Thompson, 2008).

Aerodinamik gürültü, genellikle 500 Hz'in altındaki düşük frekans bileşenlerinden oluşmaktadır; ancak, bu tipteki gürültünün temel kaynağı yalnızca tren yüzeyinde oluşan türbülans değildir. Baskın gürültü kaynakları; silindirik katı cisimlerin etrafındaki hava akışı, akışın yüzeydeki süreksizliklerle etkileşimi ve yüzeydeki boşluklar üzerinde oluşan akış etkileridir (Thompson, 2008).

Trenin hızının artmasıyla birlikte aerodinamik gürültünün toplam gürültüye katkısı önemli ölçüde artmaktadır. Bu tipteki gürültü, tren hızına bağlı olarak yuvarlanma gürültüsüne kıyasla yaklaşık iki kat daha hızlı bir artış eğilimi göstermektedir. Yapılan çalışmalar; aerodinamik gürültünün toplam tren gürültüsü içindeki payının yuvarlanma gürültüsünü geçtiği hızın yaklaşık 370 km/sa olduğunu ifade etmektedir (Poisson, 2015).

Tren, yüksek hızla hareket ettiğinde geometrisindeki herhangi bir oyuk üzerinden hava akışı geçmektedir. Örneğin pantograf yuvası gibi yapısal boşluklar, hava akışı ile rezonansa girerek ek gürültü kaynakları oluşturmaktadır (Noger ve ark, 2000).

Yuvarlanma gürültüsüne kıyasla, aerodinamik gürültü kaynaklarının doğrudan ölçümü daha zordur. Tren geçişi sırasında mikrofon dizileri kullanılarak belirlenebilir; ancak aerodinamik akustik kaynakların çok kutuplu yapıya sahip olması nedeniyle bazı sınırlamalar içermektedir. Aerodinamik gürültünün karakterize edilmesi için rüzgar tüneli testleri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Trenin hızının artmasıyla birlikte aerodinamik gürültünün toplam gürültüye katkısı önemli ölçüde artmaktadır. Bu tipteki gürültü, tren hızına bağlı olarak yuvarlanma gürültüsüne kıyasla yaklaşık iki kat daha hızlı bir artış eğilimi göstermektedir. Yapılan çalışmalar; aerodinamik gürültünün toplam tren gürültüsü içindeki payının yuvarlanma gürültüsünü geçtiği hızın yaklaşık 370 km/sa olduğunu ifade etmektedir (Poisson, 2015).

Aerodinamik gürültü, trenin yapısal bileşenleri ile hava akımı arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkmaktadır ve uçakların inişi sırasında flaplar ve iniş takımlarının oluşturduğu gürültüye benzerlik göstermektedir. Bu gürültünün kaynağı, aracın tasarımına ve hareketli parçalarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Genel olarak, aerodinamik gürültüye neden olan başlıca unsurlar şunlardır (Thompson, 2008):

- Boji sistemleri,
- Pantograflar ve yüzeydeki girintiler,
- Ön vagonun burun kısmı,
- Vagonlar arasındaki boşluklar,
- Yapısal oyuklar ve boşluklar,
- Tren yüzeyinde oluşan türbülanslı hava akışı.

Bu faktörler, trenin hareketi sırasında hava akışında türbülans oluşturmakta ve böylece gürültü seviyelerinin artmasına neden olmaktadır. Aerodinamik gürültünün azaltılmasına yönelik çalışmalar, özellikle bu bileşenlerin tasarım ve yerleşim optimizasyonuna odaklanmaktadır.

2.2.2.5. Yapısal gürültü

Yapısal gürültü, raylı sistemlerin geçişi sırasında yapı elemanlarında oluşan titreşimlerin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Literatürde “yeniden yayılan gürültü” olarak da bahsedilen bu gürültü tipi, doğrudan demiryolu aracının geçişiyle oluşan bir gürültü olmayıp; titreşimlerin ray hattına bitişik yapısal elemanlara iletilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu titreşimler, zemin boyunca yayılarak

binaların temellerine ulaşarak; buradan da yapının döşemelerine, iç ve dış duvarlarına aktarılmaktadır. Bu süreç, titreşim enerjisinin akustik enerjiye dönüşmesine ve dolayısıyla duyulabilir gürültüye yol açmasına neden olmaktadır. Özellikle şehir merkezlerinde, metro tünellerinde ve trafik kaynaklı titreşimlere duyarlı yapılarda daha belirgin hale gelen bu tipteki gürültünün frekans aralığı; 16 Hz ile 250 Hz arasında değişmektedir (Thompson, 2008).

2.2.3. Demiryolu gürültüsünün tahmini

ABD Federal Ulaştırma İdaresi (FTA) tarafından demiryolu kaynaklı gürültü seviyelerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılan eşdeğer gürültü seviyesi bağıntısı, çevresel gürültü analizlerinde standart bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Tren hızına, araç sayısına ve çevresel faktörlere bağlı olarak gürültü seviyesinin nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla geliştirilen bu bağıntı aşağıdaki formülde verilmiştir (Hanson ve ark, 2006):

$$L_{eq(gündüz,gece)} = SEL_{ref} + 10 \log N + 20 \log \frac{V}{80} + 10 \log S_{gündüz,gece} - 35.6 + \quad (2.18)$$

(contalı hat için 5 dB, gömülü hat için 3 dB, yükseltilmiş balastsız hat için 4 dB ilave edilmelidir.)

Denklem 2.18’de, SEL_{ref} V=80 km/sa tren hızı ve hat ekseninden 15 m mesafede için sese maruz kalma referans düzeyini temsil etmektedir (Elektrikli vagonlar için 82 dA, dizel vagonlar için 85 dBA, lokomotifler için 92 dBA). N trendeki araç sayısını, V trenin hızını (km/sa) ve $S_{gündüz,gece}$ gündüz veya gece saatleri arasında 1 saatlik zaman diliminde geçen tren sayısını ifade etmektedir. Gündüz saatleri 07.00-22.00 arası, gece saatleri ise 22.00-07.00 arası olarak kabul edilmektedir.

Taşıtların teknik özellikleri ve hızlarına bağlı olarak, gündüz-gece eşdeğer gürültü seviyesi (L_{dn}) hesaplanmakta ve 2.19’da verilen bağıntı kullanılarak mesafeye bağlı olarak azalma gösteren gürültü seviyeleri belirlenmektedir.

$$L_{dn} = 10 \log \left(15 \times 10^{\frac{L_{eq(gündüz)}}{10}} + 9 \times 10^{\frac{L_{eq(gece)} + 10}{10}} \right) - 13.8 \quad (2.19)$$

Eğer birden fazla gürültü kaynağı varsa, birleşik gürültü seviyesi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$L_{dn,eq} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_{dn,eq}}{10}} \quad (2.20)$$

Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2002/49/EC) kapsamında, gündüz, akşam ve gece periyotlarına bağlı olarak çevresel gürültü seviyelerinin belirlenmesi amacıyla L_{gag} göstergesi tanımlanmıştır. L_{gag} değeri, gürültü seviyelerinin zamana bağlı değişimlerini dikkate alarak çevresel gürültü maruziyetini daha bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu bağıntı aşağıda verilmiştir:

$$L_{gag} = 10 \log \frac{1}{24} \left[12 \times 10^{\frac{L_{gündüz}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{akşam}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{gece}+10}{10}} \right] \quad (2.21)$$

Denklem 2.21’de:

$L_{gündüz}$: TS9798 (ISO 1996-2) de tanımlandığı üzere A ağırlıklı uzun dönem ses düzeyi ortalamasını ifade etmekte olup; yıl boyunca 07.00-19.00 saatleri arasındaki gündüz süresi baz alınarak,

$L_{akşam}$: TS9798 (ISO 1996-2) de tanımlandığı üzere A ağırlıklı uzun dönem ses düzeyi ortalamasını ifade etmekte olup; yıl boyunca 19.00-23.00 saatleri arasındaki akşam süresi baz alınarak,

L_{gece} : TS9798 (ISO 1996-2) de tanımlandığı üzere A ağırlıklı uzun dönem ses düzeyi ortalamasını ifade etmekte olup; yıl boyunca 23.00-07.00 saatleri arasındaki gece süresi baz alınarak hesaplanmaktadır.

Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği’ne göre, raylı sistemlerden kaynaklanan gürültünün, yapıların dış cephesinden 1 metre mesafede ölçülen seviyesinin gündüz 65 dBA, gece ise 55 dBA değerini aşmaması gerekmektedir. Konut alanlarında çevresel gürültüye yönelik uluslararası standartlarda da benzer eşik değerler görülmektedir. Türkiye’de olduğu gibi, Fransa, İngiltere ve Almanya’da da konut alanları için gündüz 65 dBA ve gece 55 dBA olmak üzere benzer gürültü sınır değerleri belirlenmiştir.

Yapılara ulaşan gürültü seviyelerinin belirlenen eşik değerleri aşması durumunda, gürültü perdesi gibi çeşitli ses azaltıcı önlemlerin uygulanması gerekmektedir. Gürültü perdelerinin gürültü azaltma etkinliği, kaynak ile alıcı arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmekte olup, maksimum 12 dBA seviyelerine ulaşabilmektedir. Buna ek olarak, ses yutucu özellikte bir perde kullanılması durumunda, gürültü yalıtımına 3 dBA’lık ek bir katkı sağlanmaktadır (Öztürk ve Arlı, 2010).

2.2.4. Demiryolu gürültüsü azaltılma yöntemleri

Demiryolu gürültüsünün azaltılmasına yönelik önlemler, çevresel koşullara ve hedeflenen ses basıncı seviyesindeki azalma miktarına bağlı olarak üç farklı düzeyde uygulanabilmektedir. Bu önlemler, doğrudan gürültü kaynağında, gürültünün yayılım yolunda veya alıcı seviyesinde uygulanabilir. Gürültü seviyelerini etkileyen birçok değişken bulunduğundan, belirlenen sınır değerlerin her zaman tam olarak uygulanması mümkün olmayabilir. Bu nedenle, gürültü azaltıcı önlemler, entegre bir yaklaşımla ele alınmalı ve gürültü seviyeleri üzerinde en büyük etkiye sahip faktörler göz önünde bulundurularak planlanmalıdır. Bu çerçevede, hat bakım çalışmalarının düzenli yürütülmesi ve kullanılan araçların teknik durumunun kontrol altında tutulması, gürültü oluşumunu en aza indirmek açısından kritik öneme sahiptir. Gürültünün yayılma yolu üzerindeki veya alıcı seviyesindeki çözümler ise yardımcı unsur olarak değerlendirilmelidir. Bu tür önlemler, ekonomik açıdan en avantajlı çözüm doğrultusunda belirlenmeli ve uygulanmalıdır (Hemsworth, 2008; Verheijen ve ark, 2011).

2.2.4.1. Kaynakta gürültü azaltımı

Demiryolu gürültüsünün büyük bir kısmı, aracın ray ile etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, gürültüyü azaltmak amacıyla araç ve ray sistemlerinde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Özellikle, tekerlek ve ray yüzeylerindeki pürüzlülüğün giderilmesi, gürültü seviyelerini doğrudan azaltmaktadır. Her iki bileşenin ayrı ayrı işlenmesi durumunda gürültüde yaklaşık 10 dB azalma sağlanabilirken, bütünsel bir yaklaşım benimsendiğinde bu azalma yalnızca 3 dB seviyesinde kalmaktadır (Thompson, 2008). Tekerlek yüzeyindeki pürüzlülüğün azaltılmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, fren sistemlerinin iyileştirilmesidir (De Vos ve Van Lier, 2000; Hemsworth ve ark., 2000). Ayrıca, amortisör kullanımı, tekerlek tasarımının değiştirilmesi veya elastik katmanlı tekerleklerin tercih edilmesi gibi ek yöntemler de gürültüyü daha etkin şekilde azaltabilmektedir. Ray yüzeyinde pürüzlülüğün önlenmesine yönelik yöntemler arasında yağlama sistemleri ve alternatif ray tiplerinin kullanımı öne çıkmaktadır. Demiryolu işletmecileri için ray yüzeyinin mümkün olduğunca düzgün tutulması öncelikli bir hedeftir. Pürüzlülüğü azaltmanın yanı sıra, raylara amortisör eklenmesi, ray izolasyonu sağlanması ve ses yayılım özelliklerinin iyileştirilmesi gibi önlemler de gürültü seviyelerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

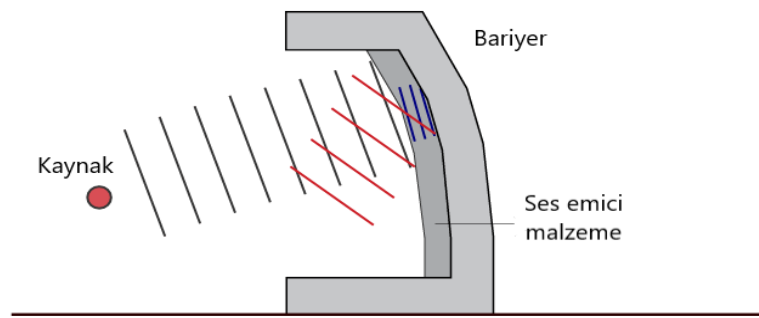
Son olarak, gürültü ve titreşim seviyelerini azaltmada en etkili çözümlerden biri ray amortisörleridir. Bu sistem, raylara eklenen sürekli veya parçalı amortisörler aracılığıyla ses dalgalarının yayılımını kontrol altına almaktadır (Dumitriu ve Cruceanu, 2017).

2.2.4.2. Yayılım yolunda gürültü azaltımı

2.2.4.2.1. Akustik bariyerler

Ses dalgalarının yayılabilmesi için bir iletken ortamın varlığı gereklidir ve bu ortam genellikle havadır. Dolayısıyla, ses dalgalarının yayılım yoluna bir engelin yerleştirilmesi, ses dalgalarının özelliklerini değiştirerek alıcıya ulaşan ses basıncı seviyelerini düşürebilir. Bu bağlamda, gürültü azaltımı için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, akustik bariyerlerin uygulanmasıdır.

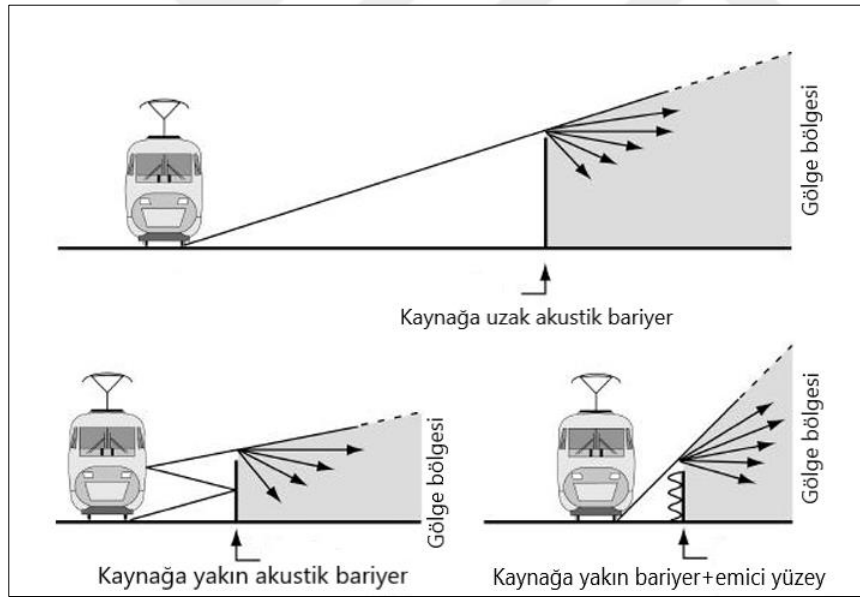
Akustik bariyerler, bulundukları ortamdan farklı fiziksel özelliklere sahip olup, ses dalgalarının yayılımına karşı engel oluşturarak sesin alıcıya ulaşmasını sınırlandırır. Ses dalgalarının yayılım özellikleri, bulundukları ortamın fiziksel ve akustik karakteristiklerine bağlıdır. Dolayısıyla, ortamdan farklı özelliklere sahip nesnelerin veya engellerin varlığı, ses dalgalarının yayılım özelliklerinde değişikliklere yol açarak sesin yönünü ve şiddetini etkileyebilir. Örneğin, homojen bir ses dalgası, iki farklı akustik özelliğe sahip ortam arasındaki bir yüzeye dik olarak çarptığında, yüzeyin akustik empedansına bağlı olarak yansıtma ve iletme süreçlerine uğrar. Bu etkileşimlerin mekaniği, Şekil 2.15'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Bir ses dalgasının akustik bariyere çarpma mekanizması (dos Santos, 2024).

Ses dalgalarının çevresel etkileşimiyle dalgaların farklı ortamlarla karşılaşması sonucunda çeşitli fiziksel süreçler meydana gelmektedir. Bu süreçlerden en önemlileri kırılma (refraksiyon) ve kırınım (difraksiyon) olup; sesin yönü, şiddeti ve yayılım

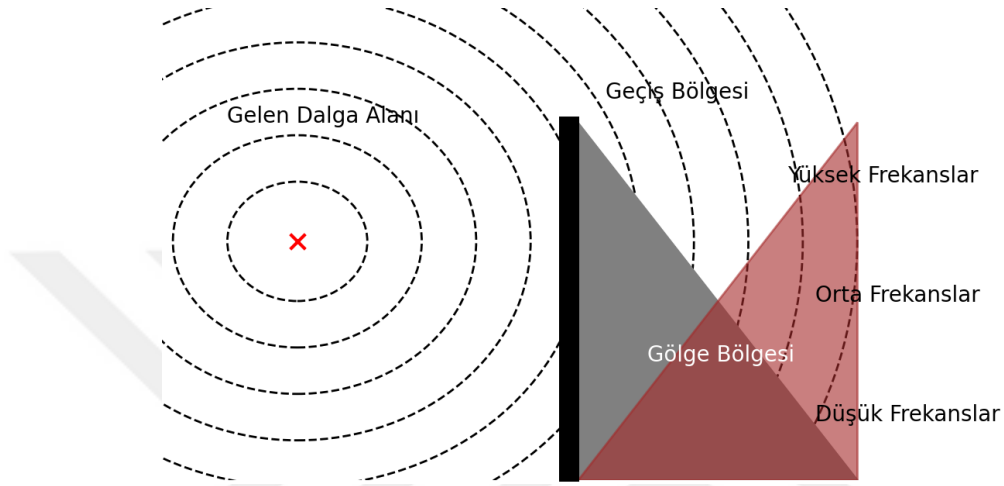
özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Refraksiyon (kırılma), ses dalgalarının farklı yoğunluk ve akustik özelliklere sahip ortamlara geçişi sırasında hızında ve dalga boyunda değişikliklere uğrayarak yeni bir yönelim kazanması olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, özellikle ses dalgalarının havadan katı bir yüzeye veya ses emici bir malzemeye geçişi sırasında gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, sesin yayılımını etkileyen bir diğer önemli mekanizma difraksiyon (kırınım) olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.16). Kırınım, ses dalgalarının bir engelle çarptığında engelin etrafını dolanması veya bir açıklıktan geçerek yayılımını sürdürmesi olgusudur. Bu mekanizma, özellikle ses bariyerlerinin etkinliği açısından büyük bir öneme sahiptir, çünkü belirli frekanslardaki ses dalgaları bariyerin üstünden ya da yanlarından dolanarak alıcıya ulaşabilir. Bu fiziksel süreçlerin anlaşılması, akustik bariyerlerin tasarımında ve ses kontrol stratejilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, ses dalgalarının çevresel etkileşimlerini dikkate alarak optimum gürültü azaltım önlemleri belirlemek gerekmektedir.



Şekil 2.16. Ses dalgalarının akustik bariyer üzerinden kırınımını (FRA, 2005).

Ses dalgaları bir engelle çarptığında, enerji belirli bir oranda dağılır ve yayılım özellikleri değişime uğrar. Engelin varlığında yayılım gösteren dalga ile serbest alan koşullarında yayılan dalga arasındaki farka “saçılan dalga” adı verilmektedir. Bu farklılık, ses enerjisinin bariyer nedeniyle dağılım göstermesine ve alıcı ile kaynak arasındaki mesafenin artmasına neden olmaktadır. Bir akustik bariyerin ses yalıtım performansı, "gölge bölgesi" olarak adlandırılan ve en büyük ses azalmasının

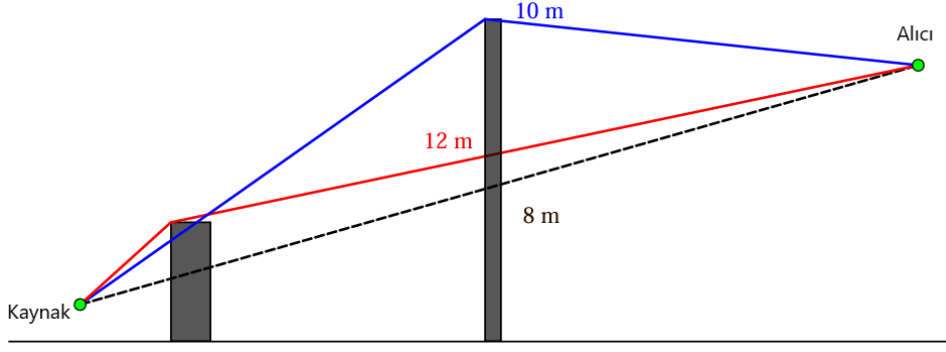
gerçekleştiği alanda ölçülebilir (Şekil 2.17). Bu etki, özellikle bariyer yüksekliği ile dalga boyu arasındaki oran birden büyük olduğunda belirgin hale gelir (Crocker, 2007). Düşük frekanslı sesler daha uzun dalga boyuna sahip olduğundan, bu dalgalar engelleri daha kolay aşarak yayılımını sürdürebilir. Dolayısıyla, akustik bariyerlerin tasarımında, düşük frekanslı seslerin kırınım yoluyla yayılımını minimize edecek önlemler alınması gerekmektedir (Piechowicz, 2011).



Şekil 2.17. Bir bariyerde ses dalgası kırınımı fenomeni (Crocker, 2007).

Akustik bariyerler, genellikle farklı türde malzemelerden üretilen, ses dalgalarının yayılımını engellemek veya yönlendirmek amacıyla belirli konumlara yerleştirilen yapay ve katı elemanlardır. Bununla birlikte, yoğun bitki örtüsü gibi doğal unsurlar da sesin yayılmasını bozarak akustik bariyer işlevi görebilir. Ancak, bu tür doğal bariyerlerin etkinliği, bitki örtüsünün yoğunluğu ve kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır.

Farklı tasarım yaklaşımlarına sahip olmalarına rağmen, akustik bariyerlerin performansını en çok belirleyen faktör bariyerin yüksekliğidir. Şekil 2.18’de ses dalgalarının farklı boylardaki iki bariyerle etkileşimi ve kırınım süreci şematik olarak gösterilmektedir. Şekilde, bariyerlerin farklı yüksekliklere sahip olmasına rağmen, stratejik olarak yerleştirilmiş daha alçak olan bariyerin, ses dalgalarının izlediği yolu uzattığı görülmektedir. Kırınımına uğrayan ses dalgasının yolu (kırmızı çizgi), yüksek bariyer nedeniyle yön değiştiren dalganın izlediği yoldan (mavi çizgi) daha uzundur. Bu durum; akustik bariyerlerin konumlandırılmasının ve yüksekliğinin, ses dalgalarının yayılımı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.18. Gürültü bariyerinin çalışma prensibi (dos Santos, 2024).

2.2.4.2.2. Geleneksel gürültü bariyerleri

Geleneksel akustik bariyerler, özellikle de karayolu trafiğine bağlı gürültüyü azaltmak amacıyla yaygın olarak kullanılan, ses dalgalarının yayılımını engelleyen ve farklı boyutlandırma yöntemleriyle tasarlanan yapısal elemanlardır. Gürültü bariyerleri, farklı akustik ve yapısal özelliklere sahip çeşitli malzemeler kullanılarak inşa edilebilmektedir. Örneğin, Fransa'da uygulanan gürültü bariyerlerinin yaklaşık %60'ı prefabrike beton elemanlardan, %20'si cam ve plastik esaslı malzemelerden, %10'u metal panellerden ve kalan %10'u ise pişirilmiş kil gibi diğer yapı malzemelerinden üretilmektedir. Bu malzemeler arasında en yaygın tercih edilen ise dayanıklılığı ve ses yalıtım kapasitesi nedeniyle prefabrike betondur (Özgen, 2010).

Gürültü bariyerlerinin üretiminde tercih edilen malzeme türü, ses dalgalarının yansıma ve soğurulma karakteristiklerini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Genel olarak, en yaygın akustik bariyer geometrisi, yaklaşık 3 ila 4 metre yüksekliğinde dikey panellerden oluşmakta ve bulunduğu çevresel koşullara bağlı olarak değişken mesafelerde konumlandırılmaktadır. Şekil 2.19'da, demiryolu hatları boyunca yaygın olarak kullanılan geleneksel akustik bariyer örneği gösterilmektedir.

Akustik bariyerler, gürültü seviyelerini azaltarak demiryolu hatları çevresinde yaşayan toplulukların yaşam kalitesini artıran önemli bir çözüm sunmaktadır. Ancak, bu tür yapıların uygulanması, çevre sakinleri tarafından çeşitli nedenlerle tepkiyle karşılanabilmektedir. Özellikle yüksek bariyerler, görüş alanını kısıtlaması, doğal ışık erişimini azaltması ve hava sirkülasyonunu etkilemesi gibi nedenlerle bireylerde kapalı bir alanda yaşama hissi yaratabilmektedir. Bu durum, yalnızca demiryolu hattı çevresindeki yerleşim alanlarını değil, aynı zamanda demiryolu hattında seyahat eden yolcuları da rahatsız edebilmektedir (Crocker, 2007; Maffei ve ark, 2012).



Şekil 2.19. Demiryolu hattına yerleştirilen akustik bariyer (URL1).

Akustik bariyerlerin değerlendirilmesi yalnızca sosyal etkileri ile sınırlı olmayıp, aynı zamanda ekonomik açıdan da ele alınmaktadır. Gürültünün kaynağında azaltılmasını sağlayan önlemler ile sesin yayılımını kontrol eden yöntemlerin entegre uygulanmasının en etkili sonuçları doğurduğu, önceki çalışmalarla ortaya konmuş olup, bu kapsamda akustik bariyerlerin maliyet-fayda analizleri, gürültü izolasyon performansları ve çevresel koşullara uyumu gibi faktörlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Oertli, 2003 yılında yaptığı çalışmasında; optimize edilmiş tekerlek tasarımlarının, ray sönümleyicilerinin, düzenli hat bakımının ve 2 metre yüksekliğindeki akustik bariyerlerin birlikte kullanılmasının, önemli derecede gürültü azaltımı elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, gürültü kontrolü için daha kabul edilebilir ve çevresel etkileri azaltılmış alternatif çözümlerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.2.4.2.3. Düşük yükseklikteki akustik bariyerler

Düşük yükseklikteki akustik bariyerler, geleneksel yüksek bariyerlerin görüş alanını kısıtlaması ve çevresel etkileri nedeniyle alternatif bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Bu tür bariyerler, demiryolu hatlarına çok yakın konumlandırılarak; ray başından yaklaşık 1 metre yüksekliğe kadar çıkarlar. Böylece görüşü engellemeden demiryolu trafiğinin neden olduğu gürültüyü etkin bir şekilde azaltabilmektedirler.

Düşük yükseklikteki akustik bariyerlerin etkinliği ve çeşitli tasarım parametrelerinin performans üzerindeki etkisi gürültü bariyerleriyle ilgili literatürdeki önemli araştırma

konularından biridir. Koussa ve ark, tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada, taş kafeslerden oluşan bariyerlerin akustik performansı değerlendirilmiş ve bu tür bariyerlerin gürültü seviyesinde 8 dBA'ya kadar azalma sağlayabileceği gösterilmiştir. Jolibois, 2013 yılında kentsel alanlardaki hafif raylı sistemlerde kullanılmak üzere geliştirdiği düşük yükseklikteki bir bariyerin geometrik optimizasyonunu gerçekleştirmiş ve Grenoble'da tramvay hattı üzerinde yapılan deneylerde yaklaşık 10 dBA'lık bir gürültü azalması elde etmiştir. Karimi ve Younesian, 2014 yılında demiryolu ortamında kullanılmak üzere “T” ve “Y” şeklinde bariyerler tasarlamış ve bunların belirli açılarla yerleştirilmesi durumunda akustik performanslarının önemli ölçüde iyileştiğini saptamıştır. Çalışmalar, bariyerin eğiminin ve formunun gürültü azaltma düzeyleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Morgan ve ark, 1998 yılında yürüttükleri çalışmada, iç yüzeyi tamamen rijit olan bariyerlerle, iç yüzeyi ses emici malzemeyle kaplanmış bariyerlerin performansını karşılaştırmış ve ses emici yüzeye sahip olanların daha yüksek bir gürültü azaltma performansı sunduğunu belirlemişlerdir. İç yüzeyin ses emici malzemeyle kaplanması, bariyer ile demiryolu aracı arasında sıkışan enerjinin bir kısmını absorbe ederek, tekrar kaynağa yönelen yansımaları minimize etmektedir. Benzer olarak, Belingard ve ark, 2012 yılındaki çalışmalarında, sert yüzeyli bariyerlerin ses emici malzemelerle birleştirilmesiyle, 5 dBA'ya kadar ilave gürültü azaltımı sağlandığını rapor etmişlerdir. Bu bağlamda, düşük yükseklikteki bariyerlerin geliştirilmesi, demiryolu gürültüsünün azaltılmasına yönelik önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.20’de, demiryolu gürültüsünü azaltmak için kullanılan düşük yükseklikteki akustik bariyerlerin çeşitli örnekleri sunulmuştur.



Şekil 2.20. Düşük yükseklikteki akustik bariyer örnekleri (dos Santos,2024).

Düşük yükseklikteki akustik bariyerler, kullanılan malzeme türü, yapısal tasarım, montaj kolaylığı ve akustik performans açısından farklılık göstermektedir. Bazı modeller, ses emici özellikteki taş kafesler (gabiolar) ile üretilmiş olup, hem sesin kaynağa yakın noktada absorbe edilmesini sağlamakta hem de yayaların bariyerin üzerinden geçmesine olanak tanımaktadır. Bariyerlerin işlevselliğini artırmak amacıyla, bazı modeller acil durum tahliyesini kolaylaştıracak şekilde basamak olarak kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarımlar, iç kısmında ses emici kauçuk malzemeler barındırarak, farklı tipteki trenler için değişken gürültü azaltım seviyeleri sunmaktadır. Alternatif olarak, dikey yerleştirilmiş alüminyum paneller içeren yapılar da geliştirilmiş olup, bu sistemler düşük alan kaplama gereksinimi ve kolay montaj avantajı ile öne çıkmaktadır.

Malzeme özellikleri açısından, bazı düşük yükseklikteki akustik bariyerler, iç yüzeyi ses emici bileşenlerle kaplanmış poröz yapıdadır ve geri dönüştürülmüş cam ile agregalar kullanılarak üretilmiştir. Bu tip bariyerlerin belirli mesafelerde konumlandırılması önerilmekte olup, modüler yapıları sayesinde farklı demiryolu hatlarına kolayca entegre edilebilmektedir. Ayrıca, bazı tasarımlarda delikli metal paneller ile ses emici malzemeler birlikte kullanılarak, ses dalgalarının demiryolu hattına yönlendirilmesi sağlanmıştır.

2.2.4.3. Alıcıda gürültü azaltımı

Alıcı seviyesinde uygulanan gürültü azaltım önlemleri, akustik bariyerlerin yetersiz kaldığı veya ekonomik açıdan sürdürülebilir olmadığı durumlarda tercih edilen alternatif çözümler arasında yer almaktadır. Bu önlemler, gürültü kaynağına yakın konumlanan yapıların akustik özelliklerinin iyileştirilmesini içermekte olup, bina cephelerinin ses yalıtım kapasitesinin artırılması, pencerelerin ve kapıların akustik yalıtımlı malzemelerle güçlendirilmesi gibi yöntemleri kapsamaktadır.

Avrupa Çevre Koruma Ajansı (EPA, 2013), tarafından önerildiği üzere, gürültüye karşı alınacak önlemler yalnızca mevcut yapılarla sınırlı kalmamalı, aynı zamanda kentsel planlama süreçlerinde de dikkate alınmalıdır. Özellikle yeni demiryolu hatlarının konumlandırılması ya da mevcut hatlara yakın bölgelerde yeni yerleşim alanlarının inşası öncesinde detaylı akustik değerlendirmeler yapılmalı ve toplumsal etkiler gözetilmelidir (Lee ve ark, 2012; EPA, 2013). Bu bağlamda, konut iç mekanlarının fonksiyonlarına göre düzenlenmesi önerilmekte olup; oturma odası gibi daha yüksek gürültü toleransına sahip alanların demiryoluna yakın konumlandırılması, yatak odası gibi gürültüye daha duyarlı mekanların ise daha korunaklı bölgelere yerleştirilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Bununla birlikte, kentsel planlama sürecinde demiryolu hatlarına bitişik alanlarda, gürültüye karşı daha az hassas olan ticari ve kamusal hizmetlerin konumlandırılması; eğitim kurumları ve sağlık tesisleri gibi gürültüye duyarlı yapıların ise daha korunaklı bölgelerde inşa edilmesi önerilmektedir. Bu tür stratejiler, demiryolu kaynaklı gürültünün olumsuz etkilerini en aza indirerek hem bireysel yaşam kalitesini hem de toplumsal çevresel konforu artırmayı amaçlamaktadır.

3. GERİ DÖNÜŞTÜRÜLEBİLİR TİTREŞİM BARIYERİ PROTOTİPİ: TASARIM, MODELLEME VE ÜRETİM SÜREÇLERİ

Bu bölümde, düşük empedanslı geri dönüştürülebilir titreşim bariyerinin tasarlanma, modellenme ve üretim süreçleri anlatılmaktadır. Bariyerin fiziksel ve mekanik performansını değerlendirmek amacıyla prototip numuneleriyle gerçekleştirilen laboratuvar testleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan sayısal modelleme analizleri bu bölümde sunulmaktadır. Bununla birlikte titreşim bariyerinin prototip üretim süreci detaylı bir şekilde alınmaktadır. Tüm bu aşamalar, düşük empedanslı titreşim bariyerinin mühendislik uygulamalarına uygunluğunu değerlendirmek ve sonraki arazi deneylerine zemin hazırlamak amacıyla sistematik bir şekilde yürütülmüştür.

3.1. Bariyerin Tasarlanması

Bu tez çalışması kapsamında, hem zemin kaynaklı hem de hava kaynaklı titreşimleri azaltmak amacıyla düşük empedanslı bir yalıtım bariyeri üretilmiştir. Yer kaynaklı titreşimleri azaltmak üzere zemine gömülecek bir yalıtım aracının çevre dostu malzemelerden üretilmesi gerektiği bilgisiyle yola çıkılmış; bariyerin yapımında “balsa ağacı” ve “çift dalgalı oluklu mukavva” kullanılmasına karar verilmiştir. Düşük yoğunlukları, lifli yapıları ve geri dönüştürülebilir olmaları, bu malzemeleri ideal seçenekler haline getirmiştir. Bu seçimin ardındaki temel mühendislik prensibi, “dinamik empedans (Z)” kavramıdır. Zemin dinamiği bağlamında empedans, ortamın birim deformasyona karşı gösterdiği direnç olup, özellikle dalga yayılımı sırasında ortamın dalgaya verdiği tepkiyi belirleyen temel bir parametredir. Basitçe, empedans; ortamın kesme dalgası hızı (V_s) ile yoğunluğu (ρ) çarpılarak hesaplanır (Denklem 3.1). Bu formülasyon, dalgaların bir ortamdan diğerine geçerken karşılaştıkları direnç farklarını tanımlamakta kullanılır. İki ortam arasındaki empedans farkı ne kadar büyükse, dalga enerjisinin geçişi o kadar çok yansımaya ve kırınımına uğrar. Bu durum, zeminle temas halinde çalışan mühendislik yapılarında (örneğin temeller, kazıklar, dalga bariyerleri vb.) kritik öneme sahiptir. Mühendislik uygulamalarında, empedans uyumsuzluğu yaratılarak titreşimlerin yönlendirilmesi veya zayıflatılması hedeflenir.

Örneğin, yüksek empedanslı bir duvar, üzerine gelen dalga enerjisinin büyük bölümünü yansıtırken; çok düşük empedanslı bir ortam ise gelen enerjiyi adeta bir boşluk gibi absorbe eder veya yön değiştirerek yayılmasını engeller. Zemin mühendisliği uygulamalarında ise empedans; hem sayısal modelleme hem de tasarım kriterleri açısından önemli bir rol oynamaktadır. Dalga yayılımının doğru modellenmesi ve dalga-malzeme etkileşiminin doğru anlaşılması, ancak empedans kavramının dikkate alınmasıyla mümkün hale gelmektedir. Özellikle zemin kaynaklı titreşimlerin yalıtımı amacıyla tasarlanan sistemlerde, bariyer malzemesinin empedans değeri ile zeminin empedansı arasındaki fark, sistemin başarısını belirleyen başlıca unsurlardan biridir. Düşük empedanslı bir bariyer, zeminden gelen dalgaları tıpkı bir boşluk gibi karşılayarak enerjinin önemli bir kısmını absorbe eder veya yön değiştirerek geçişini engeller.

Teorik olarak, çok yüksek veya çok düşük empedans değerleri sergileyen bariyer modelleri ile yüksek yalıtım performansı elde edilebilir (Massarsch, 2005). Ancak bununla birlikte; çok yüksek empedanslı sert bir duvar, titreşim dalgasının mekaniğini değiştirebilir. Düşük empedans ise, bariyerin karşılaştığı titreşim dalgalarının davranışının, açık bir hendeğe girerken sergiledikleri davranışa benzer olmasını sağlar. Bu yaklaşımla amaçlanan, açık bir hendeğin yani boşluğun empedansına ($Z_0=0$) yakın olacak kadar düşük empedans değerine sahip bir titreşim bariyeri oluşturmak; böylece yer dalgalarının kırılma mekanizmasını değiştirmeden açık hendek ile benzer bir izolasyon performansı elde etmektir. Ayrıca, bariyerin ana iskeleti için kullanılan balsa ağacının yüksek elastisite modülü ve iç takviye sisteminin ortogonal tasarımı; bariyerin, kazı derinliğiyle birlikte yüzeyde artan yanal toprak basıncına dayanmasını sağlamaktadır. Böylece üretilen titreşim bariyeri yumuşak zeminlerde açık hendeklerin neden olabileceği yanal stabilite sorunlarını önlerken, düşük empedansı sayesinde açık hendek ile benzer yalıtım performansı sunacaktır.

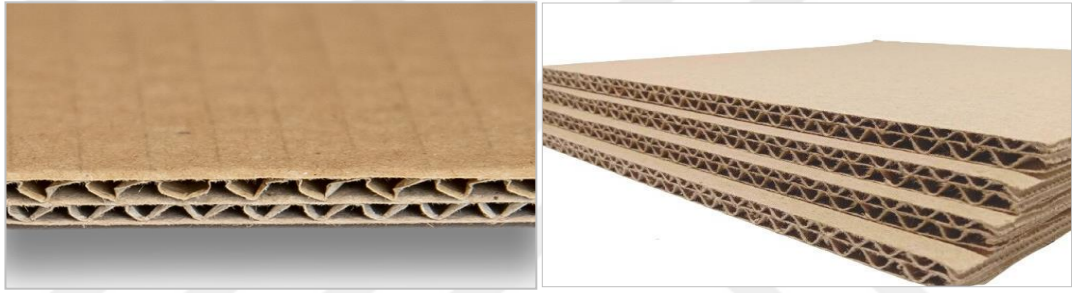
$$Z_n = c_n \rho_n \quad (3.1)$$

$$E_n = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.2)$$

Literatürde “ E_n ” olarak adlandırılan korunan alana iletilen titreşim enerjisinin değerlendirilmesi, bariyerin empedansına dayanmaktadır (Massarsch, 2005). E_n olarak gösterilen enerji iletimi, bariyerin empedansı ve toprağın empedansına dayalı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 3.2).

3.1.1. Oluklu mukavva

Oluklu mukavva, en az üç kağıt tabakasının geometrik bir formda birleştirilmesiyle oluşturulurken, çift dalgalı oluklu mukavva ise beş katmandan oluşur: iç, dış, ara katman ve iki dalgalı katman (Şekil 3.1). Yüksek dayanımları sayesinde ağır yükleri taşıyabilme kapasiteleri bulunmaktadır. Bu özellikleri, oluklu mukavvaları teleskopik kutuların veya büyük hacimli ambalajların üretimi için oldukça kullanışlı hale getirmektedir. Oluklu yapıları, malzemenin dayanıklılığını ve esnekliğini artırdığından; taşımacılık sektöründe ürünlerin darbe titreşimlerinden korunması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, oluklu mukavva geri dönüştürülebilir ve çevre dostu bir ambalaj malzemesidir. Bu tez çalışmasında üretilen titreşim bariyerinin ana malzemesi olarak belirlenen çift dalgalı oluklu mukavvanın birim hacim ağırlığı yaklaşık 0.09 t/m^3 olarak hesaplanmıştır.

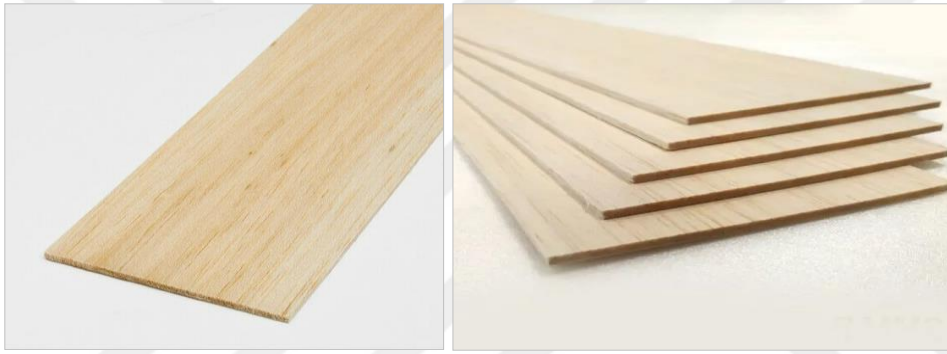


Şekil 3.1. B+C dalga çift oluklu mukavva (URL2, URL3).

Dalga bariyerinin üretiminde kullanılan oluklu mukavva, B+C dalga tipine sahiptir. BC dalga, B ve C dalgalarının birleşimiyle oluşmakta olup, dopel koli olarak adlandırılmaktadır. B tipi dalga yapısına sahip oluklu mukavva, yüzey ezilmelerine karşı yüksek dayanım gösterirken, C tipi dalga yapısına sahip oluklu mukavva ise üstün taşıma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, C tipi oluklu mukavva paneller, ses yalıtım sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Asdrubali, 2015). Dopel kolinin kalınlığı 5,5–6,5 mm aralığında değişmekte olup, içindeki ürüne yastıklama etkisi sağlayarak darbelere karşı koruma sunmaktadır. Yüksek dayanıklılığı ve koruyucu özellikleri nedeniyle, dopel koli ambalaj sektöründe en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Tüm bu özellikleri göz önüne alındığında, BC dalga tipine sahip çift oluklu mukavva; titreşim sönümlleme kapasitesi, akustik izolasyonda kullanılabilirliği ve mekanik mukavemeti sayesinde titreşim bariyerinin birincil malzemesi olarak tercih edilmiştir.

3.1.2. Balsa odunu

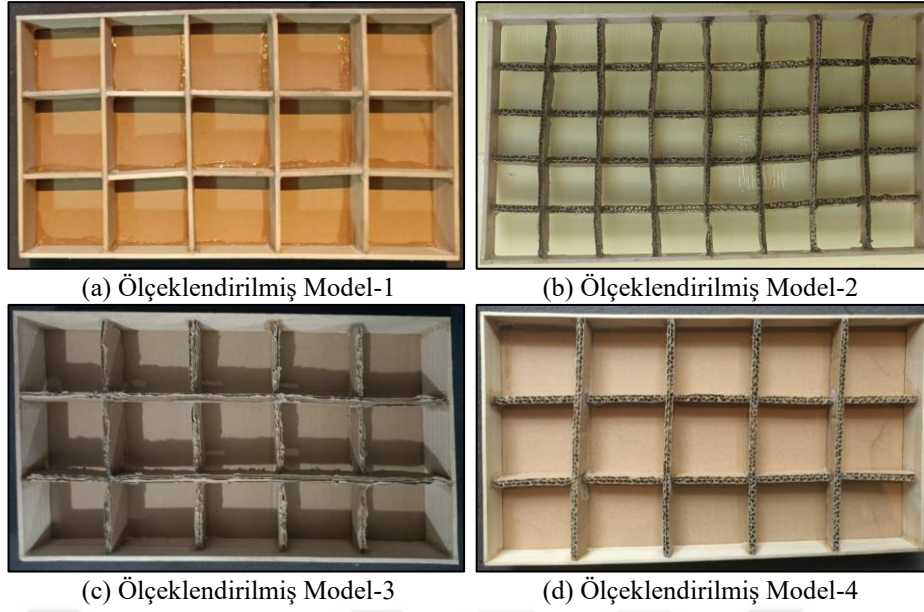
Mimari projelerde ve hobi amaçlı model yapımında yaygın olarak kullanılan balsa ağacı, Güney Amerika'nın yağmur ormanlarına özgü olup tropikal bir bitki türü olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 3.2). Hızlı büyüme özelliğine sahip olan balsa ağacı, düşük yoğunluklu bir yapıya sahiptir; birim hacim ağırlığı 0,04 ile 0,38 t/m³ arasında değişmektedir. Hafif olmasına rağmen yüksek dayanım kapasitesine sahip olan bu malzeme, ses, ısı ve titreşim yalıtımı açısından da oldukça etkilidir. Bu özellikleri nedeniyle sandviç kompozitlerin çekirdek malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, rüzgar türbini kanatları, spor ekipmanları, uçak gövdeleri, tekne kaplamaları ve köprüler gibi birçok alanda uygulama bulmaktadır. Balsa ağacının elastisite modülü ise 2100 ile 6400 MPa arasında değişmektedir (URL4).



Şekil 3.2. Balsa odunu (URL5, URL6).

3.2. Ölçeklendirilmiş Modeller ile Dayanım Testleri

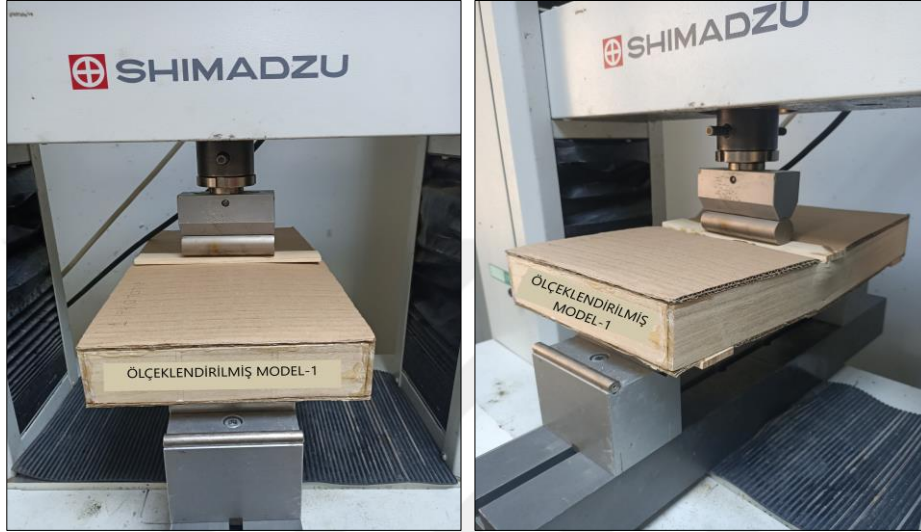
Titreşim sönümleyici kutu bariyerin taşıyıcı çerçevesi, yüksek dayanımından ötürü balsa kullanılarak, gelen dalga titreşimi karşılayacak dış yüzeyler ise çift dalga oluklu mukavva kullanılarak üretilmiştir. Kutu formunda üretilen dalga bariyeri, açık hendek içerisine yerleştirildiğinde yanal toprak basıncını taşıyabilmesi amacıyla, oluklu mukavvadan oluşturulan ortogonal bir iç karkas ile desteklenecek şekilde tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, ortogonal iç ızgara sisteminin optimum tasarımını belirlemek amacıyla; farklı büyüklükte ağ açıklıkları ve farklı malzeme kalınlıklarına sahip bir dizi ölçeklendirilmiş test modeli üretilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Farklı iç ızgara sistemleri.

Tüm ölçekli test modelleri; 20x40 cm ebatlarında olup, yapısal çerçeveleri balsa ağacından üretilmiştir. Ölçeklendirilmiş Model-1’de, hem çerçeve hem de iç karkas 4 mm kalınlığındaki balsa ağacından oluşturulmuş olup, ana çerçevenin kalınlığı 5 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.3a). İç karkasın ızgara açıklıkları, birim hücre boyutu 6.5x7.5 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Ölçeklendirilmiş Model-2’de, ana çerçeve 4 mm kalınlığında balsa ağacından üretilirken, iç karkas çift dalgalı oluklu mukavvadan oluşturulmuştur. Bu modelde ana çerçeve kalınlığı 3 cm olarak belirlenmiş ve iç ızgaranın ağ sıklığı arttırılarak, birim hücre boyutu 3.5x4.5 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. (Şekil 3.3b). Ölçeklendirilmiş Model-3’te ise, ana çerçeve 4 mm kalınlığında balsa ağacından oluşturulmuş ve çerçeve kalınlığı 5 cm olarak korunmuştur (Şekil 3.3c). İç ızgaranın ağ sıklığı Ölçeklendirilmiş Model-1 ile aynı tutularak, birim hücre boyutu 6.5x7.5 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, iç karkas yapısının tamamen balsa ağacından veya tamamen çift dalgalı oluklu mukavvadan inşa edilmesinin bariyerin dayanımına olan etkileri, Ölçeklendirilmiş Model-1 ve Ölçeklendirilmiş Model-3’ün karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Son olarak, Ölçeklendirilmiş Model-4’te, ana çerçeve 3 mm kalınlığında balsa ağacından üretilmiş ve çerçeve kalınlığı 3 cm olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.3d). İç karkasın ızgara açıklıklarının boyutları ise 6.5x7.5 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu aşamada temel amaç, minimum malzeme kullanımıyla düşük empedansı koruyarak; yanal toprak basıncını taşıyabilecek maksimum dayanımı sağlayan tasarımı belirlemek ve bu doğrultuda en verimli bariyer modelini araştırmaktır. Tüm ölçekli modeller 20x40 cm

boyutlarında üretilmiş olup, bu ölçüler kutu bariyeri prototip modülünün yaklaşık 1:20 alansal ölçeğine karşılık gelmektedir. Prototipin üretim aşamasında, iç ızgara aralıkları da belirlenen ölçek faktörüne uygun şekilde düzenlenecektir. Prototiplerin dayanımları; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'nin Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan maksimum kuvvet kapasitesi 50 kN olan çekme-basma test cihazında; üç noktalı kesme deneyleri ile belirlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Üç noktalı eğme testleri ile ölçeklendirilmiş modellerin dayanımının belirlenmesi.

Ölçeklendirilmiş modeller ile yapılan testlerin temel amacı, dalga bariyerinin yerleştirileceği deney sahasında öngörülen yanal zemin basıncına karşı en yüksek dayanımı sağlayabilecek optimum tasarımın belirlenmesidir. Üç noktalı eğme testlerinden elde edilen verilerin karşılaştırmalı analizi Tablo 3.1’de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.1. Üç noktalı eğme testlerinin karşılaştırmalı sonuçları.

Ölçekli Model	Boyut (cm)	İç Izgara Malzeme Tipi	Maks. Kuvvet (N)	Maks. Yer Değiştirme (mm)	Maks. Kayma Gerilmesi (N/mm ²)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
1	20 × 40 × 6.2	Balsa	2414.06	17.59	1.54	179
2	20 × 40 × 4.2	Corrugated Cardboard	501.56	15.50	0.68	130
3	20 × 40 × 6.2	Corrugated Cardboard	940.63	23.13	0.58	134
4	20 × 40 × 4.2	Corrugated Cardboard	698.44	23.99	0.95	123

Ölçekli test modelleri ile yapılan 3 noktalı eğme deneylerinin sonuçları; kutu bariyerin gömüleceği test sahasının yanal toprak basıncı parametresi ile karşılaştırılarak

değerlendirilmiştir. Böylece, dalga bariyerinin yerleştirileceği sahada oluşan toprak itkisinin karşılanması sağlayacak en yüksek dayanımı sunan ve aynı zamanda en düşük empedansa sahip tasarımın belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, deney sahasının zemin özellikleri dikkate alınarak, yanal zemin basıncı hesaplamaları analitik yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Sakarya ili, Pamukova ilçesinde bulunan test sahasında gerçekleştirilen zemin etüdü çalışmaları sonucunda elde edilen mekanik parametreler, yanal toprak basıncı hesaplamalarında kullanılmış olup, bu parametreler Tablo 3.2’de sunulmaktadır. Deney sahasına ilişkin detaylı bilgiler, ilerleyen bölümlerde kapsamlı şekilde ele alınacaktır.

Tablo 3.2. Yanal toprak basıncı hesabında kullanılan zemin parametreleri

ϕ	c (kPa)	K_a	H (m)	γ (kN/m ³)
1	94.3	0.97	1.5	19

Tablo 3.2’de verilen, ϕ ; içsel sürtünme açısını, c; zeminin kohezyon değerini, K_a ; aktif yanal toprak basıncı katsayısını, H; kazı derinliğini, γ ; zeminin birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. Bu parametreler dikkate alınarak, Rankine teorisi çerçevesinde yanal toprak basıncı ve aktif itki aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Çinicioğlu, 2016):

$$\sigma_a = K_a \gamma H - 2c\sqrt{K_a} \quad (3.3)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a} \quad (3.4)$$

Test sahasındaki yeraltı suyu seviyesi dikkate alınarak, kutu bariyerin yüksekliği 1.5 m olarak belirlenmiştir. Bu yükseklik esas alınarak Denklem 3.4 ile yapılan hesaplamalar sonucunda, aktif yanal toprak basıncı değeri $\sigma_a=157.8$ kN/m², kutu bariyere etkileyen aktif itki değeri ise $P_a=257.36$ kN/m olarak tespit edilmiştir. Bu değer 1 m genişlikteki bir duvara etki eden toplam kuvvet değeridir. Bariyerin ölçüleri 1.5x3 m olduğundan; bariyer duvarının maruz kaldığı ortalama gerilme değeri $\sigma_{duvar}=57.2$ kN/m² olarak hesaplanmıştır. Ölçeklendirilmiş modellerin üç noktalı eğme testlerinden elde edilen maksimum kayma gerilme değerleri; hesaplanan σ_{duvar} değerine göre analiz edilmiştir. Bu analiz; Ölçeklendirilmiş Model-4’ün, 950 kN/m²’lik gerilme değeri ile yanal toprak basıncına karşı güvenli bir tasarım sunarken, aynı zamanda en düşük empedansa sahip model olduğunu ortaya konmuştur. Böylece kutu bariyerin iç ızgara tasarımında esas alınacak model olarak Ölçeklendirilmiş Model-4 seçilmiştir. Kutu

bariyerin yanal toprak basıncına karşı performansını değerlendirmek amacıyla yapılan hesaplamalara ilişkin özet bilgiler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Kutu bariyer tasarımına ilişkin gerilme hesaplamaları.

Parametre	Birim	Değer
Bariyer Yüksekliği	m	1.5
Aktif Yanal Toprak Basıncı (σ_a)	kN/m ²	157.8
Aktif İtme Kuvveti (P_a) (1 m genişlikte)	kN/m	257.36
Bariyer Ölçüleri	m	1.5 x 3
Duvar Ortalama Gerilme (σ_{duvar})	kN/m ²	57.2
Model Maksimum Gerilme Dayanımı	kN/m ²	950
Tasarım Kararı	Ölçeklendirilmiş Model-4 esas alınmıştır.	

3.3. İç Izgara Yapısının Dayanımının Değerlendirilmesine Yönelik Sayısal Analiz

Kutu bariyer prototipinin tasarım sürecinde, ölçeklendirilmiş test modellerinin dayanım değerleri üç noktalı eğme testleri ile elde edilmiş ve iç ızgara yapısının dayanımını değerlendirmek amacıyla sayısal analiz süreci başlatılmıştır. Laboratuvar testlerinden elde edilen veriler kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi ile bir model doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Doğrulan model, prototipin iç çerçeve tasarımının ek deneylere gerek kalmadan modifiye edilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, kutu bariyerin dayanımı, mevcut çalışmada kullanılan zeminden daha düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerde veya daha derin kazılarda kullanılmak üzere arttırılabilecektir. Bu doğrultuda, SAP2000 yazılım ortamında gerçekleştirilen sayısal modellemede, kutu bariyerin iç ızgara sistemini temsil eden bileşenler, “Shell Section Layer Definition” paneli kullanılarak Plate tipi kabuk elemanlar şeklinde tanımlanmıştır. Modelleme sürecinde, test sahasındaki zemin özellikleri dikkate alınarak hesaplanan yanal zemin basıncına karşı dayanım sağlayabilen ve aynı zamanda en düşük empedansa sahip olan Ölçeklendirilmiş Model-4’e ait malzeme özellikleri yazılım ortamına aktarılmıştır. Ardından, üç noktalı eğme deneylerine karşılık gelen sınır koşulları ve yükleme senaryoları tanımlanarak model oluşturulmuş, böylece deneysel verilerin sayısal ortamda doğrulanması ve iç yapı tasarımının optimizasyonu sağlanmıştır.

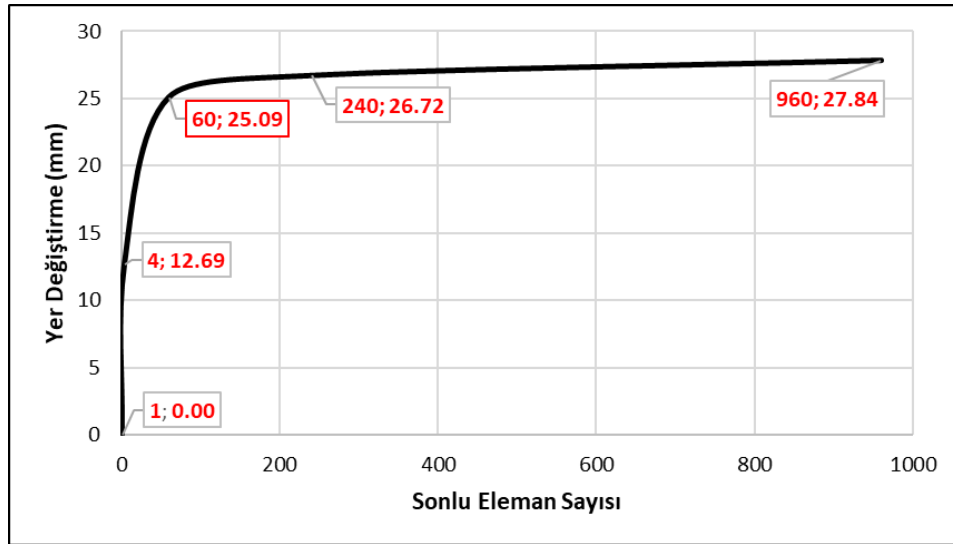
Deneysel çalışmalarda, Ölçeklendirilmiş Model-4’ün taşıyabildiği maksimum kuvvet olan 0.698 kN’lik yük, numunenin üst plakasının merkez noktasına düşey yönde uygulanmıştır. Yük aktarımını optimize etmek amacıyla, plak elemanları için ideal sonlu eleman boyutunu belirlemek üzere ağ yoğunluğu analiz edilmiş ve sonlu eleman sayısı azaldıkça çözümün doğruluktan uzaklaştığı görülmüştür (Tablo 3.4). Bu analiz,

prototipin iç ızgara tasarımının farklı yükleme senaryoları altında optimize edilmesini sağlamakta ve deneysel çalışmaların desteklenmesi açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 3.4. Ağ yoğunluğunun optimizasyonu.

Sonlu Eleman Boyutu		Sonlu Eleman Sayısı	Üst Plak Orta Nokta Yer Değiştirme (mm)
a (mm)	b (mm)		
8.35	10	960	27.84
16.7	20	240	26.72
33.4	40	60	25.09
100.2	200	4	12.69
200.4	400	1	0

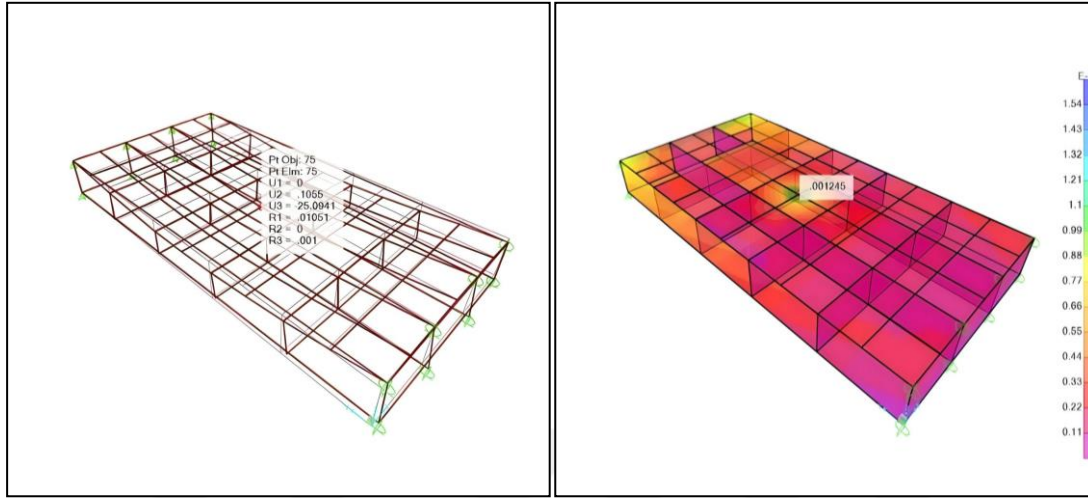
Üç noktalı eğme testleri sonucunda, Ölçeklendirilmiş Model-4'ün maksimum yer değiştirme değeri 23.99 mm olarak belirlenmiştir. Sayısal analizlerde, bu deneysel veriye en yakın sonuç, 40×33.4 mm ağ boyutuna sahip model kullanılarak elde edilmiştir. Bu sonuç, ağ yoğunluğunun model doğruluğu üzerindeki etkisini ortaya koyarak, optimum sonlu eleman boyutunun belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Üst plakanın orta noktasındaki yer değiştirme değerlerinin, sonlu eleman sayısına göre değişimi Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5. Üst plakanın orta noktasındaki yer değiştirme değerlerinin, sonlu eleman sayısına göre değişimi.

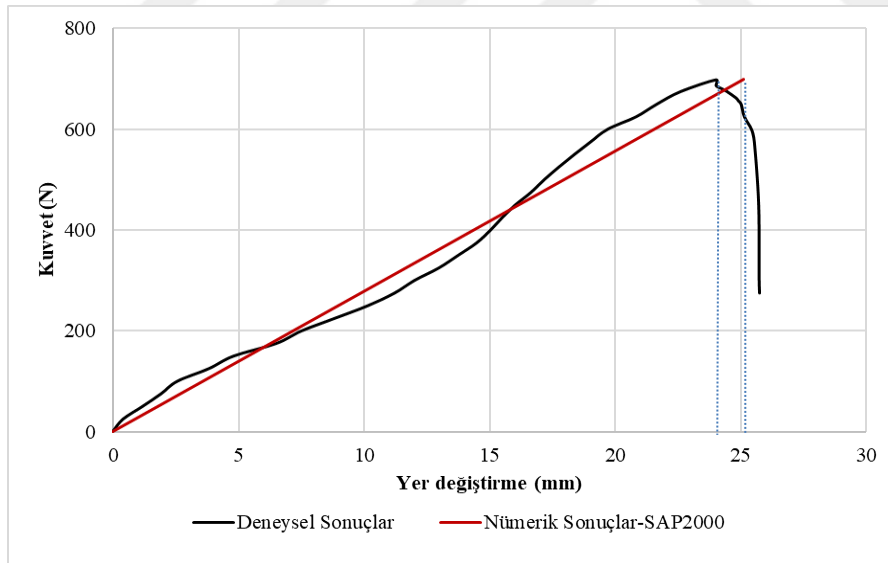
Optimum sonlu eleman sayısının belirlenmesinin ardından, önerilen model üzerinde detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, numunenin üst plakasının orta noktasında meydana gelen maksimum yer değiştirme değeri 25.09 mm olarak

hesaplanmıştır. Ayrıca, modelin mekanik yanıtını değerlendirmek amacıyla yapılan hesaplamalar doğrultusunda, maksimum kayma gerilmesi değeri 0.001245 kN/mm^2 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Ölçeklendirilmiş Model-4'ün SAP2000 yazılımı ile analiz edilmesi.

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır (Şekil 3.7).



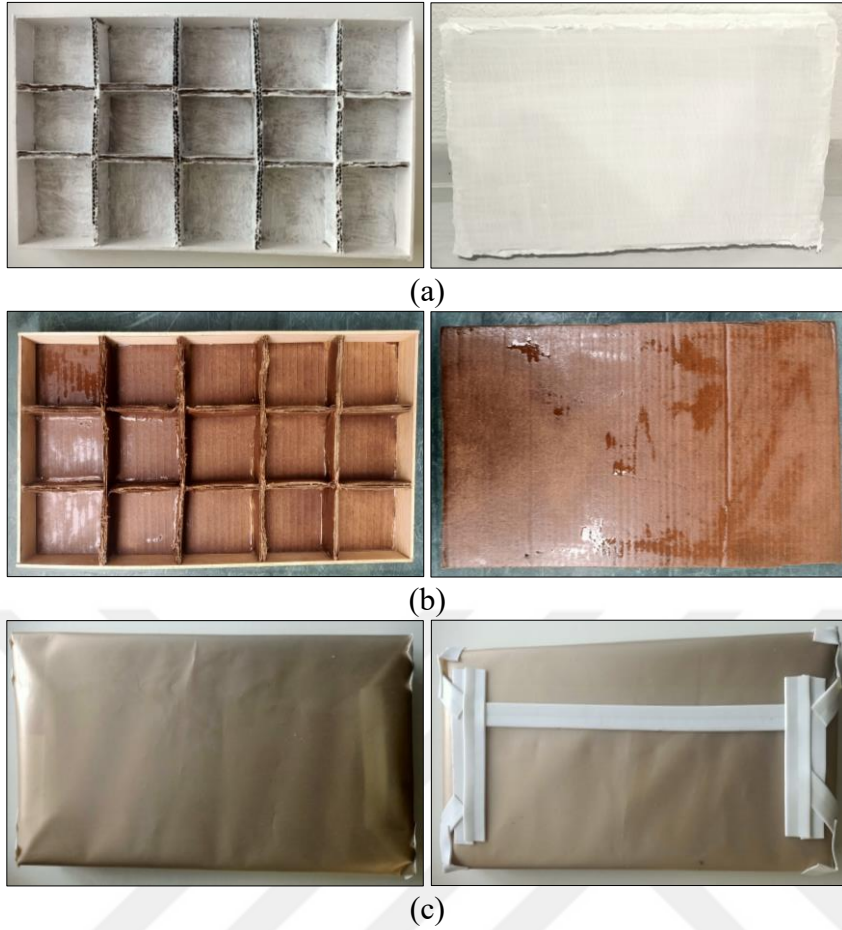
Şekil 3.7. Deneysel sonuçlar ve nümerik sonuçlar ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

Karşılaştırmalı grafikte de sunulduğu üzere; deneysel olarak ölçülen üst plaka orta noktasındaki yer değiştirme değeri 23.99 mm, sayısal modelleme sonucunda ise aynı noktadaki yer değiştirme değeri 25.09 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler arasındaki yakınlık, sonlu elemanlar modeli ile deneysel sonuçlar arasında yaklaşık

%95 oranında bir uyum bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu oranda bir yakınsama, geliştirilen sayısal modelin yeterli doğrulukta sonuç verdiğini ve deneysel verileri temsil etme açısından güvenilir olduğunu göstermektedir.

3.4. Nem Direncinin Değerlendirilmesine Yönelik Su Yalıtım Testleri

Oluklu mukavva ve balsa odunu kullanılarak üretilen kutu bariyer prototipinin zemin kaynaklı titreşimleri azaltmak üzere zemine gömülmesi durumunda; neme karşı direncini değerlendirmek çok önemlidir. Bu bağlamda; bariyerin suya karşı performansını değerlendirmek amacıyla özel olarak üretilen numuneler üzerinde, kontrollü laboratuvar koşullarında, suya daldırma testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler 3 farklı tipteki izolasyon malzemesiyle kaplanıp bir su tankına daldırılmış ve zemine gömüldüklerinde karşılaşılabilecek koşullar simüle edilmiştir. Bu testler aracılığıyla, bariyerin yapısal bütünlüğünü korurken nem sızıntısına dayanabilmesini sağlayacak izolasyon tipinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kutu bariyerin gerçek dünyadaki uygulamalarda uzun vadeli etkinliğini ve dayanıklılığını sağlamak için bu değerlendirme oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, nem izolasyon performanslarını değerlendirmek amacıyla üç farklı prototip numune hazırlanmıştır. Her bir numune, farklı bir yüzey kaplama malzemesi ile hem iç iskeleti hem de dış yüzeyi tamamen kaplanarak, Sakarya Üniversitesi Yapı Malzemeleri ve Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan bir su tankına yerleştirilmiştir. İlk numunede tercih edilen likit membran, uygulandığı yüzeyde bütünleşik bir su yalıtım tabakası oluşturarak nem geçişini engelleyen, elastik yapıda bir kaplamadır (Şekil 3.8-a). İkinci numune ise, camsı bir yapı oluşturan ve yüzey koruyucu özellikleri ile bilinen sıvı cam (sodyum silikat) ile kaplanarak, hem nem hem de kimyasal etkilere karşı dayanım sağlamak üzere tasarlanmıştır (Şekil 3.8-b). Üçüncü numunede kullanılan sera naylonu ise, yüksek esneklik ve su buharı geçirmezlik özellikleri sayesinde yaygın olarak tarımsal koruma amaçlı kullanılan polietilen esaslı bir örtü malzemesidir (Şekil 3.8-c). Kolay uygulanabilmekle birlikte ekonomik olarak ulaşılabilir bir malzemedir.



Şekil 3.8. Su yalıtımı testlerinde kullanılan izolasyon malzemeleri: (a) Likit membran, (b) Sıvı cam. (c) Sera naylonu.

Nem yalıtım performansının nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla, her bir numunenin su tankına yerleştirilmeden önceki ve sonraki ağırlıkları ölçülmüş, bu veriler kullanılarak su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en düşük su emme oranı %22.39 ile likit membran kaplı numunede gözlenmiştir. Bunu %47.16 su emme oranı ile sıvı cam uygulanan numune takip etmiş; en yüksek su emme oranı ise %57.59 ile sera naylonu kaplı numunede ölçülmüştür. Her ne kadar likit membran kaplı numune en düşük su emme oranını göstermiş olsa da, suya daldırma süreci sonunda fiziksel bütünlüğü en fazla bozulan örnek olmuştur. Numunenin yüzeyinde çatlamlar, tabakalarda ayrılmalar ve genel yapısal deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bu durumun olası nedeni, likit membranın esnekliğini zamanla kaybederek sert ve kırılgan bir yapıya dönüşmesi ve böylece malzemenin hacimsel genişleme veya daralma hareketlerine uyum sağlayamamasıdır. Ayrıca, suya daldırma sürecindeki sürekli su teması altında, membranın bazı noktalarda yerinden ayrılması ya da yüzeyden soyulması, koruyucu tabakanın bütünlüğünü zayıflatmıştır (Şekil 3.9). Bu nedenle, düşük su geçirgenliği avantajına rağmen, uzun süreli dayanım ve yapısal

stabilite açısından likit membranın tek başına yeterli bir çözüm sunamayabileceği anlaşılmıştır.



Şekil 3.9. Nem testi sonrası likit membranlı numunede yüzey kırılmaları.

Sıvı cam ise, camsı ve sertleşen yapısına rağmen gözenekli yüzeylerde yeterince derinlemesine nüfuz edememesi nedeniyle orta düzeyde bir koruma sunmuştur. Buna karşın, sera naylonunun dış yüzeyi fiziksel olarak sarmasına rağmen, malzeme ile tam temas sağlayamaması ve yapıştırma hatalarından doğan sızıntı noktalarının varlığı, bu sistemde su emme oranının yüksek çıkmasına neden olmuştur. Su tankından çıkarıldıktan sonra numune detaylı incelendiğinde, sera naylonunun numune yüzeyine tam oturmadığı ve birleşim noktalarında sızıntılara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, yöntemde bir revizyona gidilmiş ve her bir sera naylonu parçası, su sızdırmazlığı sağlayacak şekilde özel su geçirmez bantlarla dikkatlice kaplanmıştır. Bu iyileştirilmiş uygulama ile gerçekleştirilen tekrar deneyinde, sera naylonu kaplı numunenin suya daldırma testi öncesi ağırlığı 610 gram, sonrası ise 632.4 gram olarak ölçülmüş ve bu doğrultuda su emme oranı yalnızca %3.67 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.10). Bu sonuç, sera naylonunun uygun uygulama teknikleriyle desteklendiğinde oldukça etkili bir nem bariyeri oluşturabileceğini göstermiştir. Uygulama hatalarının giderilmesiyle birlikte, hem yüzey koruyuculuğu hem de yapısal bütünlük açısından oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Sera naylonu malzemesiyle tekrarlanan izolasyon testi.

Farklı kaplama malzemeleriyle gerçekleştirilen nem testlerine ait nicel sonuçlar Tablo 3.5’te sunulmuştur.

Tablo 3.5. Nem izolasyonu test sonuçları.

Kaplama Malzemesi	Nem Testi Öncesi Ağırlık (g)	Nem Testi Sonrası Ağırlık (g)	Su Emme Oranı (%)	Yapısal Bütünlük
Likit Membran	268	328	22.39	Ciddi deformasyon, çatlaklar, tabaka ayrılması
Sıvı Cam	176	259	47.16	Orta düzeyde koruma, camsı yapı
Sera Naylonu (Hatalı Uygulama)	349	550	57.59	Yetersiz temas, yapışma hataları, yüksek sızıntı
Sera Naylonu (İyileştirilmiş Uygulama)	610	632	3.67	İyileştirilmiş uygulamada tatmin edici bütünlük

Genel olarak değerlendirildiğinde, üç farklı yüzey kaplama yönteminin nem izolasyonu üzerindeki etkileri hem su emme oranları hem de numunelerin fiziksel bütünlükleri açısından farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Likit membran uygulaması en düşük su emme oranını sağlamış olsa da, numunenin yapısal bütünlüğü ciddi şekilde zarar görmüş ve bu durum, özellikle uzun süreli maruziyet koşullarında kaplamanın elastikiyetini yitirerek çatlamalara neden olabileceğini göstermiştir. Sıvı cam ise orta düzeyde bir su geçirimsizlik sunmakla birlikte, yüzeyde camsı ve sert bir koruma oluşturarak fiziksel bütünlüğü koruma açısından dengeli bir performans sergilemiştir. İlk uygulamada yüksek oranda su emen sera naylonu ise, uygun bantlarla desteklenerek yeniden denendiğinde en başarılı sonuçlardan birini vermiştir. Bu bulgular, sera naylonunun basit uygulama hataları giderildiğinde oldukça etkili, esnek ve ekonomik bir nem bariyeri işlevi görebileceğini göstermektedir. Öte yandan, kaplama malzemesinin sadece geçirimsizliği değil; aynı zamanda malzeme ile etkileşimi, yapışma kapasitesi ve zamanla gösterdiği dayanım da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, saha uygulamalarında tercih edilecek kaplama malzemesi olarak, sera naylonu seçilmiştir.

3.5. Kutu Bariyer Prototiplerinin Üretilmesi

Gerçek saha koşullarını simüle eden deneysel çalışmalar kapsamında, kutu bariyer prototiplerinin üretim süreci başlatılmıştır. Bu üretim süreci, prototiplerin yapısal ve işlevsel gereksinimleri göz önünde bulundurularak; 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada zemin kaynaklı titreşimleri azaltmak amacıyla yer altına gömülerek kullanılacak olan yalıtım bariyerinin prototipi üretilmiştir. İkinci aşamada ise hava kaynaklı titreşimleri azaltmak amacıyla yer üstünde konumlandırılacak olan gürültü

bariyeri prototipi imalatı tamamlanmıştır. Her bir prototipin üretimi yaklaşık 3 haftalık bir süreyi kapsamış olup, bu süreç boyunca malzeme temini, montaj, kaplama uygulamaları gibi işlemler adım adım gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Zemin titreşim bariyeri prototipinin üretilmesi

Zemin titreşim bariyeri prototipi, saha deneylerinin gerçekleştirileceği zemindeki yeraltı su seviyesi dikkate alınarak tasarlanmıştır; 1.5 metre yüksekliğinde ve toplamda 3 metre genişliğinde olacak şekilde; 1 metrelik modüller halinde üretilmiştir. Bu modüler üretim yaklaşımıyla, prototipin sahaya kolaylıkla taşınabilirliği ve yerinde montajının gerçekleştirilebilmesi amaçlanmıştır. Kutu bariyer prototipinin boyutları, daha önce yapılan üç noktalı eğme testlerinde zemin basıncına karşı yeterli dayanım sağladığı ve en düşük empedansa sahip olduğu belirlenen Ölçeklendirilmiş Model-4'ün iç ızgara ve çerçeve tasarımı esas alınarak belirlenmiştir. Boyutlandırma sürecinin tamamlanmasının ardından, prototipin üretim aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle 3 mm kalınlığındaki balsa levhalar 3 cm genişliğinde şeritler hâlinde kesilmiş ve bu parçalar, çift fazlı yapıştırıcı kullanılarak bir araya getirilip taşıyıcı çerçeve oluşturulmuştur (Şekil 3.11).



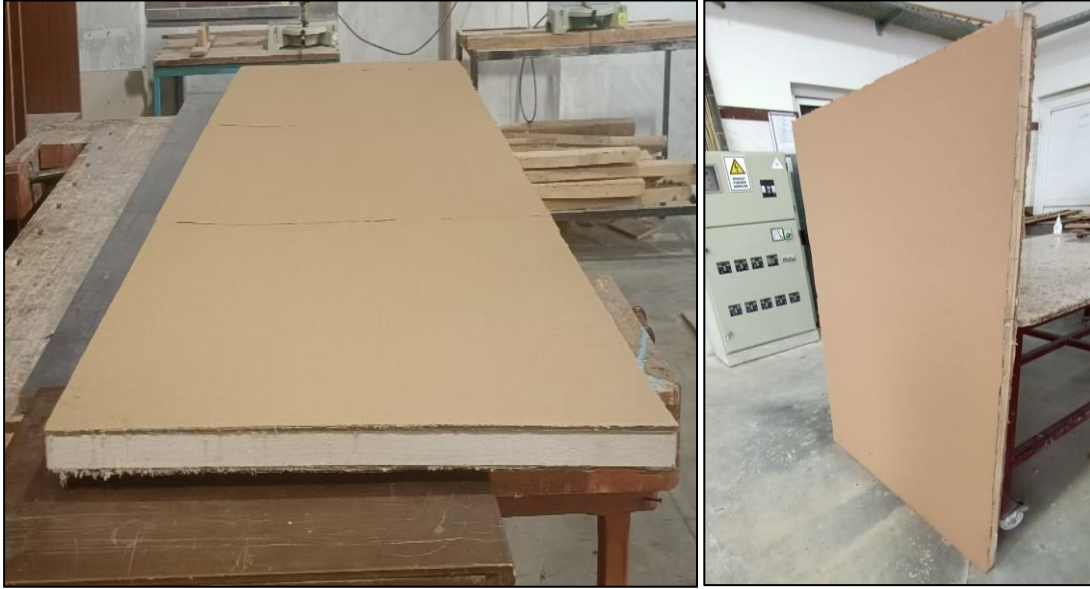
Şekil 3.11. Prototipe ait bir modülün çerçeve sisteminin oluşturulması.

Kutu bariyer prototipine ait bir modülün taşıyıcı çerçevesi, balsa ağacından oluşturulmuş ve ardından çift dalgalı oluklu mukavva yüzeyine sabitlenmiştir. Prototipin yapısal bütünlüğünü ve dayanımını artırmak amacıyla, oluklu mukavva levhalar; iç ızgara sistemini oluşturacak boyutlarda hassas bir şekilde kesilmiştir. Bu parçalar, taşıyıcı çerçeveye ortogonal bir düzenleme ile yapıştırılarak montaj tamamlanmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. İç ızgara sisteminin oluşturulması.

Titreşim sönümleyici yüzeylerin tamamlanabilmesi amacıyla, çift dalgalı oluklu mukavva levhalar 1x1.5 m boyutlarında kesilerek; iç ızgara sistemi yerleştirilmiş olan prototip modülünün dış yüzeyi kapatılacak şekilde sabitlenmiştir. Bu işlemin ardından, prototipin bir modülünün üretimi tamamlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Üretimi tamamlanmış bir prototip modülü.

Kutu bariyer prototipi, yerleştirileceği açık hendekte oluşacak toprak basıncına karşı yeterli dayanım sağlayacak şekilde, kutu geometrisinde tasarlanmıştır. Tüm modüllerin üretiminin tamamlanmasının ardından, bu modüller birbirine sabitlenerek 3 metre genişliğinde ve 1.5 metre yüksekliğinde bütünleşik bir kutu yapı

oluşturulmuştur (Şekil 3.14). Modüllerin birleştirilmesinde çift fazlı yapıştırıcı kullanılmış, bağlantı noktaları ise balsa ağacından üretilmiş köşe takviye elemanları ile desteklenerek yapısal bütünlük güçlendirilmiştir.



Şekil 3.14. Modüllerin birleştirilmesiyle kutu formunda prototipin tamamlanması.

Zemin kaynaklı titreşimlerin sönümlenme performansını değerlendirmek amacıyla gömülerek kullanılacak olan kutu bariyer prototipinin, yeraltı suyu etkisine karşı korunmasını sağlamak üzere su yalıtım süreci başlatılmıştır. Bu kapsamda, prototipin tamamı, önceden gerçekleştirilen nem direnci testleri ile yalıtım performansı doğrulanmış olan sera naylonu yalıtım malzemesiyle kaplanmıştır (Şekil 3.15). Bu uygulama ile, prototipin yeraltı suyu ile doğrudan temas etmesi engellenmiş ve deney süresince yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi için gerekli yalıtım sağlanmıştır.





Şekil 3.15. Kutu bariyer prototipinin suya karşı yalıtılması.

3.5.2. Gürültü bariyeri prototipinin üretilmesi

Gürültü bariyeri prototipi, yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu hava kaynaklı titreşimlerin azaltılmasını araştıran saha deneylerinde kullanılmak üzere üretilmiştir. Bu bariyerin kullanım amacı ve yerleştirileceği koşullar, zemin titreşimi bariyerinden farklı olduğundan, yapısal özellikleri de bu doğrultuda yeniden tasarlanmıştır. Ancak, taşıyıcı sistemin temelini oluşturan çerçeve ve iç ızgara tasarımı, zemin titreşimi bariyerinde kullanılan yapı ile birebir aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Bu kapsamda, 3 mm kalınlığındaki balsa levhalar, 3 cm genişliğinde şeritler hâlinde kesilmiş ve bu parçalar, çift fazlı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş; böylece gürültü bariyeri modüllerinin taşıyıcı çerçevesi oluşturulmuştur. Benzer şekilde oluklu mukavva levhalar; iç ızgara sistemini oluşturacak şekilde kesilmiş ve taşıyıcı çerçeveye ortogonal bir düzenleme ile yapıştırılmıştır (Şekil 3.16). Bu yapısal benzerlik, üretim sürecinde süreklilik sağlarken, taşıyıcı sistemin saha uygulamalarında da yeterli dayanımı sunmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 3.16. Gürültü bariyeri prototipinin taşıyıcı sisteminin oluşturulması.

Zemin titreşimi bariyeri yer altına gömülerek kullanıldığından; test sahasındaki yeraltı su seviyesinin 1.5 m olduğu göz önüne alınarak, prototip 1.5 metre yüksekliğinde üretilmişti. Buna karşılık, gürültü bariyeri yer üstünde konumlandırılacak şekilde tasarlandığı için, yüksek hızlı trenlerin ürettiği gürültüye karşı daha etkili koruma sağlayabilmesi amacıyla 2.5 metre yüksekliğinde imal edilmiştir. 2.5 metre yüksekliğinde ve toplamda 3 metre genişliğinde olacak şekilde; 1 metrelik modüller halinde üretilmiştir (Şekil 3.17).



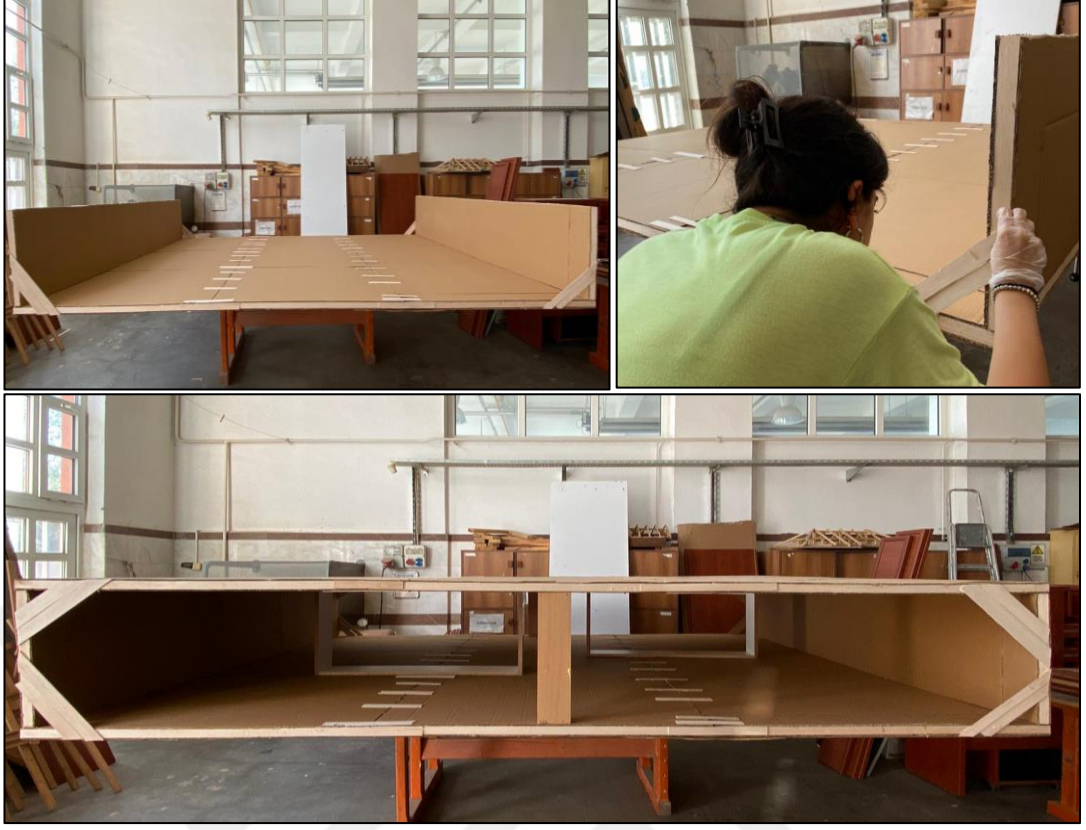
Şekil 3.17. 2.5 m yüksekliğindeki prototip modüllerinin üretilmesi.

Gürültü bariyeri prototipi, zemin titreşimi bariyerinde kullanılan malzemenin tipi ve montaj yöntemleriyle birebir aynı olacak şekilde üretilmiştir. Ancak, gürültü bariyerine ait titreşim karşılayıcı yüzeylerde önemli bir farklılık uygulanmıştır. Gürültü sönümleme performansını artırmak amacıyla, bu yüzeylere iki katman hâlinde çift dalgalı oluklu mukavva yapıştırılmıştır. Bu tercih, oluk sayısının artmasıyla birlikte akustik yalıtım kapasitesinin de artacağı prensibine dayanmaktadır. Bununla beraber çift dalga oluklu mukavvanın iki kat uygulanması, 2.5 m yüksekliğindeki prototipin dayanımını ve durabilitesini arttırmıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Çift dalga oluklu mukavvanın 2 kat uygulanması.

Gürültü bariyeri modülleri de, zemin titreşimi bariyerinde olduğu gibi modüler üretim yaklaşımıyla imal edilmiştir. Bu sayede prototipin sahaya taşınması ve montajı kolaylaştırılmış, aynı zamanda bakım ve yeniden düzenleme süreçleri için de esneklik sağlanmıştır. Tüm modüllerin üretimi tamamlandıktan sonra, bu modüller bir araya getirilerek 3 metre genişliğinde ve 2.5 metre yüksekliğinde bütünleşik bir kutu formu oluşturulmuştur (Şekil 3.19). Modüllerin birleştirilmesinde çift fazlı yapıştırıcı kullanılmış, birleşim bölgeleri ise balsa ağacından imal edilmiş köşe takviye elemanlarıyla desteklenerek yapının bütünlüğü ve dayanımı artırılmıştır.



Şekil 3.19. Kutu formundaki gürültü bariyeri prototipi.

Tasarım ilkeleri ve imalat süreçleri detaylı olarak sunulan zemin titreşimi ve gürültü bariyerlerine ait prototiplerin üretimleri tamamlandıktan sonra; bir sonraki bölümde ele alınacak olan zemin ve hava kaynaklı titreşimlerin azaltılmasını araştıran saha deneylerine geçilmiştir.



4. KUTU BARIYER SİSTEMLERİNİN ZEMİN VE HAVA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİ SÖNÜMLEME ETKİNLİĞİNİN SAHA DENEYLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, kutu bariyer sistemlerinin zemin ve hava kaynaklı titreşimleri sönümleme performansını değerlendirmek amacıyla yürütülen saha deneylerine ilişkin bulgular sunulmuştur. Testlerin yapıldığı arazinin jeofizik ve geoteknik özellikleri ile deneysel çalışmalarda kullanılan titreşim kaynaklarının (yüksek hızlı tren geçişleri ve darbe üretici balyoz) yapısal ve dinamik karakteristikleri detaylandırılmış; ardından saha uygulamalarının gerçekleştirilme süreci ile ölçüm ve analiz yöntemleri açıklanmıştır. Bu bağlamda, prototiplerin farklı titreşim türleri karşısındaki etkinliği ampirik olarak ortaya konmuştur.

4.1. Deney Sahasının Zemin Karakteristiklerinin İncelenmesi

Saha çalışmalarının yürütüldüğü Pamukova/Yenice bölgesi, Sakarya Nehri havzası boyunca uzanan geniş alüvyal bir vadi sisteminin içinde yer almakta olup, zemin özellikleri bakımından oldukça heterojen bir yapıdadır. Çalışma alanı, Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren hattının geçtiği güzergahta konumlanmakta olup; hem demiryolu altyapısı hem de çevresel koşullar açısından zemin titreşimlerinin izlenmesi bakımından uygun bir test sahası özelliği taşımaktadır. Deney arazisinin coğrafi konumunu ve çevresel yerleşimini yansıtan uydu görüntüsü Şekil 4.1’de sunulmaktadır.

Çalışma sahasının dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla iki farklı jeofizik yöntem kullanılmıştır: Sismik Refraksiyon (kırılma) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW). Bu kapsamda, zeminin elastik parametrelerini, litolojik birimlerini ve yeraltı yapısını karakterize etmeye yönelik olarak hem boyuna hem de enine dalga hızlarını ölçen iki ayrı sismik ölçüm yapılmıştır (Şekil 4.2). Bu ölçümler, yaklaşık 30 metrelik derinliğe kadar zemin profilinin belirlenmesini mümkün kılacak şekilde planlanmıştır. Sismik enerji kaynağı olarak 6 kg ağırlığındaki manuel darbe üretici kullanılarak deneysel veriler elde edilmiştir.



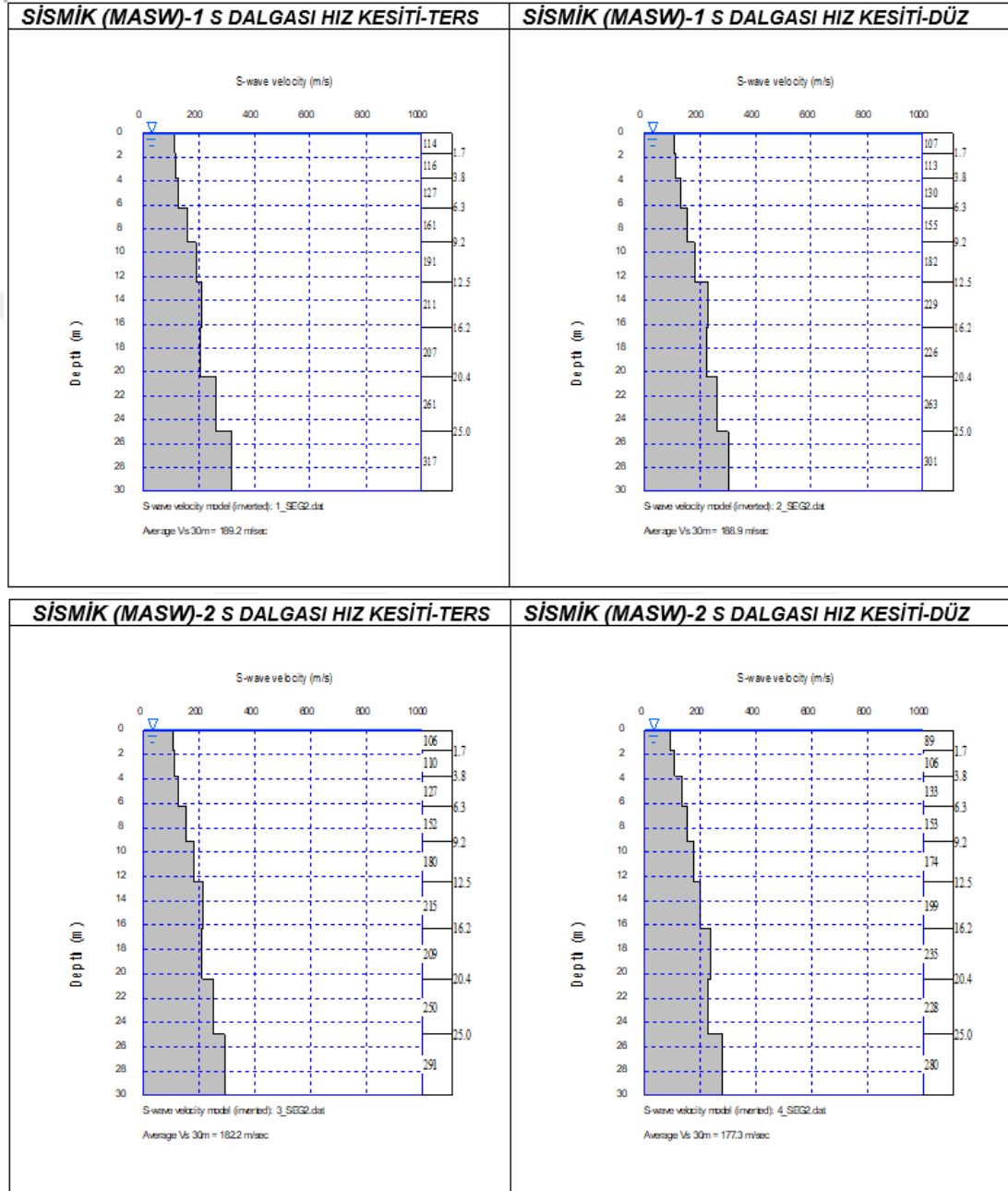
Şekil 4.1. Deney sahasına ait uydu görüntüsü



Şekil 4.2. Test sahasında çok kanallı yüzey dalgası analizi.

Zemin katmanlarına ilişkin yapılan ölçümler sonucunda, test sahasındaki bitkisel toprak örtüsünün kalınlığı ile altında yer alan zemin tabakalarının dalga hızları ve bu tabakalara ait derinlik bilgileri elde edilmiştir. MASW yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde, 60 metrelik bir profil hattı boyunca, 5 metre aralıklarla yerleştirilen sismik sensörler kullanılmıştır. Bu kapsamda, zemin profilinin daha derin seviyelerdeki yapısal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla boyuna dalga hızı (V_p), zemin

birimlerinin yatay yöndeki süreksizlikleri ve mekanik davranışlarının daha ayrıntılı analiz edilebilmesi amacıyla ise kayma dalgası hızı (V_s) ölçülmüştür. Demiryolu hattına paralel ve dik doğrultularda alınan iki farklı serim doğrultusunda, zemine ait kayma dalgası hızlarının derinlikle birlikte değişimini gösteren analiz sonuçları Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Hatta dik ve paralel doğrultular için elde edilmiş S dalgası hız kesiti.

Saha çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen sismik testler sonucunda, P ve S dalgalarının hızları esas alınarak; zemine ait Poisson oranı (μ), elastisite modülü (E), kayma modülü (G), bulk modülü (K_d), yoğunluk (d), zemin taşıma gücü (q_u) ve

emniyet gerilmesi (q_s) gibi çeşitli mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen bu parametreler, literatürde kabul gören sınıflandırma ölçütleri doğrultusunda değerlendirilmiş ve her bir parametreye karşılık gelen zemin sınıfları belirlenmiştir. Sismik veriler aracılığıyla zemin tabakaları için hesaplanan ortalama parametre değerleri ile ilgili sınıflandırmalar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Zeminin dinamik ve elastik parametrelerinin ortalama değerleri.

MAKİNA TİPİ - SARADOREMİ (12 KANALLI)			1.SERİM		2.SERİM		ORTALAMA	
Zemin Parametreleri	Sembol	Birim	I.	II.	I.	II.	I.	II.
Sıkışma Dalgası Hızı	V_p	m/s	331	1918	489	1693	410	1806
Kayma Dalga Hızı	V_s	m/s	128	239	122	226	125	233
30 Metrede Ort. Kayma Dalgası Hızı	$(V_s)_{30}$	m/s	189.1		179.8		187.5	
Ort. Tabaka Kalınlığı	h	m/s	7.39	-	7.28	-	7.34	-
Hız Oranı	V_p/V_s	birimsiz	2.6	8	4	7.5	3.3	7.8
Yoğunluk	d	g/cm ³	2	2.05	1.46	1.99	1.73	2.02
Kayma Modülü	G	kg/cm ²	328	1172	217	1016	272	1094
Elastisite Modülü	E	kg/cm ²	925	3497	637	3029	781	3263
Poisson Oranı	μ	birimsiz	0.412	0.492	0.467	0.491	0.439	0.492
Bulk Modülü	K	kg/cm ²	1754	73907	3197	55641	2475	64774
Zemin H. Titreşim Periyodu	T_0	sn	0.94		0.99		0.97	
Zemin H. Titreşim Aralığı	T_a-T_b		0.63	1.42	0.67	1.49	0.65	1.45
Zemin Taşıma Gücü	q_u	kg/cm ²	2.56	4.9	1.78	4.49	2.17	4.7
Emniyetli Taşıma Gücü	q_a	kg/cm ²	0.85	1.63	0.59	1.5	0.72	1.57
Zemin Emniyet Gerilmesi	q_s	kg/cm ²	0.99	0.61	0.44	0.6	0.72	0.61

Uygulanan sismik testlerin yanı sıra, zemin profilinin jeolojik özelliklerinin doğrudan arazi verilerine dayalı olarak belirlenebilmesi amacıyla ilave bir zemin etüdü çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; sahada bir sondaj kuyusu açılmış, her 1.5 metrede

bir uygulanan Standart Penetrasyon Testi (SPT) ile örselenmiş zemin örnekleri elde edilmiştir. Ayrıca farklı derinlik seviyelerinden, Shelby tüpleri kullanılarak, toplam altı adet örselenmemiş zemin numunesi alınmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Zemin etüdü kapsamında yapılan sondaj çalışması ve UD örnekleri.

Saha deneylerinden elde edilen numuneler üzerinde laboratuvarda gerçekleştirilen testler sonucunda hesaplanan zemin mekaniği parametreleri Tablo 4.2’de raporlanmıştır. Bu verilere dayanarak, çalışma alanı olan Pamukova/Yenice bölgesinde, demiryolu hattının yakın çevresindeki zemin koşullarının, gevşek kıvamlı, siltli kum içeren killi birimlerden oluştuğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan jeofizik ölçümler ile zemin sondajlarına dayalı laboratuvar analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, her iki veri grubunun benzer zemin karakteristiklerini ortaya koyduğu görülmektedir. Özellikle Tablo 4.2’de yer alan Standart Penetrasyon Testi (SPT) değerleri incelendiğinde, Pamukova/Yenice bölgesindeki deney sahasının taşıma kapasitesi düşük, mühendislik açısından zayıf zemin sınıfında değerlendirilebilecek bir yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.2. Zemin etüdü sonucunda elde edilen zemin parametreleri.

Rapor no.:	Elek Analizi				Atterberg			Zemin Sınıfı	Su Oranı	Birim Hacim		Üç Eksenli		
	TS-EN-ISO-17892-12				Limitleri					TS-EN-ISO-14688-1	Ağırlık		TS-EN-ISO-17892-8	
	Çakıl Kum Silt/Kil				LL	PL	PI				TS-EN-ISO-14688-2	2		TS-EN-ISO-17892-9
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	-	-	-	-	

Deney sahasında gerçekleştirilen iki farklı sismik ölçüm profiline (sismik kırılma ve MASW) dayalı analizler sonucunda, yüzeyden itibaren yaklaşık 30 metre derinliğe kadar uzanan iki katmanlı bir zemin yapısı ortaya konmuştur. Elde edilen verilere göre, birinci tabakanın ortalama kalınlığı $h_{1ort}=7.34$ m olarak hesaplanmıştır. Tabakalara ait ortalama sismik hızlar sırasıyla; $V_{p1ort}=410$ m/s ve $V_{s1ort}=125$ m/s, ikinci tabaka için; $V_{p2ort}=1806$ m/s ve $V_{s2ort}=233$ m/s olarak belirlenmiştir. Özellikle birinci tabakada kaydedilen V_s hızlarının 200 m/s'nin altında olması, bu zeminin yatay dinamik yükler altında kayma direncini hızla yitirebileceğini göstermektedir.

Elde edilen kayma dalgası hızlarına dayanarak yapılan sınıflandırmaya göre, birinci zemin tabakası Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan ZE zemin grubuna (Gevşek kum-çakıl ya da yumuşak-katı kil tabakaları), ikinci tabaka ise ZD grubuna (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları) karşılık gelmektedir. Ortalama kayma dalgası hızı (V_s)₃₀ değeri 184.5 m/s olarak ölçülmüş olup, bu değer uyarınca saha ZD zemin sınıfı kapsamında değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, yönetmelikte

belirtilen belirtilen $(V_s)_{30} < 180$ m/s sınır değeri göz önünde bulundurulduğunda, alanın ZE sınıfına da yakın olduğu ifade edilebilir.

Zemine ait kayma modülü değerleri, birinci tabaka için $G_{1ort} = 272$ kg/cm², ikinci tabaka için ise $G_{2ort} = 1094$ kg/cm² olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, birinci tabakanın yatay yükler karşısında oldukça zayıf, ikinci tabakanın ise göreceli olarak daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Elastisite modülü açısından yapılan değerlendirmede, birinci katman için ortalama değer $E_{1ort} = 781$ kg/cm², ikinci katman için ise $E_{2ort} = 3263$ kg/cm² olarak hesaplanmıştır. Bu değerler doğrultusunda, birim doğrultuda uygulanan gerilmenin sebep olduğu deformasyon oranının, birinci tabakada çok zayıf ve ikinci tabakada zayıf özellikte olduğu tespit edilmiştir.

Hesaplanan elastisite modülü ve kayma modülü değerleri birlikte değerlendirildiğinde, birinci tabakanın çok zayıf ve ikinci tabakanın zayıf dayanımlı olduğu saptanmıştır. Sıkışabilirlik açısından yapılan değerlendirmede, ortalama bulk modülü değerleri birinci tabakada az, ikinci tabakada ise yüksek olarak belirlenmiş olup; bu bulgular, birinci tabakanın daha kolay sıkışabilir bir yapıda olduğunu ve inşaat faaliyetleri açısından daha az çevresel etki yaratabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, sismik ölçümlerle elde edilen ortalama Poisson oranı, gözeneklilik sınıflaması açısından değerlendirildiğinde, her iki tabakanın da nispeten gözenekli bir yapıya sahip olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

Özetle; jeofizik ve geoteknik inceleme verilerine göre, deney sahasına ait zemin yapısının genel olarak zayıf dayanımlı, silt ve kum içeriği yüksek kil tabakalarından oluştuğu belirlenmiştir. NEHRP sınıflandırmasına göre bu zemin D grubu kapsamında değerlendirilirken, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) uyarınca ZD zemin sınıfına karşılık gelmektedir. Bu durum, çalışma alanındaki zemin koşullarının mühendislik açısından olumsuz özellikler taşıdığını göstermektedir. Test sahasında yapılan araştırmalarda, alüvyal karakterdeki zemin formasyonuna sahip bölgede beş farklı profilde sismik kırılma ve MASW ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, test sahasındaki demiryolu hattına en yakın noktada yer alan zeminin yaklaşık 7.95 metre derinliğindeki üst tabakasında ortalama kayma dalgası hızı $V_s = 171$ m/s ve elastisite modülü $E = 1234$ kg/cm² olarak hesaplanmıştır.

4.2. YHT Seti ve Raylı Sistem Altyapısına İlişkin Teknik Özellikler

Türkiye'de yüksek hızlı demiryolu projeleri, Avrupa'daki birçok ülkede olduğu gibi, yolcu taşımacılığında saatte 250 kilometreye kadar ulaşan hızları destekleyecek şekilde planlanmış ve yolcu ile yük taşımacılığında öngörülen dingil yükleri 180-225 kN aralığında tasarlanmıştır. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) öncülüğünde 2003 yılında başlatılan yüksek hızlı demiryolu çalışmaları kapsamında, ilk olarak toplam 533 km uzunluğundaki İstanbul-Ankara hattı planlanmıştır. Bu hattın Ankara-Eskişehir arasındaki 245 km'lik bölümü 2009 yılında hizmete açılmıştır. Ayrıca, 2006 yılında inşasına başlanan ve 2011'den bu yana işletmede olan 212 km uzunluğundaki Ankara-Konya hattı, ülkemizin yüksek hızlı tren ağında önemli bir yer tutmaktadır. 2022 yılında tamamlanan 102 km'lik Konya-Karaman hattında da düzenli tren seferleri başlamıştır. Son olarak, 26 Nisan 2023'te hizmete giren 406 km uzunluğundaki Ankara-Sivas yüksek hızlı demiryolu hattı ile Ankara-Sivas arası seyahat süresi yaklaşık 2 saat 50 dakikaya düşürülmüştür. TCDD'nin mevcut planları arasında, yüksek hızlı demiryolu ağının doğuda Erzincan'a, batıda İzmir'e, kuzeybatıda Kapıkule'ye, güneyde Mersin ve Adana'ya ve güneydoğuda Gaziantep'e uzatılması çalışmaları devam etmektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından yolcu taşımacılığında kullanılan iki farklı yüksek hızlı tren seti bulunmaktadır: İspanya menşeli HT65000 serisi ile Almanya üretimi HT80000 serisi. Bu tez kapsamında yürütülen saha deneylerinde, HT65000 tren setine ait titreşim ölçümleri alınmıştır. HT65000 tren setinin teknik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Tren setine ait teknik özellikler.

ÖZELLİK	HT65000
Üretici	CAF (İspanya)
Model	HT65000
Toplam Vagon Sayısı	6+2
Toplam Uzunluk	159 m
Maksimum Hız	250 km/sa
Yolcu Kapasitesi	419
Tahrikli Aks Sayısı	8
Toplam Aks Sayısı	24
Ray Açıklığı	1.435 mm
Aks Yüğü	17 t
Elektrik Sistemi	AC 25 kV/50 Hz
Fren Sistemi	Pnmatik
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-20 °C ila +40 °C
Tren Kontrol Sistemi	ETCS

Şekil 4.5'te gösterilen HT65000 serisi tren setlerinin ön kısmında yer alan çekici birim 27,4 metre uzunluğundadır ve tekerlekler arası mesafe 2,8 metredir. Standart yapıda 6 vagon dan oluşan bu tren seti, toplamda 159 metre uzunluğa ulaşmaktadır. Yolcu yoğunluğuna bağlı olarak tren konfigürasyonuna iki vagon daha eklenebilmektedir. Bu trenler, 36 metre uzunluğundaki UIC-60 tipi raylar üzerinde, ön gerilmeli ve ön çekmeli B70 tipi monoblok beton traverslerle oluşturulan hat yapılarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4.5. HT65000 serisine ait yüksek hızlı tren seti (URL7).

HT65000 serisine ait tren seti; 36 m'lik UIC-60 ray altında ön-germeli, ön-çekmeli monoblok B70 traversler üzerinde hareket etmekte olup demiryolunun hattının mekanik özellikleri Tablo 4.4'te sunulmaktadır.

Tablo 4.4. Demiryolu hattının mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).

Karakteristikler	Semboller	Büyüklik	Birim
2UIC 60-Kesit alanı	A_r	1.54×10^{-2}	m^2
2UIC 60-Atalet momenti	I_z	6.11×10^{-5}	m^4
2UIC 60-Elastisite modülü	E	2.11×10^8	kN/m^2
2UIC 60-Birim hacim ağırlık	γ	78	kN/m^3
Balast-Rijitlik katsayısı	k_b	1.26×10^5	kN/m
Yay söndürücü-Sönüm katsayısı	c_b	1.69×10^2	$kNsn/m$

4.3. Yapay Darbe Üretici Balyoza İlişkin Teknik Özellikler

Kutu bariyeri prototipinin darbe yükünün ürettiği titreşimleri azaltma performansını araştırmak için gerçekleştirilen saha deneylerinde kullanılan balyoz; 5 kg kütleye sahip, çelikten imal edilmiş manuel bir darbe kaynağıdır (Şekil 4.6). Bu tür yapay

darbe üretici balyozlar, kontrollü darbe uygulamaları için yaygın olarak tercih edilmekte olup, zemin yüzeyine uygulanan ani kuvvetle yüzey dalgalarının oluşmasına olanak tanır.

Darbe üretici balyoz, yüksek sertliğe sahip bir çelik plaka üzerine düşey yönde uygulanarak kullanılmış; böylece enerji kaybı olmaksızın doğrudan zemine iletilmesi sağlanmıştır. Uygulanan darbelerin tekrarlanabilir olması, elde edilen verilerin güvenilirliğini artırmış; farklı noktalardaki titreşim sönümleme davranışlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine imkân tanımıştır. Ayrıca, darbenin yönünün sabit tutulması sayesinde, dalga yayılımı kontrollü bir şekilde izlenebilmiş ve bu durum bariyerin performans analizine katkı sağlamıştır.



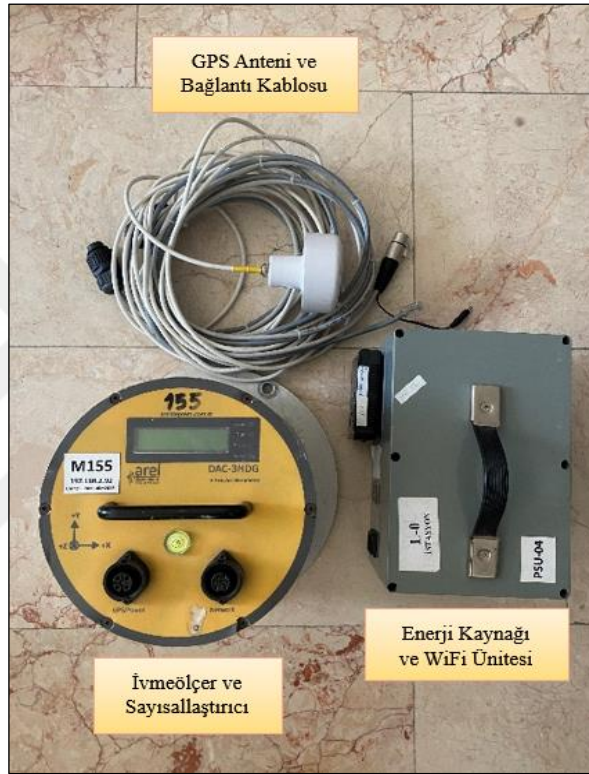
Şekil 4.6. Manuel darbe üretici balyoz.

4.4. Titreşim ve Gürültü Ölçüm Sistemlerinin Teknik Özellikleri

4.4.1. Zemin kaynaklı titreşim ölçüm sistemi ve veri analizi

Saha testlerinde zemin kaynaklı titreşimlerinin ölçülmesi için kullanılan sistem; yüksek hassasiyet ve düşük gürültü seviyeleri sunan AREL markasına ait DAC-3HDG model üç eksenli ivmeölçerlerden oluşmaktadır. Bu cihazlar, düşük genlikli titreşim hareketlerini algılayabilen, kapasitif kuvvet prensibine dayalı mikro işlenmiş sensörlerle donatılmıştır (Şekil 4.7). Kullanılan sistem, üç ana bileşenden meydana gelmektedir: ivmeölçerin ana kontrol ünitesi, güç kaynağı ve GPS modülü. Güç ünitesi, hem ivmeölçerin kontrol kutusuna hem de GPS alıcısına enerji sağlamakta; böylece sistemin tüm bileşenleri eşzamanlı olarak çalışabilmektedir. İvme verileri, kontrol ünitesi tarafından dijital formata dönüştürülerek kayıt altına alınmaktadır. GPS anteni aracılığıyla elde edilen konum ve zaman bilgileri, uydu bağlantısı üzerinden

sisteme entegre edilmekte; bu sayede ölçüm verilerinin coğrafi ve zamansal olarak eşleştirilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca güç kaynağına entegre edilen kablosuz (Wi-Fi) iletişim birimi, ivmeölçer ile veri toplama bilgisayar arasında bağlantı kurarak kullanıcı arayüzü üzerinden gerekli ayarların yapılmasını ve verilerin aktarılmasını kolaylaştırmaktadır. Sistemi oluşturan üç temel birim, saha koşullarında kablolu bağlantılarla bir araya getirilmiş ve entegre hâlde çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. İvmeölçerin üzerinde yer alan dijital ekran, gerçek zamanlı bilgi sağlayarak deneyin anlık durumunu izlemeye olanak tanımaktadır.



Şekil 4.7. Saha testlerinde kullanılan zemin titreşimi ölçüm sistemi.

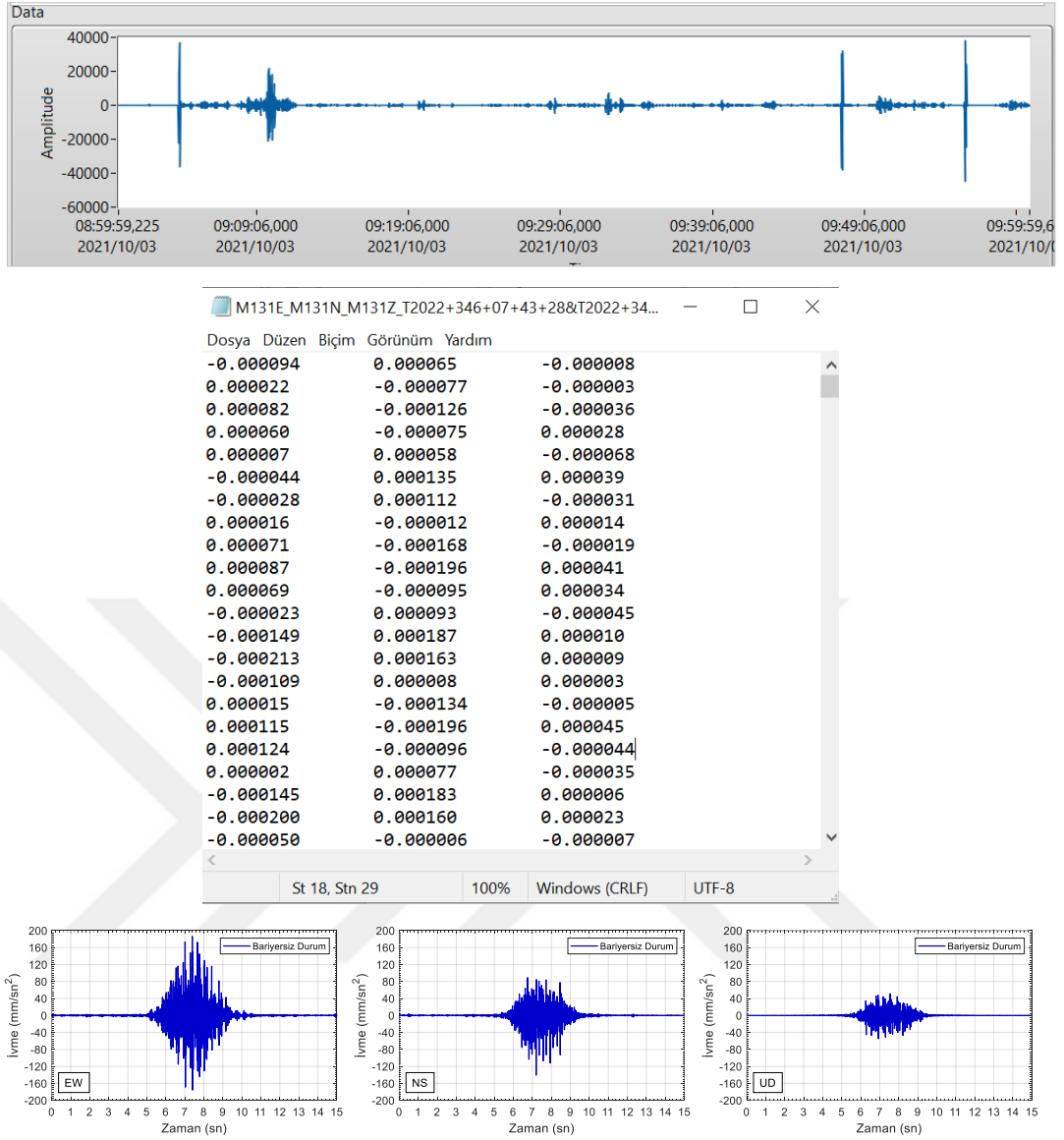
İvmeölçerler ölçüm noktalarına yerleştirildikten sonra, tren geçişlerinden ve yapay darbe üretiminden önce aktif hâle getirilmiş; gün içerisindeki tüm ölçümler tamamlandıktan ve veri kayıt işlemleri bitirildikten sonra sistem kapatılmıştır. Cihazların ölçüm sırasında düzgün çalıştığının teyit edilmesi amacıyla, ilk açılıшта bilgisayar ile bağlantı kurularak sahada canlı veri akışı izlenmiş ve veri alımı doğrulanmıştır. Tren geçişi kaynaklı zemin titreşimlerinin kaydedilebilmesi amacıyla ivmeölçerler, saniyede 200 örnek alacak şekilde ($\Delta t=1/200=0.005$ s) programlanmıştır. Cihazın bağlı olduğu GPS anteni sayesinde, uydu bağlantısı üzerinden her bir ölçüm verisine ait zaman bilgisi sisteme otomatik olarak işlenmiştir. Sistem; yılı 365 günlük takvime bölerek her bir ölçüm dosyasına, gerçekleştirilme

günü ve saatine göre otomatik olarak isim vermektedir. Örnekleme aralığının 0.005 saniye olarak belirlenmesi; ivme verilerinin zaman bilgisiyle eşleştirilerek, analiz yazılımı üzerinde senkronize biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Titreşim ölçüm sistemine ait teknik detaylar Tablo 4.5'te kapsamlı biçimde sunulmuştur.

Tablo 4.5. Zemin titreşimi ölçüm setine ait teknik detaylar.

Donanım	Özellikleri
İvmeölçer	3 Eksen
	a) Capacitive Force Micromachined Sensor
	b) 300/ $\sqrt{\text{Hz}}$ noise
	c) $\pm 2\text{g}$ Full calibration
	d) $\pm 5\text{ V}$ 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

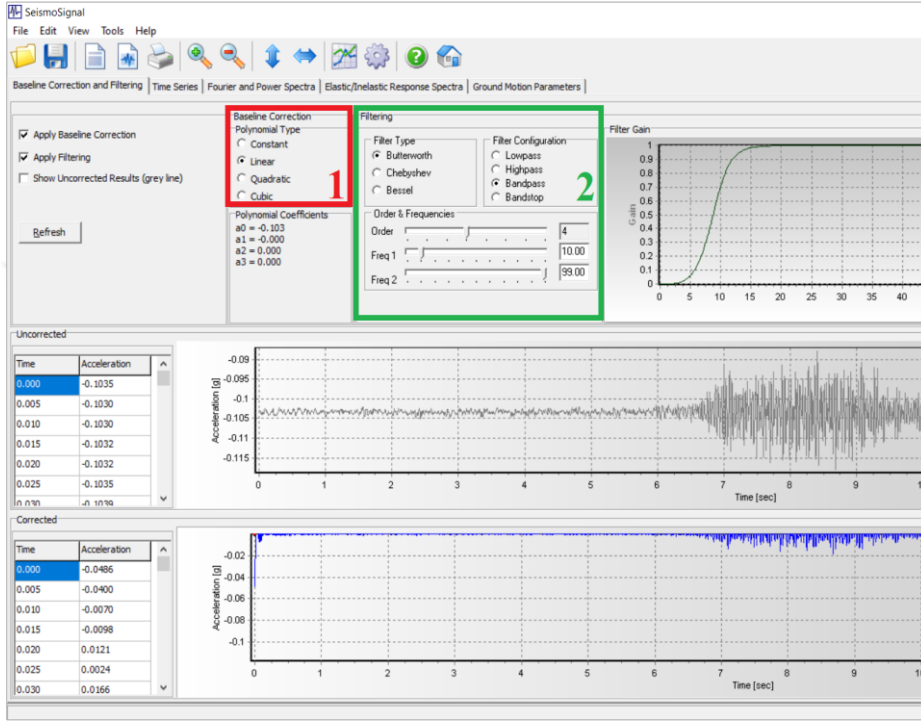
İvmeölçerler aracılığıyla elde edilen titreşim kayıtları, sensörlerin gün boyunca kesintisiz çalışması nedeniyle oldukça uzun veri dizilerinden oluşmaktadır. Her bir zemin kaynaklı titreşim sinyaline ulaşabilmek amacıyla, öncelikle sinyale karşılık gelen zaman aralıkları belirlenmiş ve buna uygun şekilde verilerden ayırıştırma yapılmıştır. Bu ayırıştırma sürecinde, yalnızca tren geçişini değil, aynı zamanda geçiş öncesi ve sonrası dalga oluşumunun gözlenmediği durağan durumları da içerecek biçimde 15 saniyelik veri pencereleri tanımlanmıştır. Tren geçişlerine kıyasla çok daha kısa sürede gerçekleşen yapay darbe uygulamalarında ise, sinyalin etkili yayılım süresi ve sönümlenme davranışı dikkate alınarak, darbe anını ve çevresindeki titreşim yanıtını kapsayacak şekilde 6 saniyelik veri dilimleri kesilerek ayrıştırılmıştır. Kesilen bu sinyal parçalarının her bir sütununda, zaman dilimlerine karşılık gelen 200 adet sayısal ivme ölçümü yer almakta; her sütun ise farklı bir yönde ölçülen ivme bileşenini ifade etmektedir. Şekil 4.8'de ayrıştırma işlemi ve bir tren geçişine ait örnek bir ivme kaydı sunulmuştur.



Şekil 4.8. Veri ayrıklaştırılması ve örnek ivme kaydı.

Ham verilerin ayrıklaştırılma işlemin sonraki olası eksen kaymalarının düzeltilmesi ve gürültü kaynaklı istenmeyen sinyallerin elimine edilmesi amacıyla bir dizi sinyal işleme adımı uygulanmıştır. Bu işlemler, SeismoSignal adlı analiz yazılımı aracılığıyla yapılmış; veriler hem zaman hem de frekans alanında değerlendirilmiştir. İlk aşamada, ivme kayıtları taban çizgisine (Baseline Correction) oturtularak hizalanma işlemi yapılmıştır. Sıfırlanmış sinyal verileri üzerinde gerçekleştirilen Fourier spektrumu analizine göre, titreşim kaynağı olan dinamik yükün baskın frekans bileşenlerinin 10 Hz ile 100 Hz arasında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu analiz sonuçlarına dayanarak, kayıtların hem alt frekans sınırında yer alan düşük enerjili bileşenlerini hem de ani darbe kaynaklı yüksek frekanslı bileşenlerini ayrıklaştırmak amacıyla uygun bant aralığında filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Veri filtreleme sürecinde, 4. dereceden

Butterworth Band geçişli bir filtreleme fonksiyonu tercih edilmiş ve 10–100 Hz frekans aralığında Bandpass filtresi uygulanmıştır. Bu işlem, her bir titreşim kaydı için ayrı ayrı yürütölmüştür. Elde edilen ivme-zaman verilerine sayısal integrasyon yöntemi uygulanmış; hız-zaman ve yerdeğıştirme-zaman eğrileri çizdirilmiştir. Ayrıca, filtrelenmiş ivme verileri üzerinden %5 sönüm oranı esas alınarak tepki spektrumları oluşturulmuştur. (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Titreşim sinyallerinin işlenmesi ve frekans tabanlı filtreleme.

Zemin kaynaklı titreşim verilerinin, “İnsan Sağlığı ve Konforu” ile “Yapısal Hasar” kriterleri açısından değerdendirilebilmesi için maksimum paracak hızı (PPV, mm/s), ortalama karekök hız değeri (V_{RMS} , mm/s) ve hız seviyesi (L_v , dB) parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapısal sistemlerde mikro çatlaklara neden olabilecek düşük genlikli yer hareketlerinin tanımlanmasında, doğrudan yer değıştirme ya da ivme verilerindense paracak hızı verilerinin kullanımı daha yaygındır. Hız-zaman eğrisinde paracak hızının sıfırdan maksimum değeriine ulaştığı anlar, bu bileşenin genlik karakteristiğini tanımlar. Titreşim genliğini ifade etmek için farklı ölçüm yaklaşımları kullanılmakta olup, zaman serisi içerisinde hız değeri, sınır eğrisinin etrafında pozitif ve negatif yönlerde salınım göstermektedir. Maksimum paracak hızı (PPV), bu hız kayıtları boyunca gözlemlenen en yüksek anlık pozitif veya negatif tepe noktası olarak tanımlanmakta; ilgili yönetmelik ve standartlarda da özellikle yapısal hasar

potansiyelinin belirlenmesinde bir kriter olarak değerlendirilmektedir (Denklem 4.1). İnsan vücudunun titreşim etkisine karşı verdiği tepki ise anlık değil, belirli bir gecikme ile ortaya çıktığından, bu tür ani değişimlerin algılanmasında PPV'den ziyade farklı kriterler öne çıkmaktadır.

$$PPV = maks |V_{(t)}| \quad (4.1)$$

Titreşim sinyalinin ortalama değeri sıfıra yaklaşan bir eğilim gösterdiğinden, genliğin karelerinin ortalamasını ifade eden kök ortalama kare (RMS) değeri, titreşim genliğinin daha düzgün ve yumuşatılmış bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. RMS değeri genellikle 1 saniyelik zaman dilimi içerisinde hesaplanır ve ilgili zamana ait genlik düzeyini yansıtır. Ayrıca, V_{RMS} değerine bağlı olarak hesaplanan hız seviyesi (L_v), desibel (dB) cinsinden ifade edilmekte olup, aşağıdaki bağıntı ile elde edilmektedir:

$$L_v = 20 \times \log \left(\frac{V_{RMS}}{V_{ref}} \right) \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'de V_{RMS} , maksimum RMS genliğini ve V_{ref} , referans hız değerini temsil etmektedir. V_{ref} değeri 1×10^{-8} m/s olarak kabul edilmiştir.

4.4.2. Hava kaynaklı titreşim ölçüm sistemi ve veri analizi

Bu çalışmada, hızlı tren geçişlerinden kaynaklanan hava kaynaklı titreşimlerin (gürültünün) ölçümü amacıyla PCE-322A model dijital ses seviyesi ölçer kullanılmıştır (Şekil 4.10). Cihaz; 30 dB ile 130 dB aralığında çalışabilmesi ve 31.5 Hz-8 kHz frekans bandındaki gürültüleri algılayabilmesi nedeniyle çevresel gürültü izleme çalışmaları için uygun bir ölçüm altyapısı sunmaktadır. Cihazın ölçüm aralığı dört kademeye ayrılmış olup kullanıcıya göre ayarlanabilmektedir. Ölçüm öncesinde cihaz kalibrasyonu üretici firma tarafından sağlanan referans ses kaynağı ile yapılmıştır. Mikrofon, ölçüm standartlarına uygun şekilde zeminden 1.5 m yükseklikte konumlandırılmış ve tripod yardımıyla demiryolu hattına doğru yöneltilmiştir. Bu düzenleme ile doğrudan gelen ses dalgalarının en sağlıklı şekilde algılanması ve çevresel yansılardan minimum düzeyde etkilenilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.10. Gürültü ölçümlerinde kullanılan ses seviyesi ölçer.

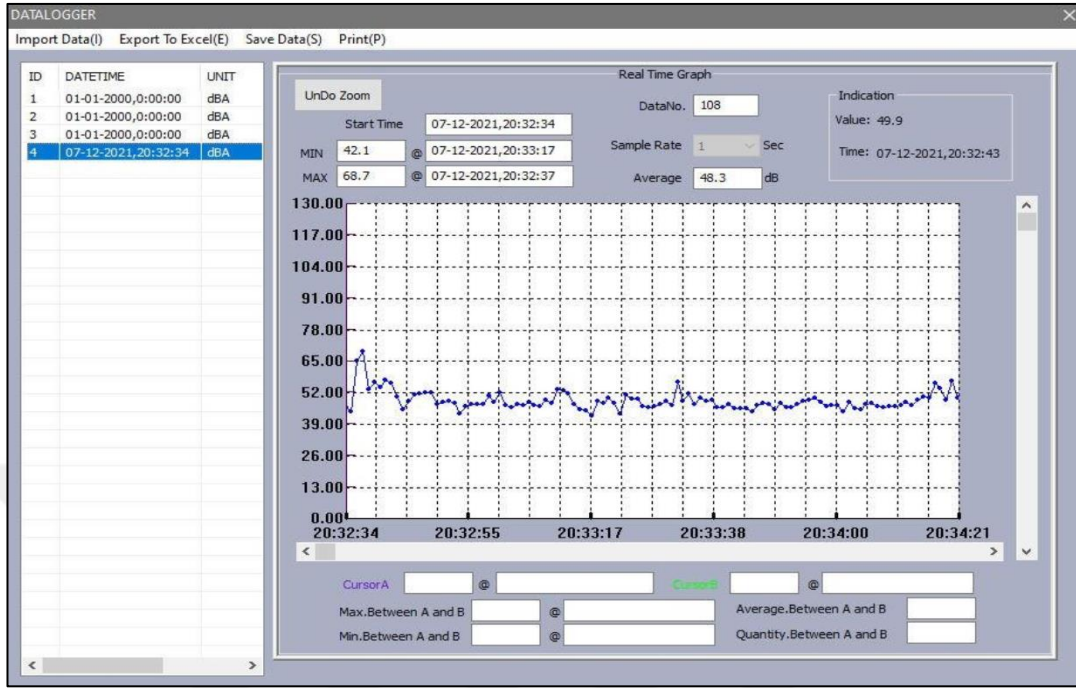
Arazi testlerinde kutu bariyeri prototipinin gürültü azaltma performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan ses seviyesi ölçer cihazına ait teknik detaylar Tablo 4.6’da sunulmaktadır. Bununla birlikte, ölçüm süresince ortam koşullarının uygunluğunu değerlendirmek amacıyla Cem DT-318B Termo-Anemometre cihaz ile rüzgâr hızı ve hava sıcaklığı da gözlemlenmiştir.

Tablo 4.6. Ses Seviyesi Ölçer cihazına ait teknik detaylar.

Teknik Özellik	Değer	Birim
Gürültü Seviyesi Aralığı	30-130	dB
Dinamik Aralık	50	dB
Frekans Aralığı	31.5 - 8	kHz
Çözünürlük	0.1	dB
Hassasiyet	± 1.4	dB
Ekran Türü	4 basamaklı LCD	-
Ekran Güncelleme Hızı	2	kez/sn
Hafıza Kapasitesi	3270	veri

Her bir hızlı tren geçişi boyunca, cihaz ses basıncı düzeyini kaydetmiş ve geçiş tamamlandıktan sonra ölçümler sonlandırılmıştır. USB bağlantı kablosu ile elde edilen

veriler dizüstü bilgisayara aktarılmış, beraberinde verilen yazılım arayüzü aracılığıyla veriler grafiksel ve sayısal formatta analiz edilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. PCE-322A ses seviyesi ölçer cihazına ait yazılım arayüzü.

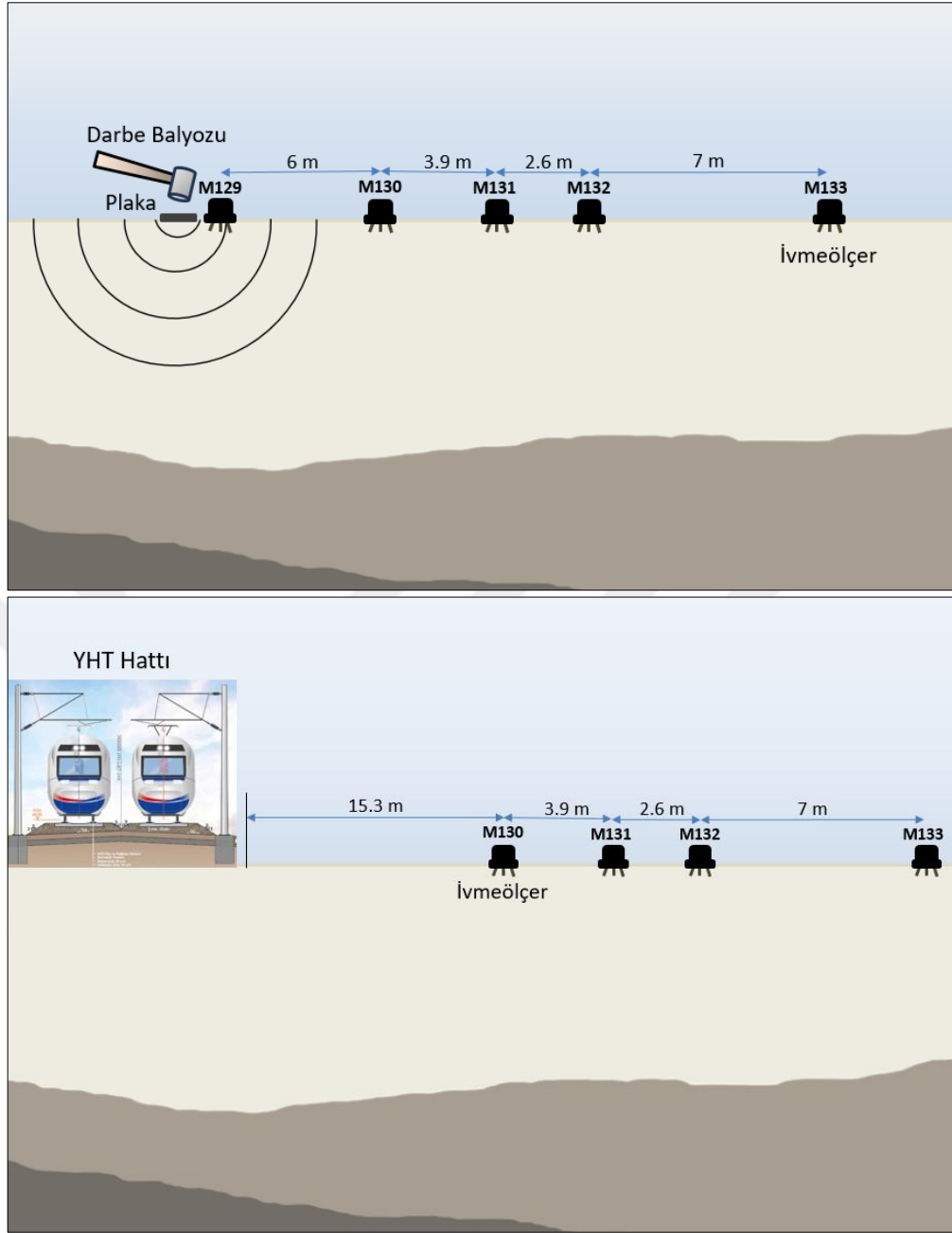
Bu yazılım arayüzü, cihazla toplanan ses basıncı düzeyi verilerinin bilgisayar ortamında görselleştirilmesini ve sayısal analizinin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Gerçek zamanlı veri akışı sayesinde maksimum, minimum ve ortalama ses seviyeleri zamana bağlı olarak grafiksel biçimde izlenebilmiştir. Bu arayüz aracılığıyla ölçüm verileri Excel formatında dışa aktarılabilmiş ve deney sonrası analizler için uygun veri altyapısı sağlanmıştır. Böylece, gürültü düzeylerinin zamanla değişimi ve maksimum gürültü değerleri analiz edilerek; yalıtım bariyerinin hava kaynaklı titreşimlere karşı sunduğu performans değerlendirilmiştir.

4.5. Ölçüm Ekipmanlarının Yerleşim Düzeni

4.5.1. Zemin titreşim ölçüm cihazlarının yerleşimi

Titreşim yalıtım bariyerinin zemin kaynaklı titreşimleri azaltma performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen saha testlerinde, pasif yalıtım yaklaşımı esas alınarak bariyerin ve ivmeölçerlerin konumlandırılacağı noktalar belirlenmiştir. Uygulanan pasif yalıtım yaklaşımının deney sahasında teorik olarak işlevsel olabilmesi için, yalıtım bariyerinin dinamik yük kaynağı ile korunması hedeflenen yapı arasında optimum uzaklıkta konumlandırılması gereklidir. Literatürde, Rayleigh

dalga boyunun (λ) en fazla 1.5 ila 2 katı uzaklıkta olacak şekilde dalga kaynağına yakın konumlandırılan dalga bariyerleri, 'aktif yalıtım' sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tür sistemlerin dalga enerjisini sönümleme kapasitesi, pasif yalıtım modellerine kıyasla dalga türüne ve yayılım mekanizmasına göre farklılık gösterebilir. Aktif yalıtım bölgesinde özellikle basınç dalgalarının baskın karakterde olduğu ve bu dalgaların sönümlenmesinde aktif yalıtım bariyerlerinin daha etkili olduğu bilinmektedir. Buna karşın, pasif yalıtım uygulamalarında, Rayleigh dalgalarının yayılma davranışına olanak sağlayacak yeterli mesafenin korunması gerekmektedir. Pasif yalıtım sistemlerinin etkinliği üzerine yapılan çalışmalar, özellikle küçük ölçekli titreşim kaynakları için bariyerin, kaynaktan en az bir Rayleigh dalgası boyu uzaklıkta konumlandırılmasının gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, deney sahasında uygulanacak yalıtım sisteminin konumlandırılması sırasında, zeminin dinamik özellikleri ve titreşim kaynağının baskın frekans bileşenleri (20-50 Hz) dikkate alınarak yapılan ön tahminlere göre Rayleigh dalga boyu $\lambda=4-6$ m aralığında öngörülmüştür. Bariyerin yerleşimi, bu dalga boyunun en az üç katı uzaklığa, yani demiryolu hattından yaklaşık 12-18 metre uzağa olacak şekilde planlanmıştır. İlk olarak; bariyer yerleştirilmeden önce, hem yapay darbe uygulaması hem de yüksek hızlı tren geçişi sırasındaki serbest zemin yüzeyindeki titreşim davranışları, mevcut saha koşullarında ölçülmüştür (Şekil 4.12). İvmeölçerler; titreşim dalgalarının yayılım yönleri ve bariyerin gömüleceği nokta dikkate alınarak tren hattına dik bir şekilde sıralanmış ve çok eksenli değerlendirme yapılabilecek şekilde düzenleme yapılmıştır. Bu ölçümler, kutu bariyer prototipinin sahaya yerleştirilmeden önceki referans zemin titreşim düzeylerinin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Böylece bariyerin titreşim sönümleme performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek için bariyersiz durumdaki titreşim verileri kaydedilmiş ve ilerleyen başlıklarda sunulacak analizlere temel oluşturmuştur.

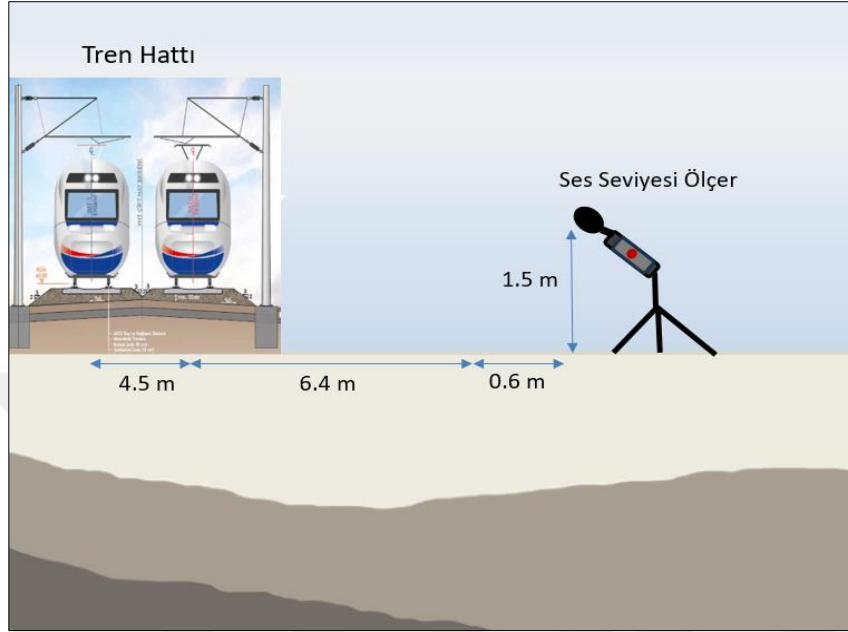


Şekil 4.12. Bariyersiz durumlardaki test sahasının görünümü ve ivmeölçer yerleşimi.

4.5.2. Gürültü ölçüm cihazlarının yerleşimi

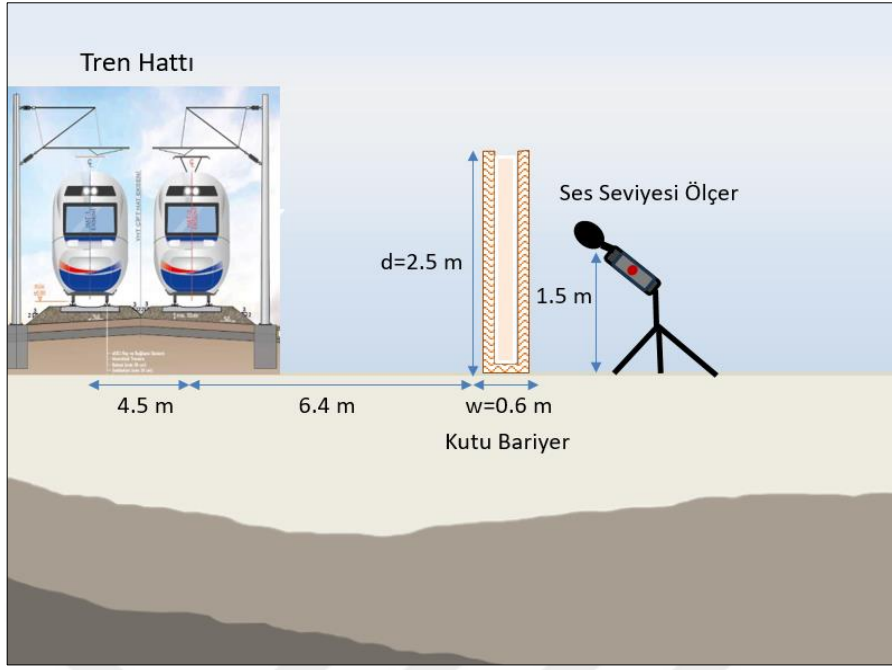
Kutu bariyeri prototipinin akustik yalıtım performansının araştırıldığı saha testlerinde, çevresel gürültü seviyelerinin doğru bir şekilde ölçülebilmesi amacıyla, ses seviyesi ölçer cihazı belirli standartlara uygun olarak konumlandırılmıştır. Bu bağlamda, mikrofönlar yerden 1.5 metre yükseklikte, yansıtıcı yüzeylerden ve engellerden uzak olacak şekilde, tripodlar üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.13). Bu yerleşim, Federal Highway Administration tarafından “Noise Measurement Field Guide”da da önerildiği üzere, hem insan kulağının ortalama yüksekliğini temsil etmekte hem de ölçümlerde

yansıma kaynaklı hataları en aza indirmektedir (FHWA). Ayrıca, ölçüm süresince mikrofonların rüzgâr etkilerinden korunması için uygun rüzgâr koruyucuları kullanılmıştır. Bu düzenlemeler, ölçüm verilerinin güvenilirliğini artırmakta ve çevresel faktörlerin etkisini minimize etmektedir.



Şekil 4.13. Ses seviyesi ölçerin bariyersiz test sahasındaki konumlandırılması.

Kutu bariyerin, hızlı tren geçişlerinin ürettiği hava kaynaklı titreşimleri sönümleme etkinliğini değerlendirebilmek amacıyla; ilk önce bariyersiz durumda gürültü ölçümleri alınmış ve daha sonra ölçümler bariyerli durumda gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ses seviyesi ölçer cihazı, kutu bariyerin hemen arkasında ve bariyer merkez hattına dik doğrultuda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Mikrofon, sesin yansıma ve kırınım etkilerinden etkilenmemesi için yerden 1.5 metre yükseklikte bir tripod üzerine yerleştirilmiştir. Kutu bariyerin tren hattına olan uzaklığı 6.4 metre, genişliği 0.6 metre ve yüksekliği 2.5 metre olarak belirlenmiş olup, ses seviyesi ölçer ile bariyer arasındaki doğrusal mesafe minimize edilerek ölçümlerin doğrudan bariyerin arkasındaki gölgelenme bölgesinde alınması sağlanmıştır (Şekil 4.14). Bariyerin akustik sönümleme performansı sonraki başlıklarda anlatılacaktır.



Şekil 4.14. Ses seviyesi ölçerin bariyerin arkasında konumlandırılması.

4.6. Kutu Bariyerin Test Sahasına Yerleştirilmesi

Arazi deneyleri kapsamında serbest zemin titreşimleri ölçümleri alındıktan sonra, kutu bariyerin sahaya yerleştirilmesi sürecine geçilmiştir. Literatürden bilindiği üzere; hendek tipi dalga bariyeri uygulamalarında, kazı derinliğinin yaklaşık 0.2λ oranına ulaşması durumunda titreşim genliğinde %20'ye varan bir azalma sağlanmaktadır (Dolling, 1970). Bu bilgiye ve test sahasındaki yeraltı su seviyesine dayanarak, kutu bariyerinin yüksekliği 1.5 metre olacak şekilde üretilmiştir. Bariyerin geometrisine uyumlu olacak şekilde; sahada 3 m uzunluğunda, 0.6 m genişliğinde ve 1.5 m derinliğinde bir hendek kazılmış; kutu bariyer prototipi açılan hendeğe yerleştirilmiştir. Kutu bariyerin hendeğe yerleştirilmesi sırasında, bariyer ile hendeğin zemin ve yan yüzeyleri arasında boşluk kalmamasına özen gösterilmiş; böylece zeminle bariyer arasında tam temas sağlanarak yapısal stabilitesi korunmuştur. Bununla birlikte zemin dalgalarının yayılımını değiştirebilecek herhangi bir düzensizlik önlenmiştir. Kutu bariyer prototipinin hendeğe yerleştirilmesi süreci Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Kutu bariyer prototipinin hendeğe yerleştirilmesi.

Kutu bariyer prototipinin zemin kaynaklı titreşimleri sönümleme performansı, dört farklı senaryo ile değerlendirilmiştir: Bariyersiz Durum, Boş Hendeğe, Kutu Bariyerli Hendeğe ve Strafor Dolgulu Kutu Bariyer. Hem yapay darbe uygulamasıyla oluşturulan titreşimler, hem de yüksek hızlı tren geçişlerinin ürettiği titreşimler bu 4 senaryo için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu 4 senaryoyu temsil eden saha durumlarına ait görseller Şekil 4.16’da sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.16. Zemin titreşim ölçümlerindeki saha durumları: (a) Bariyersiz durum, (b) Boş hendek, (c) Kutu bariyerli hendek, (d) Strafor dolgulu kutu bariyer.

Strafor Dolgulu Kutu Bariyer ile yapılan saha deneylerinde, kutu bariyerin iç hacmi düşük empedanslı atık malzemeye doldurularak; bu tür dolguların bariyerin titreşim yalıtım performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, yoğunluğu $0.01\text{--}0.03\text{ t/m}^3$ arasında değişen atık polistiren köpük (strafor) kullanılmıştır (Şekil 4.16-d). Strafor malzemeler, bir kartonpiyer üretim tesisinden temin edilmiş; her biri yaklaşık 2 kg ağırlığında, 42 cm çapında ve 2 m uzunluğunda rulo formundadır. Bariyerin içerisine düzgün biçimde yerleştirilen bu rulolar, iç dolgu etkisiyle bariyerin yapısal deformasyon riskini de azaltmıştır.

4.7. Deney Sahasında Gerçekleştirilen Ölçümler

4.7.1. Zemin kaynaklı titreşim ölçümleri

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında üretilen kutu bariyerin zemin kaynaklı titreşimleri yalıtma performansını incelemek amacıyla gerçekleştirilen saha testlerine ilişkin bulgular sunulmaktadır. Ölçümler, yapay darbe uygulanarak yapılan kontrollü testlerle başlamış, ardından yüksek hızlı trenlerin geçişleri sırasında üretilen zemin titreşim ölçümleriyle devam etmiştir. Her iki ölçümde de; yalıtım bariyerinin bulunduğu durumda elde edilen veriler, serbest zemin yüzeyindeki titreşim davranışlarıyla karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen tüm deney türlerine, bariyer konfigürasyonlarına ve kullanılan ölçüm ekipmanlarına ait bilgiler Tablo 4.7’de deney matrisi şeklinde özetlenmiştir.

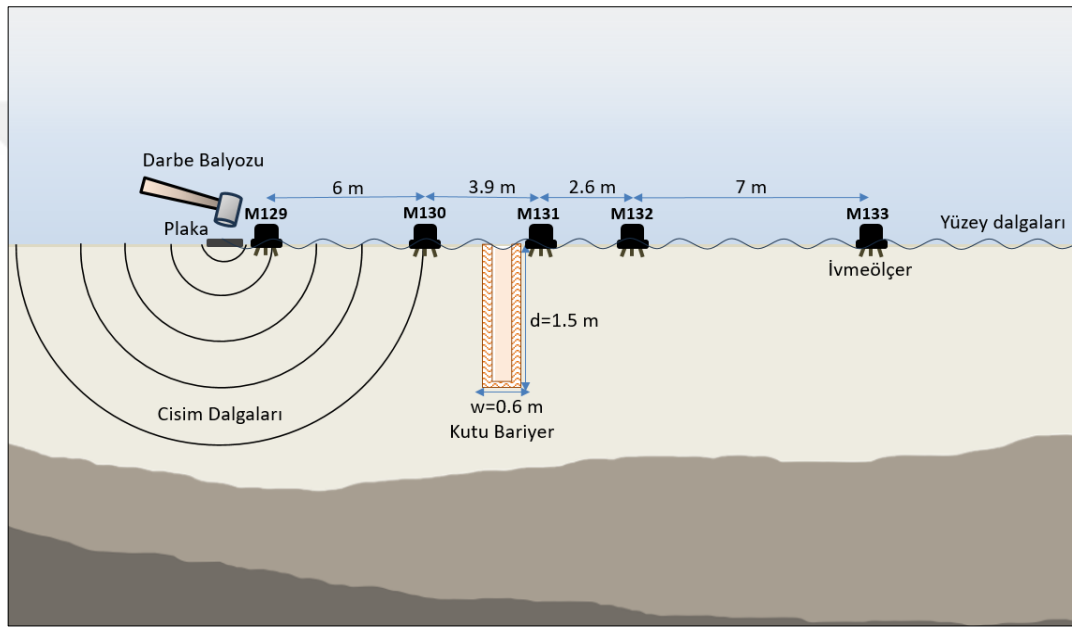
Tablo 4.7. Zemin kaynaklı titreşim ölçümlerine ait deney matrisi.

Deney No	Bariyer Türü	Deney Türü	Kullanılan İvmeölçerler
1	Bariyersiz Durum	Yapay Darbe Testi	M129,M130,M131,M132,M133
2	Boş Hendek	Yapay Darbe Testi	M129,M130,M131,M132,M133
3	Kutu Bariyer	Yapay Darbe Testi	M129,M130,M131,M132,M133
4	Straforlu Kutu Bariyer	Yapay Darbe Testi	M129,M130,M131,M132,M133
5	Bariyersiz Durum	Tren geçişi (250 km/sa)	M130,M131,M132,M133
6	Boş Hendek	Tren geçişi (250 km/sa)	M130,M131,M132,M133
7	Karton Bariyer	Tren geçişi (250 km/sa)	M130,M131,M132,M133
8	Straforlu Kutu Bariyer	Tren geçişi (250 km/sa)	M130,M131,M132,M133
9	Bariyersiz Durum	Tren geçişi (160 km/sa)	M130,M131,M132,M133
10	Boş Hendek	Tren geçişi (160 km/sa)	M130,M131,M132,M133
11	Karton Bariyer	Tren geçişi (160 km/sa)	M130,M131,M132,M133
12	Straforlu Kutu Bariyer	Tren geçişi (160 km/sa)	M130,M131,M132,M133

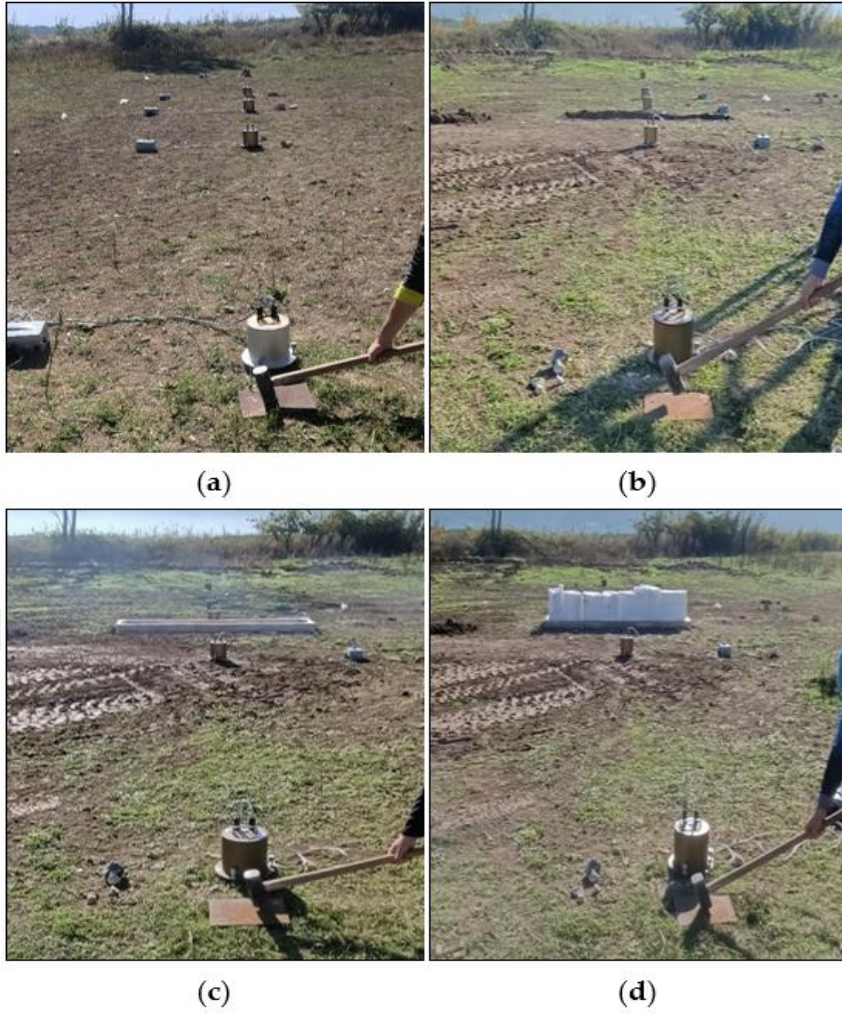
4.7.1.1. Yapay darbe uygulamasıyla üretilen zemin titreşimi ölçümleri

Saha deneylerinin ilk aşamasında, yapay darbe yüklemesi sonucu serbest zemin yüzeyinde oluşan hareketler, ivmeölçerler aracılığıyla kaydedilmiştir. İkinci aşamada, kutu bariyerin yalıtım performansını açık hendeğin dalga soğurma etkisiyle karşılaştırmak amacıyla, bariyerin geometrik boyutlarına uygun bir hendek kazılmış ve darbe levhasına uygulanan balyoz darbeleri sonucunda oluşan dalgalar ivmeölçerlerle ölçülmüştür. Üçüncü aşamada ise, 3 m uzunluğunda, 1.5 m yüksekliğinde ve 0.6 m genişliğinde kutu formunda imal edilen kutu bariyer, önceden kazılmış olan hendeğin içerisine yerleştirilmiş ve darbe yüklemesi sonucu oluşan cisim dalgaları yine aynı ölçüm noktalarında kaydedilmiştir. Deneysel çalışmanın son aşamasında ise, kutu bariyerin iç hacmi, atık polistiren köpük (strafor) malzeme ile

doldurulmuş ve darbe etkisiyle oluşan titreşimler bu durumda da kaydedilmiştir. Balyozla uygulanan darbe sonucu oluşan titreşimler, zemin yüzeyinde darbe plakasına dik olacak şekilde yerleştirilen 5 adet ivmeölçer aracılığıyla; Doğu-Batı (EW), Kuzey-Güney (NS) ve Düşey (UD) yönlerinde kaydedilmiştir. EW, NS ve UD yönleri sırasıyla dinamik titreşim kaynağına paralel, dik ve düşey doğrultuları temsil etmektedir. Tüm testler sabit deney koşulları altında yürütülmüştür; yük kaynağı konumu ve ivmeölçer yerleşimleri korunmuştur. İvmeölçerlerin yerleşimi ve kutu bariyerin konumu Şekil 4.17’de sunulmaktadır. Deneysel ölçümlerdeki tüm senaryolara genel bir bakışı veren görseller ise Şekil 4.18’de verilmiştir.

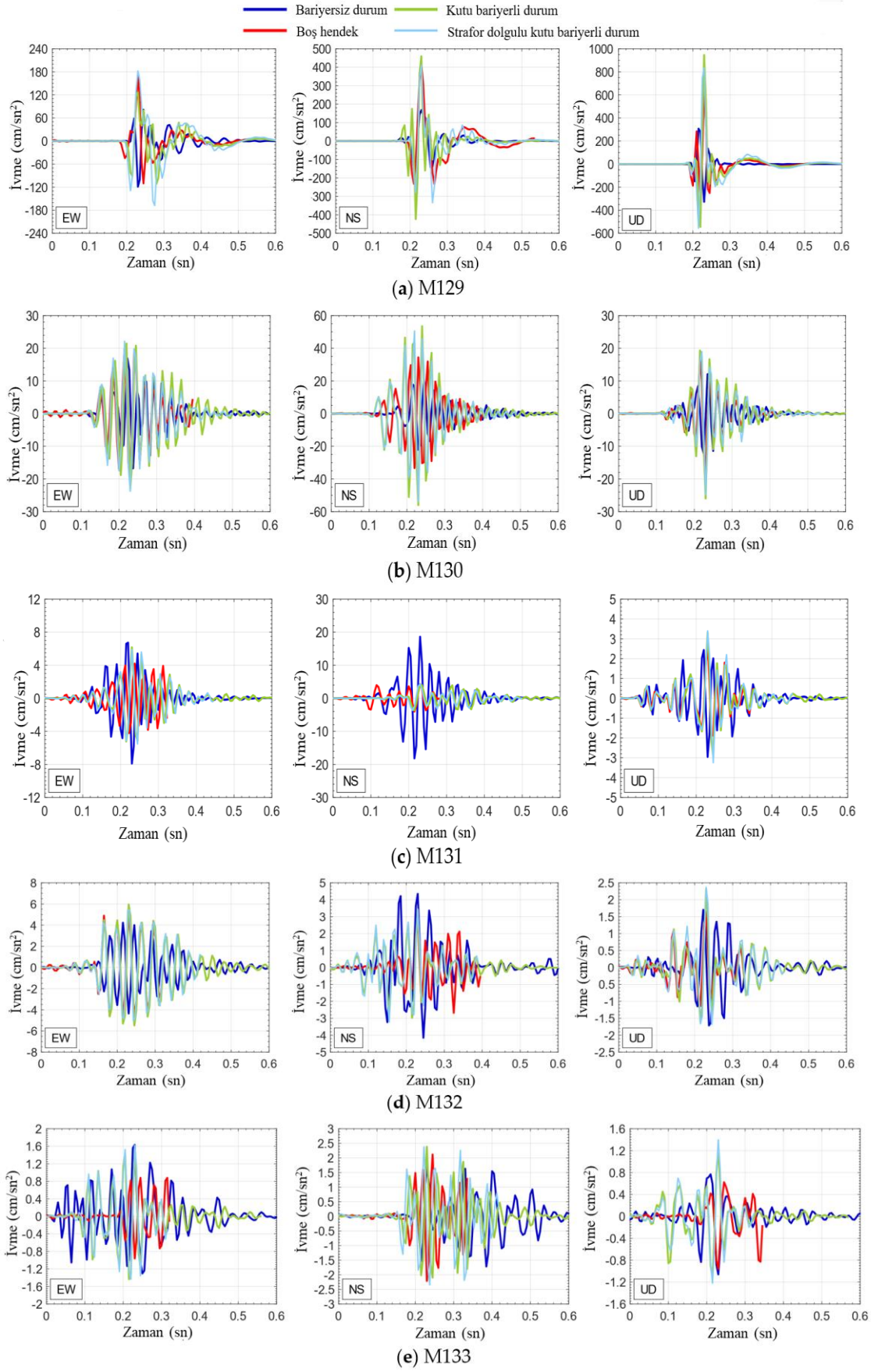


Şekil 4.17. İvmeölçerlerin yerleşimi ve kutu bariyerin konumu.



Şekil 4.18. Yapay darbe titreşim ölçümlerindeki saha durumları: (a) Bariyersiz durum, (b) Boş hendek, (c) Kutu bariyerli hendek, (d) Strafor dolgulu kutu bariyer.

Yapay bir titreşim kaynağı olan manuel çekiçle uygulanan darbe testlerinde, çarpma sonrası oluşan enerji kayıpları çeşitli faktörlerden etkilenebileceği için, her senaryo için en az üç test yapılacak şekilde toplamda 17 test gerçekleştirilmiştir. Bariyersiz durumda 3 test, Boş Hendek durumunda 6 test, Kutu Bariyerli Hendek durumunda 4 test ve Strafor Dolgulu Kutu Bariyerin varlığında ise 4 test yapılmıştır. Üç eksenli ivmeölçerlerin kaydettiği ham veriler işlendikten sonra tek bir darbe kaydının her bir doğrultusu için ivme-zaman ilişkileri çizdirilmiştir (Şekil 4.19).

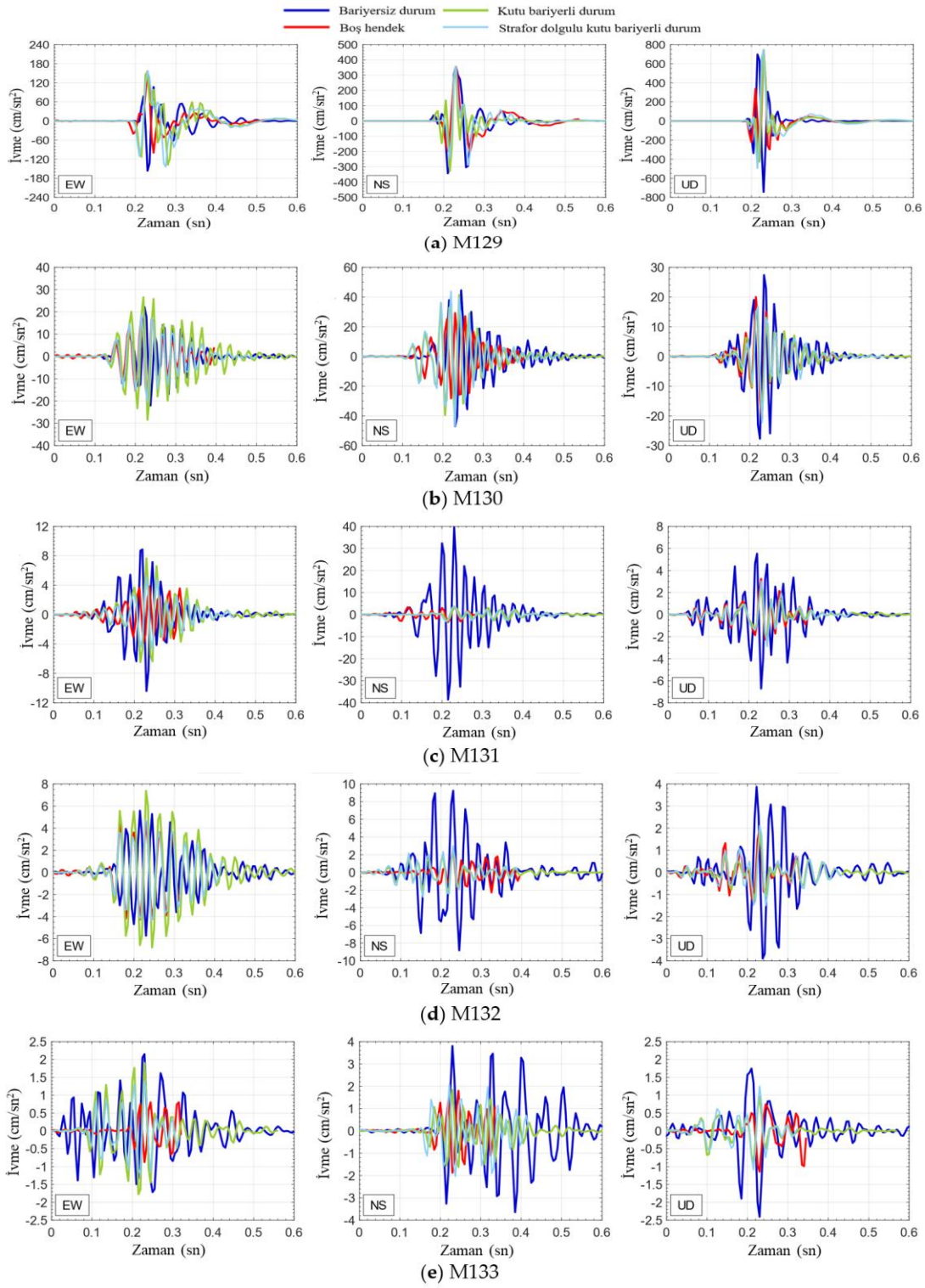


Şekil 4.19. Her bir ivmeölçer için tek bir darbe testine ait karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.

Darbe yüklemeyle üretilen titreşim verilerinin ani ve kısa süreli karaktere sahip olduğu literatürde yaygın olarak bilinmektedir. Spektral büyüklükler, darbenin şiddetiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Darbe şiddeti arttıkça, spektral genlikler de artmakta; buna bağlı olarak titreşim verisinin taşıdığı enerji düzeyi de genliğe paralel şekilde yükselmektedir. Şekil 4.19’da sunulan ve darbe testlerinden alınan tek bir örnek üzerinden çizilen ivme-zaman ilişkileri incelendiğinde, bu verilerin genel darbe testlerinde ölçülen titreşim tepkilerine benzer bir davranış sergilediği gözlemlenmektedir. Yük kaynağının hemen önünde konumlanan M129 numaralı ivmeölçerden elde edilen veriler incelendiğinde; genliğin beklenildiği üzere çok kısa bir sürede tepe değerine ulaştığı ve kısa süre içinde de sönümlendiği görülmektedir. Titreşim enerjisinin yoğunlaştığı zaman aralığı ise yaklaşık olarak 0.6 saniyedir. Darbe yönünün baskın olduğu ve çekiç uygulamasının yapıldığı doğrultular olan NS (Kuzey–Güney) ve UD (Düşey) yönlerinde elde edilen ivme genliklerinin zamana bağlı değişimi, dört farklı darbe testinde de yaklaşık olarak benzer karakteristik göstermektedir. Bu özellik, diğer darbe testlerinden elde edilen titreşim verilerinde de gözlemlenmektedir. Şekil 4.19’da sunulan ivme-zaman grafiklerinde yer alan maksimum genlikler arasında gözle görülür küçük farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, her bir darbe uygulamasında aynı büyüklükte ve süreklilikte bir darbe enerjisi üretmenin uygulamada oldukça zor olmasıyla ilişkilidir. Manuel olarak gerçekleştirilen çekiç darbeleri, kullanıcıdan kaynaklı değişkenlikler nedeniyle belirli oranda enerji kayıplarına veya farklılıklarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, karşılaştırmalı analizlerin güvenilirliğini artırmak ve tüm senaryolarda benzer başlangıç koşulları oluşturmak amacıyla, elde edilen veriler üzerinde belirli düzeltmeler uygulanarak titreşim enerjisi düzeylerinin yaklaşık olarak eşitlenmesi sağlanmıştır.

Titreşim sönümleme performansının nicel olarak belirlenebilmesi için, Woods (1968) tarafından önerilen Genlik Azaltma Oranı (A_R) kavramı, literatürde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu oran, belirli bir ölçüm noktasında dalga bariyeri varlığında elde edilen maksimum spektral genlik ile aynı ölçüm noktasında serbest alan koşullarında ölçülen genlik arasındaki orana karşılık gelmektedir. Woods, etkili bir dalga bariyeri için maksimum A_R değerinin 0.25 olması gerektiğini önermiştir. A_R değerleri, Denklem 2.11 ile verilen formüle göre hesaplanmıştır. Titreşim azaltım yüzdesini belirlemek amacıyla, A_R değerleri temel alınarak Denklem 2.12 ile hesaplanan Bariyer

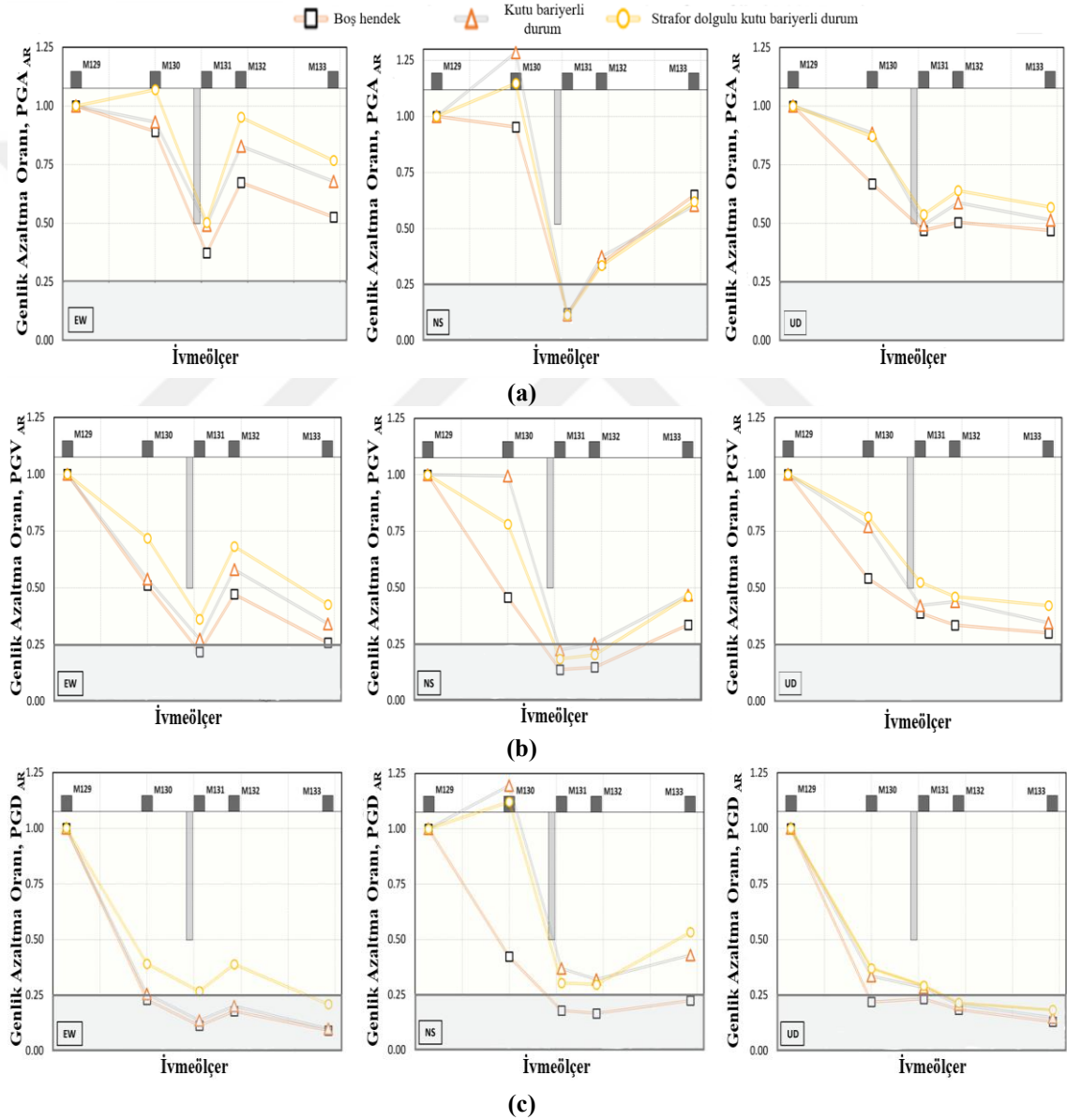
Etkinliği (BE) değerleri kullanılmıştır. Titreşim sönümleme performansının değerlendirilmesinde kullanılan Genlik Azaltma Oranı (A_R) hesaplamaları, ivme verilerinden elde edilen üç temel spektral büyüklük esas alınarak gerçekleştirilmiştir: kayıt altına alınan ivme verisinin maksimum değerı (PGA), ivme verisinin bir kez entegrasyonu ile elde edilen maksimum hız değerı (PGV) ve iki kez entegrasyonu ile elde edilen maksimum yer değiştirme değerı (PGD). Ancak, darbe uygulamasıyla üretilen titreşimlerin maksimum genlikleri arasındaki standart sapmanın azaltılması ve bu sayede titreşim performansının daha doğru şekilde karşılaştırılabilmesi için, yük kaynağındaki ivme genliğinin tüm senaryolar için eşitlenmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, sönümleme performansının güvenilir bir şekilde yorumlanabilmesi için birden fazla test verisi üzerinden ortalama alınması da diğer bir gerekliliktir. Bu kapsamda, yük kaynağının hemen önünde yer alan M129 numaralı ivmeölçerden elde edilen PGA, PGV ve PGD değerleri, tüm yönler için yaklaşık olarak aynı büyüklüğe getirilmiştir. Örneğin, M129 sensöründen elde edilen EW yönündeki tüm darbelere ait PGA değerlerinin ortalaması alınmış; ardından, bu ortalama değer, aynı yönde ve aynı ivmeölçerden elde edilen her bir darbenin PGA değerı ile oranlanarak çarpan katsayılar belirlenmiştir. Elde edilen bu katsayılar, ilgili darbeye ait hem M129 hem de diğer ivmeölçerlerden elde edilen PGA değerleri ile çarpılmıştır. Böylece, her bir darbe için analiz edilen yön doğrultusunda ivme verileri, ortak bir yük büyüklüğüne göre normalize edilmiştir. Aynı işlem, diğer yönler ve spektral büyüklükler (PGV ve PGD) için de uygulanmıştır. Veri sayısının fazlalığı ve yapılan düzeltmelerin daha açık bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla, şekil 4.19'da yer alan veriler bu yöntemle normalize edilmiş ve son haliyle şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.20. Her bir ivmeölçer için normalize edilmiş darbe testlerine ait karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.

Şekil 4.20’de sunulan ivme-zaman ilişkileri incelendiğinde ulaşılan sonuçlardan ilki; bariyerin hemen arkasında M131 ivmeölçerinden elde edilen titreşim genliklerinin, özellikle NS (kuzey-güney) yönünde, bariyersiz durumdaki titreşim genliklerine göre daha düşük olduğudur. Bu durum, kutu bariyerin titreşimleri belirgin şekilde

azalttığını göstermektedir. Ayrıca, ivmeölçerlerden elde edilen titreşim genliklerinin; hem bariyerin etkisi hem de zeminin mesafeye bağlı sönümleyici etkisi nedeniyle, yük kaynağından uzaklaştıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalım oranlarının nicel olarak ifade edilebilmesi amacıyla; her bir test senaryosu için, tüm yönler (EW, NS, UD) doğrultusunda elde edilen düzeltilmiş spektral büyüklüklerin ortalamaları alınmış ve böylece her senaryoya ait ortalama spektral genlik değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler esas alınarak, Genlik Azaltma Oranı (AR) değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.21’de sunulmuştur.



Şekil 4.21. (a) PGA, (b) PGV ve (c) PGD değerlerine ait normalize edilmiş Genlik Azaltma Oranı (AR) değerlerinin, tüm ivmeölçerlerin üç yön bileşeni üzerinden karşılaştırılması.

Şekil 4.21'deki grafikler incelendiğinde, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer uygulamalarının genel titreşim azaltım performansında en az yaklaşık %50 oranında iyileşme sağladığı görülmektedir. Ancak bu performans değerleri, darbe kaynaklı titreşimlerin yönüne ve ivmeölçerlerin konumlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Darbe etkisiyle oluşan titreşimlerin en baskın olduğu yön, bariyere dik olan NS (kuzey-güney) doğrultusudur. Bu doğrultu göz önünde bulundurularak bariyerin yalıtım tasarımı gerçekleştirilmiştir. NS yönünde, bariyerin hemen arkasında konumlandırılan M131 numaralı ivmeölçerden elde edilen Genlik Azaltma Oranı (AR) değerleri incelendiğinde, tasarımın titreşim azaltımındaki etkinliği açıkça görülmektedir. Tüm koşullar için titreşim azaltım performansı PGA değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Literatürde, açık hendeklerin bir yalıtım duvarına sahip olan hendeklere kıyasla daha yüksek izolasyon performansı sunduğu bilinmektedir. Bu çalışmada da açık hendek için yaklaşık %88 oranında titreşim azaltımı sağlandığı görülmüştür. Kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer koşullarında ise bu oran yine yaklaşık %88'dir. Ayrıca, tüm koşullarda elde edilen AR değerleri, Woods (1968) tarafından önerilen ve grafiklerde de gri renkle temsil edilen "etkili yalıtım bölgesi" sınırı olan 0.25 seviyesinin altında kalmaktadır. Bu bulgular, kutu bariyerin hem yanal stabilite sağladığını hem de açık hendek ile benzer bir sönümleme davranışı gösterdiğini ve pratik uygulamalar açısından önemli bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır. Kutu bariyer içerisine yerleştirilen dolgu malzemesinin ise yalıtım performansını belirgin şekilde artırmadığı, ancak olumsuz bir etkisinin de bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Bariyerin hemen önünde yer alan M130 numaralı ivmeölçerden elde edilen PGA_{AR} değerleri incelendiğinde ise, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer koşullarında ölçülen genliklerin, açık hendek durumuna kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, bariyerin ön yüzeyinde, gelen dalgaların bir kısmının yansiyarak tekrar ivmeölçere ulaşmasıyla açıklanabilir. Kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer koşullarında, bariyersiz duruma göre sırasıyla yaklaşık %30 ve %15 oranında genlik artışı gözlemlenmiştir. Açık hendek koşulunda ise bu oran yaklaşık %5 azalma yönündedir. Kutu bariyerin içine yerleştirilen strafor dolgu malzemesi, yansımaların etkisini azaltarak kutu bariyere kıyasla daha az genlik artışına neden olmuş ve bu yönüyle daha iyi bir performans sergilemiştir.

M132 ve M133 numaralı ivmeölçerlerden elde edilen PGA_{AR} değerleri, test koşullarından bağımsız olarak sırasıyla ortalama 0.35 ve 0.63 olarak belirlenmiştir. Bariyerin arkasına doğru uzaklık arttıkça, AR değerlerinin yükseldiği; yani yalıtım etkinliğinin mesafeye azaldığı görülmektedir. PGV değerleri üzerinden yapılan analizlerde de benzer bir davranış gözlenmiştir. Bariyerin hemen arkasındaki M131 sensörü için, açık hendek, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer koşullarına ait PGV_{AR} değerleri sırasıyla 0.14, 0.22 ve 0.18 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler de Woods'un önerdiği etkili yalıtım sınırları içerisinde yer almaktadır.

Bariyerin etkinliği, titreşim azaltım yüzdeleri ile değerlendirildiğinde; açık hendek için %86, kutu bariyer için %78 ve strafor dolgulu kutu bariyer için %72 oranlarında titreşim izolasyonu sağlandığı görülmüştür. PGV verilerine göre en yüksek performans açık hendekte elde edilirken, onu kutu bariyer ve ardından strafor dolgulu kutu bariyer izlemiştir. Kutu bariyerin içine dolgu malzemesi yerleştirilmesi, yalıtım performansını yaklaşık %6 oranında artırmıştır. Bu da, straforun katkı sağladığını göstermektedir.

M130 ivmeölçerinden elde edilen PGV_{AR} değerleri de, PGA verileriyle uyumlu şekilde, bariyer önünde bir miktar yansımanın oluştuğunu göstermektedir. M132 ivmeölçerinden elde edilen veriler ise, M131'e oldukça yakın değerler sunmakta ve bariyerin etkisinin 2.6 m mesafeye kadar korunduğunu göstermektedir. Ancak bu etki, mesafe arttıkça azalmaktadır. M132 ivmeölçeri için açık hendek, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer koşullarına ait titreşim azaltım yüzdeleri sırasıyla %85, %75 ve %80; M133 için ise %66, %53 ve %54 olarak hesaplanmıştır. Bu da, uzak mesafede bile açık hendeğin diğer koşullara göre daha yüksek performans gösterdiğini, ancak kutu bariyer ile strafor dolgulu kutu bariyer arasında büyük bir fark olmadığını ortaya koymaktadır. Genel olarak PGV verileri üzerinden hesaplanan yalıtım performansı, PGA verilerine kıyasla mesafeye bağlı olarak daha dengeli bir azalma eğilimi göstermektedir. Sayısal olarak, PGV'ye dayalı titreşim azaltım yüzdeleri, PGA'ya göre sırasıyla %2, %11 ve %7 daha düşük çıkmıştır. Tablo 4.8'teki sonuçlar; bariyerin hemen arkasında konumlandırılan M131 numaralı ivmeölçerden, NS yönünde elde edilen spektral büyüklük (PGA, PGV, PGD) verilerine dayanarak hesaplanan yüzde titreşim azaltım oranlarını özetlemektedir.

Tablo 4.8. Yapay darbe testine ait bariyer tipine göre spektral titreşim azaltım performansları.

Spektral Büyüklük	İvmeölçer (Bariyerin Hemen Arkası)	Deney Koşulu	Titreşim Azaltım (%)
PGA	M131-NS	Boş Hendek	≈88%
PGA	M131-NS	Kutu Bariyer	≈88%
PGA	M131-NS	Strafor Dolgulu Kutu Bariyer	≈88%
PGV	M131-NS	Boş Hendek	86%
PGV	M131-NS	Kutu Bariyer	78%
PGV	M131-NS	Strafor Dolgulu Kutu Bariyer	82%
PGD	M131-NS	Boş Hendek	82%
PGD	M131-NS	Kutu Bariyer	63%
PGD	M131-NS	Strafor Dolgulu Kutu Bariyer	69%

PGD verilerine göre yapılan analizlerde de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Bariyerin önündeki ivmeölçerlerde dalga yansıması, arkasındakilerde ise mesafeye bağlı sönümlleme etkisi belirgin şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, bariyerin hemen arkasındaki M131 ivmeölçerinden elde edilen PGD_{AR} değerlerinin, PGA ve PGV'ye göre biraz daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Sırasıyla açık hendek, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer için PGD_{AR} değerleri 0.18, 0.37 ve 0.31; buna karşılık gelen titreşim azaltım yüzdeleri ise %82, %63 ve %69'dur. Bu sonuçlar, UD yönünde genel olarak başarılı bir performans sağlandığını; ancak kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer durumlarının literatürde önerilen etkin yalıtım bölgesi sınırının küçük bir oranda dışında kaldığını göstermektedir.

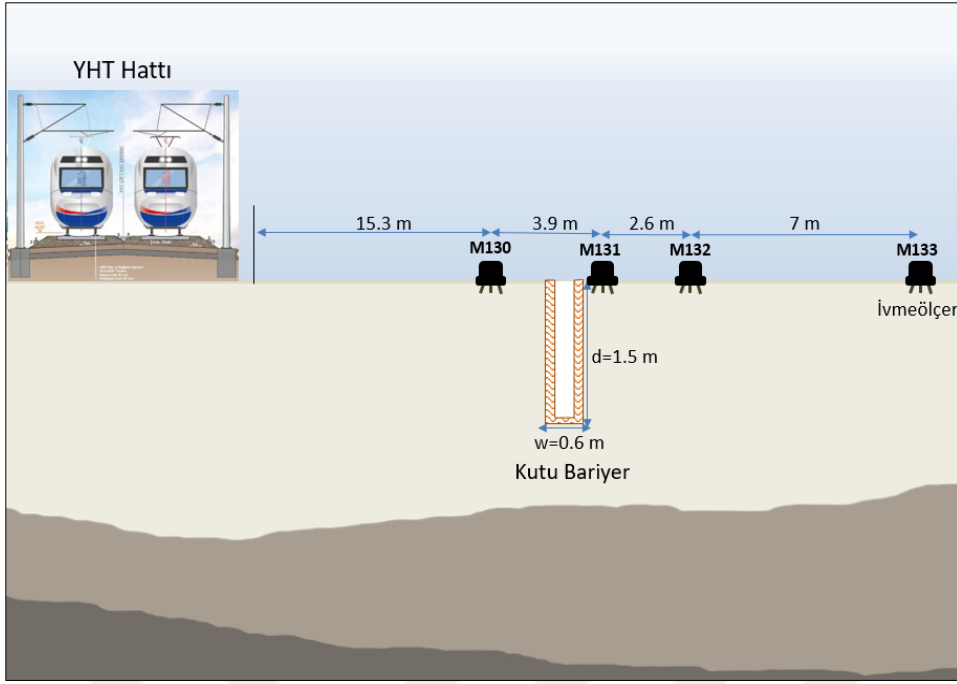
EW yönünde, PGD değerlerine göre en iyi yalıtım performansı elde edilirken, PGA değerlerinde en düşük performans gözlemlenmiştir. NS yönünde ise bu durum tersine dönmektedir. PGA verilerine göre açık hendek en yüksek performansı sunarken, strafor dolgulu kutu bariyer diğerlerine göre daha düşük performans göstermiştir. PGA verilerinde EW ve NS yönleri için bariyerlerin göreceli üstünlükleri benzerlik göstermektedir. PGV ve PGD verilerine göre de en iyi yalıtım yine açık hendekte elde edilirken, kutu bariyerin içine yerleştirilen dolgu malzemesi yalıtım performansını artırarak; yalnızca kutu bariyer varlığına kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. PGA'ya dayalı titreşim azaltım yüzdelerinde açık hendek, kutu bariyere göre %12 daha yüksek performans sergilerken; bu fark PGV için %6 ve PGD için %2 düzeyindedir. Kutu bariyer koşulunda, PGA verilerine göre performanslar benzer çıkarken; PGV ve PGD verilerinde sırasıyla yaklaşık %9 ve %13 daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bariyerli durumların ortalama yalıtım performansları değerlendirildiğinde,

Woods tarafından önerilen etkin yalıtım sınırları açısından PGV ve PGD verilerinin bu sınırların içinde ya da çok yakınında olduğu, ancak PGA verilerinin sınır dışında kaldığı görülmektedir.

UD yönü için, bariyerin hemen arkasında konumlanan ivmeölçerlerden elde edilen PGA, PGV ve PGD verilerine göre ortalama titreşim azaltım yüzdeleri sırasıyla %50, %56 ve %73 olarak hesaplanmıştır. Tüm spektral büyüklükler dikkate alındığında, en yüksek yalıtım performansı açık hendekte elde edilirken, en düşük performans strafor dolgulu kutu bariyer durumunda ölçülmüştür. Ancak M131 ivmeölçerinden elde edilen verilere göre, UD yönünde her üç bariyer durumuna ait titreşim azaltım performanslarının EW ve NS yönlerine kıyasla daha düşük kaldığı görülmektedir. Ayrıca, bariyerin arkasındaki titreşim genliklerinin genel olarak mesafe arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Bariyerin önünde yer alan M130 sensöründen elde edilen spektral büyüklüklere dayalı AR değerleri incelendiğinde, EW yönünde olduğu gibi, UD yönünde de dalga yansımalarının etkinliğinin sınırlı olduğu görülmektedir.

4.7.1.2. Yüksek hızlı tren geçişlerinin ürettiği zemin titreşimi ölçümleri

Saha deneylerinin ikinci aşamasında, demiryolu hattından geçen yüksek hızlı trenlerin geçişleri sırasında üretilen titreşimler incelenmiştir. Bu kapsamda, kutu bariyerin yalıtım performansını değerlendirmek amacıyla, aynı deney sahasında yüksek hızlı tren geçişleri sırasında zemin titreşimleri kaydedilmiştir. Kutu bariyer prototipinin zemin kaynaklı titreşimleri sönümleme performansı; Bariyersiz durum, Boş Hendek durumu, Kutu Bariyerli durum ve Strafor Dolgulu Kutu Bariyerli durum olmak üzere dört farklı senaryo ile değerlendirilmiştir. Ölçümlerde, ilk aşamadaki yapay darbe testlerinde kullanılan yerleşim düzeni ve cihaz konumları korunmuş; ancak bu sefer kutu bariyerin önünde 1 adet, arkasında 3 adet olacak şekilde toplam 4 adet ivmeölçer kullanılmıştır. Boş hendek durumunu inceleyen deneylerde bariyerin ön tarafındaki tren hattına en yakın olan ivmeölçerin kontrol dışı bir şekilde çalışmayı durdurması nedeniyle; tüm durumların eşit şartlarda karşılaştırılmasını mümkün kılmak amacıyla, ivmeölçer sayısı dörde düşürülmüştür. Tren geçişleri sırasında oluşan cisim dalgaları, zemin yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerle EW, NS ve UD yönlerinde kaydedilmiştir. Bu yönler, tren hareketine paralel, dik ve düşey doğrultuları temsil etmektedir. Bariyerli sahada ivmeölçerlerin yerleşimi ile ilgili şematik gösterim Şekil 4.22’de sunulmuştur.

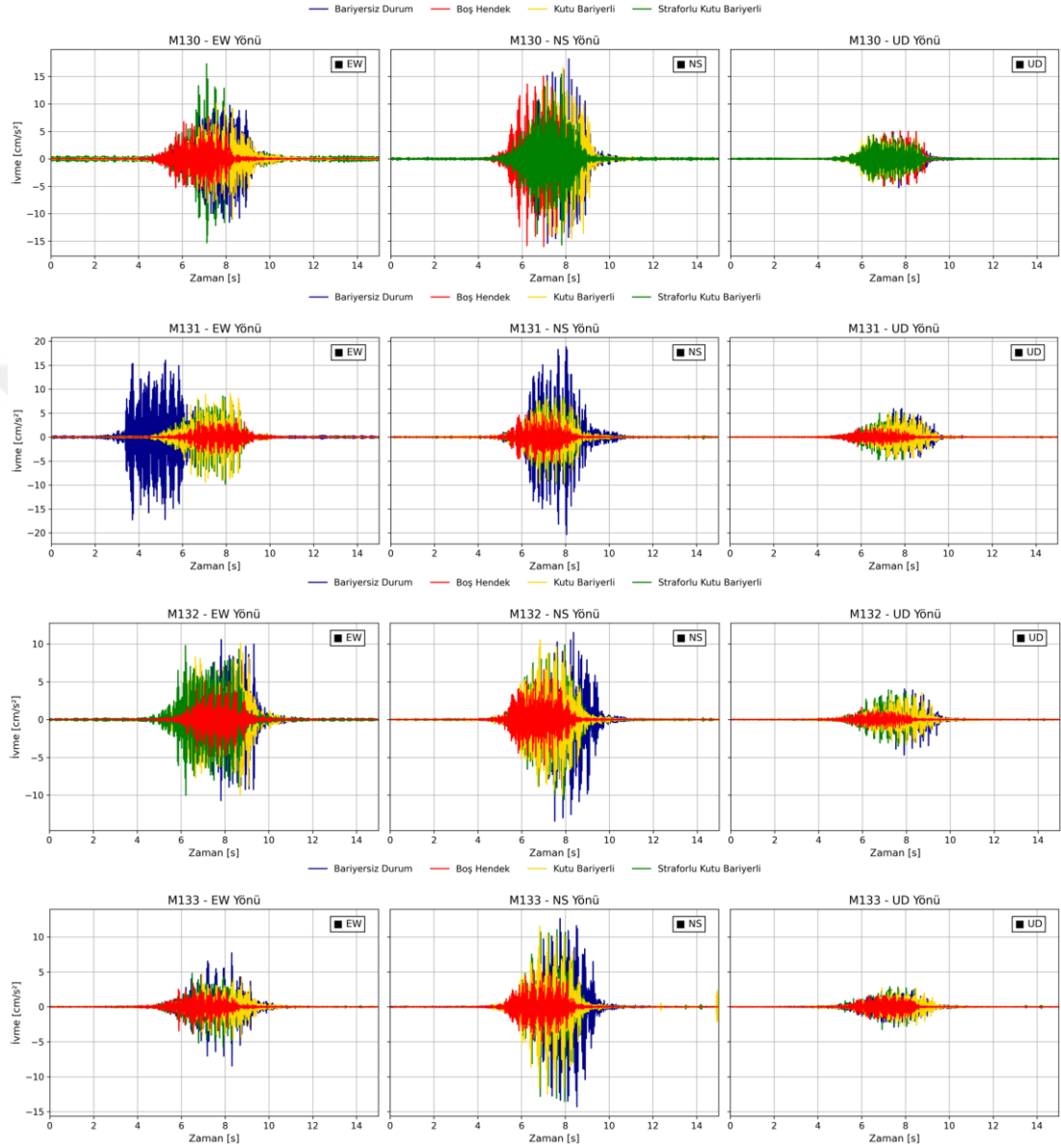


Şekil 4.22. Bariyerli sahada ivmeölçerlerin yerleşimi.

Saha ölçümleri sırasında kaydedilen yüksek hızlı tren geçişlerinin bir kısmında, trenlerin makas değişimi nedeniyle deney sahasının bulunduğu kesimde hızlarını önemli ölçüde düşürdükleri gözlemlenmiştir. Bu durum, trenin zemin üzerinde oluşturduğu titreşim karakteristiklerini doğrudan etkilediğinden, kayıtlar analiz öncesinde tren hızlarına göre kategorize edilmiştir. Bu kapsamda, geçiş hızı yaklaşık 250 km/sa olan trenler “250 km/sa’lık tren geçişleri”, yaklaşık 160 km/sa olan trenler ise “160 km/sa’lık tren geçişleri” olarak isimlendirilmiş olup; zemin titreşimlerini ölçen deneyler 2 aşamada değerlendirilecektir. Elde edilen veriler, bu iki hız grubuna göre ayrı ayrı değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. Farklı hızlardaki tren geçişleri sonucunda oluşan titreşimlerin değerlendirilmesinde, her bir senaryo (Bariyersiz Durum, Boş Hendek, Kutu Bariyer ve Strafor Dolgulu Kutu Bariyer) için elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, hem ivme-zaman hem de hız-zaman eğrileri incelenmiş, her bir hız grubunda maksimum yalıtım etkisini veren tren geçişleri seçilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Grafiklerde; en önde en düşük genlik değerini içeren eğri yer alacak şekilde sıralanmış olup; renk kodlaması, her bir saha durumuna karşılık gelen titreşim düzeylerini ayırt edilebilir biçimde sunmak amacıyla yapılmıştır. Mavi eğri; bariyersiz durumu, kırmızı eğri; boş hendek durumunu, sarı eğri; kutu bariyerli durumu ve yeşil eğri ise strafor dolgulu kutu bariyerli durumu temsil etmektedir. Renk kodlarını içeren etiket; grafik şemasının en üstünde yer almaktadır.

4.7.1.2.1. 250 km/sa hızındaki tren geçişleri sırasında ölçülen zemin titreşimleri

Zemin titreşimi ölçümlerinin değerlendirilmesinin ilk aşaması, ivmeölçerlerden elde edilen ham verilerin incelenmesinden oluşmakta olup; ‘250 km/sa’lık tren geçişleri’ne ait ham verilerin ivme-zaman karşılaştırmaları Şekil 4.23’te sunulmuştur.



Şekil 4.23. 250 km/sa’lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.

Şekil 4.23’te sunulan ivme-zaman eğrileri değerlendirildiğinde, elde edilen ilk dikkat çekici bulgu; bariyerin hemen arkasında yer alan M131 ivmeölçerinden kaydedilen titreşim genliklerinin, özellikle kuzey-güney (NS) yönünde, bariyersiz duruma kıyasla anlamlı şekilde azalmış olmasıdır. Bariyerin önünde konumlandırılan M130 ivmeölçerine ait ölçümlerde, kutu bariyer durumunun ivme değeri 107.20 mm/s² olup, bariyersiz duruma kıyasla %7.2 oranında azalma göstermiştir. Strafor dolgulu kutu

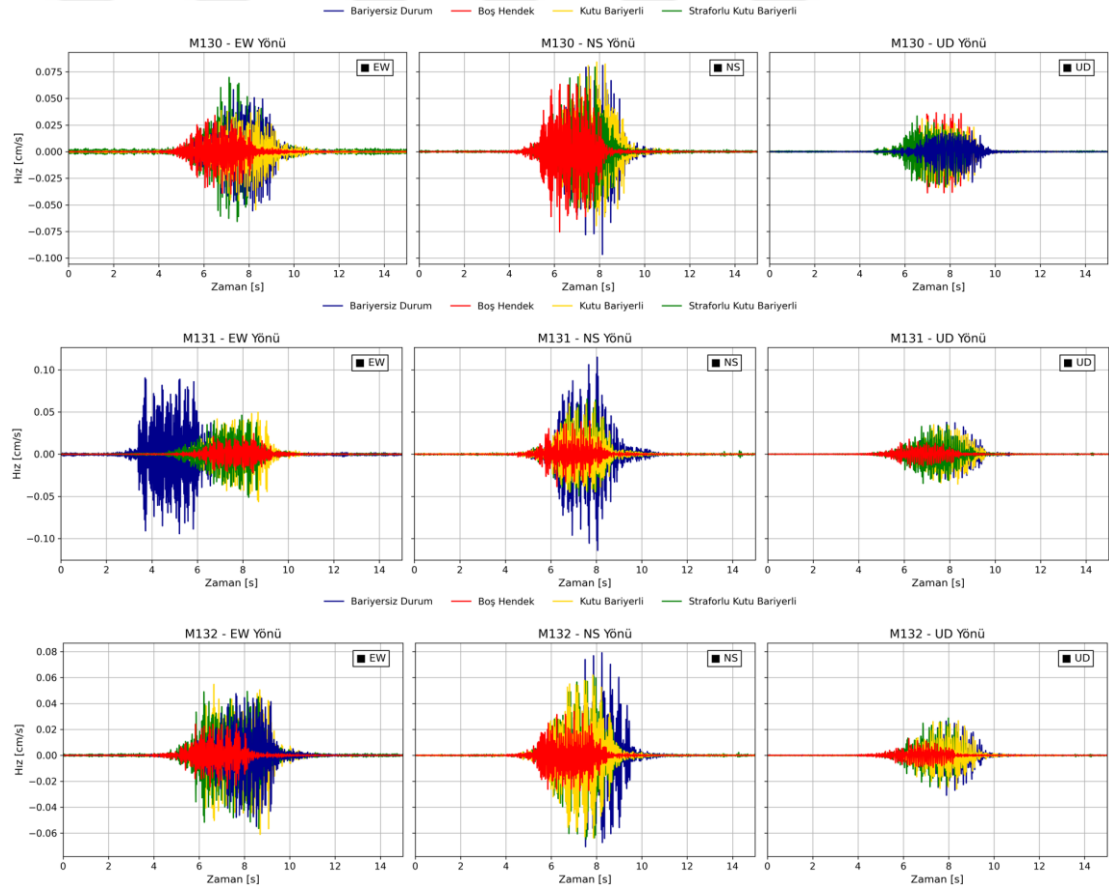
bariyer ise 173.08 mm/s² ile ivme büyüklüğünü %49.9 oranında artırmıştır. Bu noktada yapılan ölçüm, bariyerin ön tarafında gerçekleştirildiğinden; gözlemlenen genlik artışı, dalga yansıması sonucu oluşan büyütme etkisinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bariyerin hemen arkasında bulunan M131 ivmeölçerinden alınan veriler değerlendirildiğinde; boş hendek durumunun EW yönündeki ivme genlikleri %77, kutu bariyer varlığının EW yönündeki ivme genliklerini %45.5 oranında azalttığı, strafor dolgulu kutu bariyer varlığının ise ivme değerlerini %43.3 oranında azaltarak önemli bir yalıtım performansı sergilediği gözlenmiştir. EW yönünde kutu bariyer ve straforlu kutu bariyerin benzer yalıtım performansları gösterdiği söylenebilir. M132 noktasında boş hendek yaklaşık %53.8 azalma sağlarken, kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer ise %5-6 oranlarında sınırlı sönümleme bir titreşim azaltması sunmuştur. Bariyere en uzak olan M133 ivmeölçerinden alınan verilerde ise boş hendek ve kutu bariyerin yakın oranlarda izolasyon sağladığı görülmüş; sırasıyla %54.6, %43.6 oranlarında performans sağlanmıştır.

NS yönünden alınan ivme değerleri incelendiğinde, bariyerin önündeki M130 ölçüm noktasında boş hendek durumu yaklaşık %12.3 oranıyla sınırlı bir sönümleme etkisi sağlamış, kutu bariyer %8.7 ve straforlu sistem %13.9 oranlarında benzer düzeyde katkılar sunmuştur. Bariyerin hemen arkasındaki M131 noktasında ise boş hendek durumu %73.3 oranında yüksek bir azalma sağlayarak öne çıkmış; beraberinde kutu bariyer %51.7, strafor dolgulu kutu bariyer ise %51.8 oranında oldukça etkili ve benzer performanslar göstermiştir. M132 noktasında boş hendek durumu %51.1 oranında azalma sunarken, kutu bariyer %21.7 ve straforlu sistem %21 oranında daha sınırlı bir yalıtım etkisi göstermiştir. Bariyere en uzak olan M133 ölçüm noktasında ise boş hendek durumu %63.4 azalma ile en etkili çözüm olurken, kutu bariyer %12.7, straforlu sistem ise sadece %5.2 oranında azalma sağlamıştır. NS doğrultusu kutu bariyerin en etkili performans gösterdiği yön olmuştur.

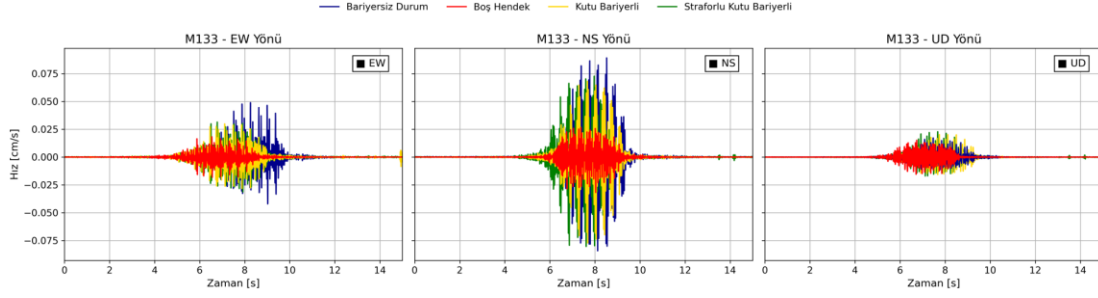
UD yönünden alınan ivme değerleri incelendiğinde ise, bariyerin önündeki M130 ölçüm noktasında; dalga yansıması nedeniyle boş hendek yalnızca %3 ile oldukça düşük bir oranda azalma sağlamış, kutu bariyer %14 oranında görece etkili olmuş; ancak straforlu kutu bariyerde yaklaşık %16.2 oranında bir genlik artışı gözlenmiştir. Bariyerin hemen arkasındaki M131 noktasında ise boş hendek durumu %63.5 oranında dikkat çekici bir sönümleme sağlamış; kutu bariyer %11.5 ve straforlu kutu bariyer

%10 oranında daha sınırlı katkılar sunmuştur. M132 noktasında boş hendek yaklaşık %65.4 oranında başarılı bir azalma sağlarken, kutu bariyer %23.3, strafor dolgululu sistem ise %16.4 oranında azalma göstermiştir. Bariyere en uzak M133 ölçüm noktasında ise boş hendek %35.8 oranında bir azalma sağlarken, kutu bariyer yalnızca %5.2 oranında etkili olmuş; straforlu kutu bariyer ise %11.9 oranında artışa neden olmuştur. Bu bulgular, UD yönünde özellikle boş hendeğin etkin olduğu, kutu bariyerin düşey dalga bileşenlerinin genliklerini dikkate değer bir oranda azaltmadığını göstermiştir.

İvmeölçerlerden elde edilen ivme genliklerinin değerlendirilmesi tamamlandıktan sonra, hız genlikleri incelenmiştir. 250 km/sa'lık tren geçişleri kategorisine ait ivmeölçer kayıtlarından alınan her 3 yöndeki ham verilerin hız-zaman karşılaştırmaları Şekil 4.24'te sunulmuştur.



Şekil 4.24. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı hız-zaman ilişkileri.

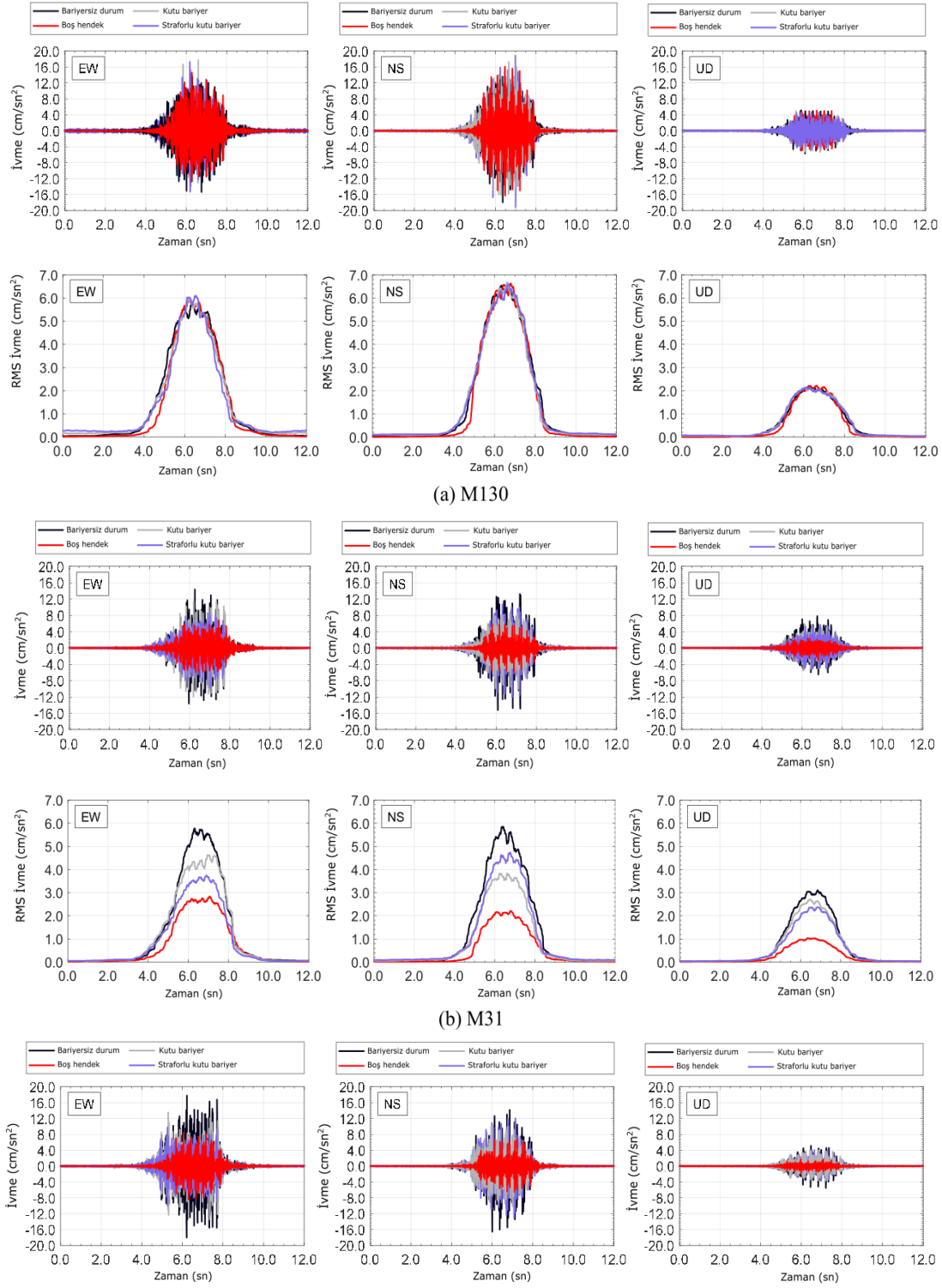


Şekil 4.24. (Devamı) 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı hız-zaman ilişkileri.

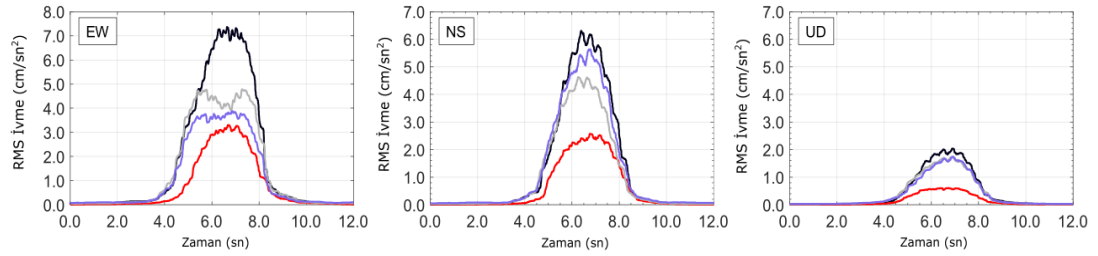
EW doğrultusundan elde edilen hız genlikleri incelendiğinde, bariyerin önündeki M130 ölçüm noktasında boş hendeğin yaklaşık %32 oranında azalma sağladığı görülmüştür. Kutu bariyerin bu yöndeki katkısı %6 düzeyinde kalırken, strafor dolgulu kutu bariyer %20 oranında hız genliğini artırmıştır. Bariyerin hemen arkasındaki M131 ölçüm noktasında ise boş hendek %74 oranında hız azalışı sağlayarak en etkili çözüm olmuştur. Kutu bariyer %37, strafor dolgulu bariyer ise %46 oranında azalma sunmuştur. M132 noktasında boş hendek yaklaşık %53 oranında hız azalması sağlamış, ancak kutu bariyer bu noktada %11, strafor dolgulu kutu bariyer ise %3 oranında artış göstermiştir. M132 ivmeölçerinin bariyerin arkasında konumlanmasına rağmen EW yönünde hız genliğinde gözlemlenen beklenmedik artış, muhtemelen üst zemin tabakasının mekanik özelliklerindeki değişkenlikten kaynaklanmaktadır. Zemin profili homojen olmayan sahalarda, dalga yayılımı sırasında özellikle yüksek frekans bileşenlerine sahip titreşimlerin, yerel zemin koşullarına karşı daha duyarlı olduğu bilinmektedir. Çünkü yüksek frekanslı dalgaların dalga boyları daha kısa olduğundan, bu dalgalar zemindeki küçük heterojenlikleri algılayabilir ve bu noktalarda kırılma, yansıma ya da genlik büyümelerine neden olabilir. Literatürde de belirtildiği üzere, örneğin kil bir tabaka içerisinde yer alan küçük bir kaya parçası, kısa dalga boyuna sahip bir dalga tarafından yeni bir ortam gibi algılanmakta ve bu durum dalga genliklerinde artışlara neden olabilmektedir (Bahrekazemi, 2004). M133 noktasında boş hendek %63, kutu bariyer %39 ve strafor dolgulu kutu bariyer %36 oranında azalma sağlamıştır. NS yönünden alınan hız değerleri incelendiğinde, bariyerin önündeki M130 noktasında boş hendek %22, kutu bariyer %18, strafor dolgulu kutu bariyer ise %18 oranında genlik azalması sağlamıştır. Bariyerin hemen arkasındaki M131 ölçüm noktasında boş hendeğin %80'e yakın bir azalma ile çok etkili olduğu görülmüş; kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer ise %47 oranında benzer sönümleme performansları sunmuştur. M132 noktasında boş hendek %57, kutu bariyer %20,

straforlu sistem ise %18 oranında azalma sağlamıştır. Bariyere en uzak olan M133 ivmeölçerinden alınan hız genliklerinde ise boş hendek %64, kutu bariyer %13, straforlu bariyer ise yalnızca %10 oranında azalma yaşanmıştır. UD yönünden ölçülen hız değerleri değerlendirildiğinde ise, M130 ölçüm noktasında tüm durumlarda dalga yansıması nedeniyle genlik artışları gözlenmiştir. Bariyerin hemen arkasındaki M131 noktasında boş hendek %53 oranında hız genliğini azaltmış; ancak kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer %6 oranıyla oldukça sınırlı bir etki göstermiştir. M132 ve M133 ivmeölçerlerinden alınan verilerde de benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır. Bu değerlendirmeler, UD yönündeki hız genliklerinde yalnızca boş hendeğin anlamlı bir yalıtım sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

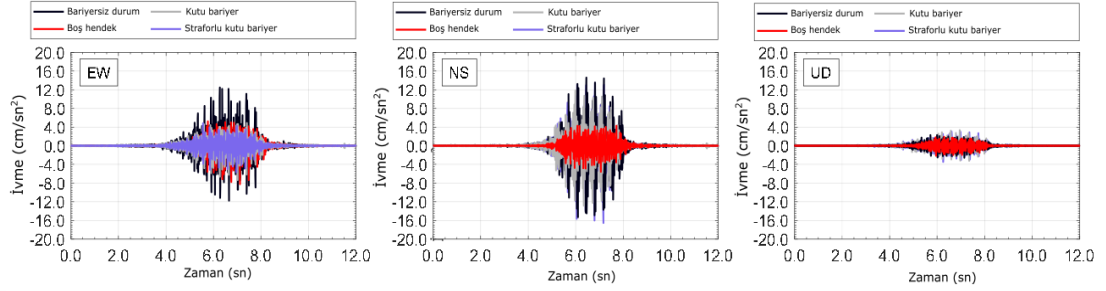
Tren geçişleri sırasında üretilen titreşimlerin maksimum değerleri arasındaki standart sapmanın azaltılması ve bu sayede titreşim performansının daha doğru şekilde karşılaştırılabilmesi için; yük kaynağındaki ivme büyüklüğünün tüm senaryolar için eşitlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, yük kaynağına en yakın konumda yer alan M130 ivmeölçerinden elde edilen pik ivme değerleri, her yön için yaklaşık olarak aynı seviyeye getirilmiştir. Örneğin, M130 ivmeölçerinden elde edilen EW yönündeki tüm tren geçişlerine ait PGA değerlerinin ortalaması alınmış; ardından, bu ortalama değer, aynı yönde ve aynı ivmeölçerden elde edilen her bir tren geçişinin PGA değeri ile oranlanarak çarpan katsayılar belirlenmiştir. Elde edilen bu katsayılar, ilgili tren geçişine ait hem M130 hem de diğer ivmeölçerlerden elde edilen PGA değerleri ile çarpılarak uygulanmıştır. Böylece, her bir tren geçişi için analiz edilen yön doğrultusunda ivme verileri, ortak bir yük büyüklüğüne göre normalize edilmiştir. İvmeölçerlerin kaydettiği ham veriler işlendikten sonra normalize edilmiş verilerle ivme-zaman ilişkileri çizdirilmiştir. Bununla kutu bariyerin titreşim enerjisi soğurma performansını insan algısı ve hassas cihazların çalışmasına etkisi açısından daha anlaşılabilir ve birbiriyle kolay kıyaslanabilir bir şekilde gösterebilmek için, ARMS değerlendirme ölçütüyle de ele alınmıştır. Normalize edilmiş ivme verilerinin RMS yöntemiyle işlenmesinden elde edilen yumuşatılmış ivme-zaman ilişkisi eğrilerinin her bir titreşim doğrultusuna göre karşılaştırılması Şekil 4.25'te sunulmaktadır.



Şekil 4.25. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize edilmiş ivme-zaman ve A_{RMS} -Zaman ilişkileri.



(c) M132



(d) M133

Şekil 4.25. (Devamı) 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize edilmiş ivme-zaman ve ARMS-Zaman ilişkileri.

Bariyerin önünde yer alan M130 ivmeölçerinden elde edilen normalize RMS ivme değerleri incelendiğinde, hem EW hem de NS doğrultularında tüm bariyer uygulamaları için bariyersiz duruma kıyasla artış meydana geldiği görülmektedir. EW yönünde, boş hendek uygulaması yaklaşık %1.7 oranında bir artış üretirken; kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları bu oranı sırasıyla %5 ve %6.8 seviyelerine çıkarmıştır. Benzer şekilde, NS yönünde boş hendek %1.6 oranında bir artışa neden olmuş; kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları ise sırasıyla %3.1 ve %4.8 oranlarında artış göstermiştir. Bu bulgular, özellikle kaynak yönünde yer alan bariyer önündeki konumda, gelen dalgaların sert bariyer yüzeylerinden yansiyarak geri dönmesi sonucu genliklerin arttığını ve bu etkinin dalga yansıması kaynaklı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bariyerin hemen arkasında olan ve doğrudan bariyerin izolasyon performansını yansıtan M131 ivmeölçeri incelendiğinde; normalize RMS ivme değerleri açısından boş hendek, bariyersiz duruma göre yaklaşık %45 oranında bir azalma sağlamıştır (Tablo 4.9). Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer ise sırasıyla %32 ve %38

oranlarında ivme değerlerini düşürmüştür. Bu doğrultuda straforlu bariyerin izolasyon performansının kutu bariyerin performansının üzerine çıktığı görülmektedir. NS yönünde de ise; boş hendek uygulaması, RMS ivme değerlerinde yaklaşık %47'lik bir azalma oluşturmıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları da sırasıyla %33 ve %30 düzeyinde bir sönümleme sağlamıştır. Düşey doğrultuda, bariyersiz duruma göre boş hendek uygulaması yaklaşık %38 azalma sağlamış, kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları da sırasıyla %25 ve %29 oranlarında azalma üretmiştir. Ancak yatay bileşenlerdeki farklara kıyasla UD yönündeki azalma daha sınırlı kalmıştır. M131 konumundaki ölçümler, kutu bariyerin titreşim izolasyonundaki etkinliğini daha belirgin bir şekilde ortaya koymuş olup ve performansının boş hendek uygulamasına önemli ölçüde yaklaştığını göstermiştir. Ayrıca strafor dolgu kullanımının EW yönünde izolasyon performansına katkı sunduğu görülmüştür.

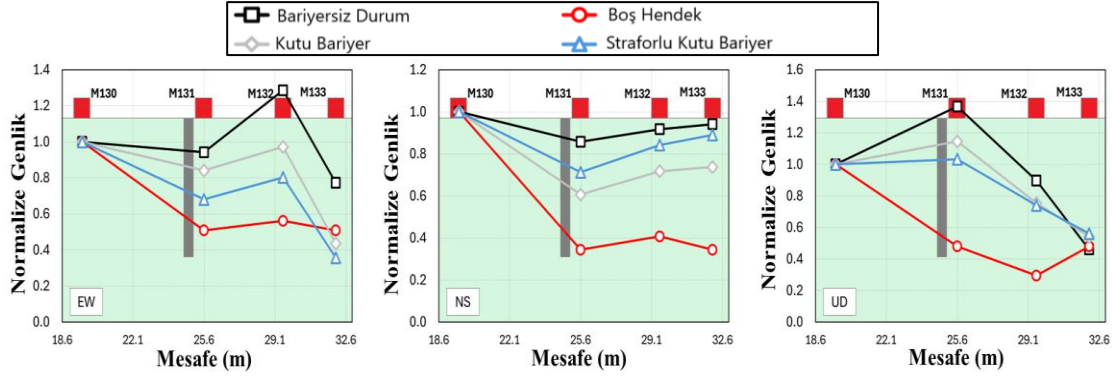
M132 ivmeölçeri ise; bariyerin arka tarafında ve M131'den daha uzak bir konumda yer almakta olup, dalga yayılımının bariyer sonrasında nasıl evrildiğini değerlendirme imkânı sunmaktadır. EW doğrultusunda normalize edilmiş RMS değerleri bakımından boş hendek uygulaması, bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %44 oranında bir azalma sağlamıştır. Kutu bariyer uygulaması ile yaklaşık %28, straforlu kutu bariyer ile ise yaklaşık %35 azalma kaydedilmiştir. NS doğrultusunda boş hendek uygulaması, RMS ivme değerlerini yaklaşık %44 oranında azaltmıştır. Kutu bariyer uygulaması yaklaşık %36, straforlu kutu bariyer uygulaması ise yaklaşık %27 düzeyinde azalma sağlamıştır. Bu sonuç, kutu bariyer sisteminin özellikle NS yönünde, yani bariyere dik doğrultudaki titreşimlerde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.9. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait bariyerin hemen arkasındaki RMS İvme azalım yüzdeleri

İvmeölçer	Yön	Bariyer Tipi	Normalize RMS İvme Azalımı (%)
M131	EW	Boş Hendek	45%
M131	EW	Kutu Bariyer	32%
M131	EW	Straforlu Kutu Bariyer	38%
M131	NS	Boş Hendek	47%
M131	NS	Kutu Bariyer	33%
M131	NS	Straforlu Kutu Bariyer	30%
M131	UD	Boş Hendek	38%
M131	UD	Kutu Bariyer	25%
M131	UD	Straforlu Kutu Bariyer	29%

M133 ölçüm noktası, bariyerden en uzak konumda yer almakta olup, bariyerlerin etkisinin mesafe ile nasıl değiştiğini değerlendirme imkanı sunmaktadır. EW yönünde boş hendek uygulaması, bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %49 oranında azalma sağlamıştır. Kutu bariyer uygulaması ile %33, straforlu kutu bariyer ile ise yaklaşık %38 düzeyinde bir sönümleme elde edilmiştir. Bu sonuçlar, her üç sistemin de yatay yönlü dalga bileşenlerini etkin bir şekilde azalttığını; ancak boş hendek uygulamasının bu yönde daha baskın bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. NS doğrultusunda boş hendek yaklaşık %64, kutu bariyer %54, straforlu kutu bariyer ise %30 oranında azalma sağlamıştır. Bu yön, kaynağa dik olması nedeniyle dalga yayılımının en etkili olduğu doğrultudur ve bu bağlamda tüm sistemlerin yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Düşey doğrultuda ise, bariyer uygulamaları kayda değer bir titreşim azalımı gösterememiş, straforlu kutu bariyer ise %35 oranında bir artış üretmiştir. Bu beklenmedik artış, düşük genlikli UD bileşenlerinde normalizasyon işleminin küçük farkların oransal olarak büyümesine yol açmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte zemin tabakalarının heterojenliği de bu artışın diğer olası nedenleri arasında değerlendirilebilir.

Kutu bariyer sistemlerinin farklı yönlerdeki (EW, NS ve UD) titreşim sönümleme performanslarının, ölçüm noktasına olan mesafe ile nasıl değiştiğini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla normalize edilmiş genlik verileri üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında, her senaryoda yük kaynağına en yakın konumda yer alan M130 ivmeölçer noktasındaki maksimum genlik değeri referans alınmış; diğer tüm noktadaki ivme genlikleri bu referans değerine bölünerek normalize edilmiştir. Böylece, genlik değerleri mutlak büyüklükler yerine, kaynak noktasına göre göreceli yanıtlar üzerinden ifade edilmiştir. Bu yaklaşım, "Normalized Amplitude Response", yani "Normalize Genlik Davranışı" olarak adlandırılmakta olup, bariyerin mesafe ile değişen etkisini doğrudan yansıtan ve dalga yayılımının konum bazlı karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak sunmayı sağlayan bir yöntemdir. Normalize genlik, sistemin belirli bir referansa göre verdiği göreceli yanıtı ortaya koyar. Bu yönüyle, farklı bariyer türlerinin (boş hendek, kutu bariyer, strafor dolgu kutu bariyer) titreşim yayılımını nasıl değiştirdiği görsel olarak daha net bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Farklı yönlerdeki (EW, NS ve UD) normalize edilmiş genlik yanıtlarının, mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiği Şekil 4.26'daki grafiklerde sunulmaktadır.

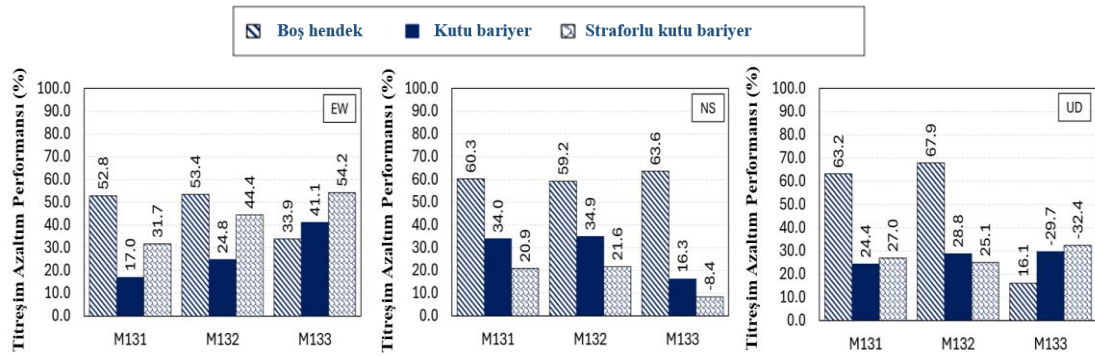


Şekil 4.26. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.26'de, 250 km/sa'lık tren geçişleri sırasında elde edilen EW, NS ve UD yönlerindeki normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak değişimi sunulmaktadır. Analiz, M130 ölçüm noktasındaki maksimum ivme genliğinin referans alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece her bariyer durumunda genliklerin kaynak noktasına göre göreceli değişimi değerlendirilmiştir. EW yönünde boş hendek durumu, en belirgin azalma sağlayan sistem olarak öne çıkarken; M131 noktasında 0.5 seviyesine düşen genlik, M133'e kadar düşük kalmaya devam etmiştir. Straforlu sistem ise M133 noktasında %30 civarında daha düşük genlik göstermiştir. Kutu bariyerin sönümleme etkisi ise daha sınırlı kalmış, genlikler 0.8-0.9 aralığında seyretmiştir. NS yönü, 250 km/sa'lık tren geçişlerinde en belirgin sönümlemenin gözlemlendiği yönlerden biridir. Boş hendek durumu M131 noktasında 0.4 seviyesine kadar düşüş sağlamıştır. Straforlu sistemin de bu noktada 0.5 civarında değer üretmesi, bu yön için oldukça etkili bir sönümleme sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bariyersiz durumda M132 ve M133 noktalarında normalize genliklerin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, zemindeki yansımaların oluşturduğu etki nedeniyle gerçekleşebileceği gibi, normalize işlemi sırasında referans alınan M130 noktasındaki genliklerin diğer ölçüm noktalarına kıyasla daha düşük kalmasından da kaynaklanabilmektedir. Straforlu sistemin ise M133'e kadar daha dengeli bir azalma çizgisi sunduğu görülmektedir. Boş hendek durumu ise özellikle M131 sonrası konumlarda etkili bir sönümleme sunarak genliği 0.3-0.4 aralığına kadar düşürmüştür. Straforlu kutu bariyer bu yön için hem M131'deki artışı sınırlamış hem de M133 noktasında düşük bir genlik değeri (yaklaşık 0.4) sağlamıştır. Bu yön için de straforlu sistemin, kutu bariyere kıyasla daha başarılı olduğu söylenebilir. 250 km/sa'lık tren geçişleri sırasında oluşan zemin titreşimlerinin normalize genlik yanıtları dikkate alındığında; dalga yayılımı yönü, mesafe ve bariyer tipi arasında güçlü bir etkileşim

olduğu görülmektedir. Serbest zemin koşullarında belirli yönlerde genlik artışları meydana gelirken; özellikle boş hendek ve straforlu kutu bariyer bu artışı kontrol altına alarak, mesafeye bağlı etkin bir sönümleme sunmuştur. NS ve UD yönlerinde en güçlü genlik azalmasının boş hendek ve straforlu kutu bariyerle sağlandığı gözlenmiştir.

Bariyersiz durum ile boş hendek, kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları arasındaki titreşim azaltım performans farklarının belirlenebilmesi amacıyla; farklı mesafelerde ve yönlerde elde edilen normalize genliklerin maksimum mutlak değerlerinin yüzdelik azalimleri Şekil 4.27'deki bar grafikleriyle sunulmaktadır.



Şekil 4.27. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait titreşim azaltım yüzdelikleri.

Şekil 4.27'de, tüm bariyer tiplerinin (boş hendek, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer) üç farklı doğrultuda ve bariyerin arkasındaki ölçüm noktalarından elde edilen normalize genliklerin maksimum mutlak değerlerinin azaltım oranları yüzdesel olarak karşılaştırılmaktadır:

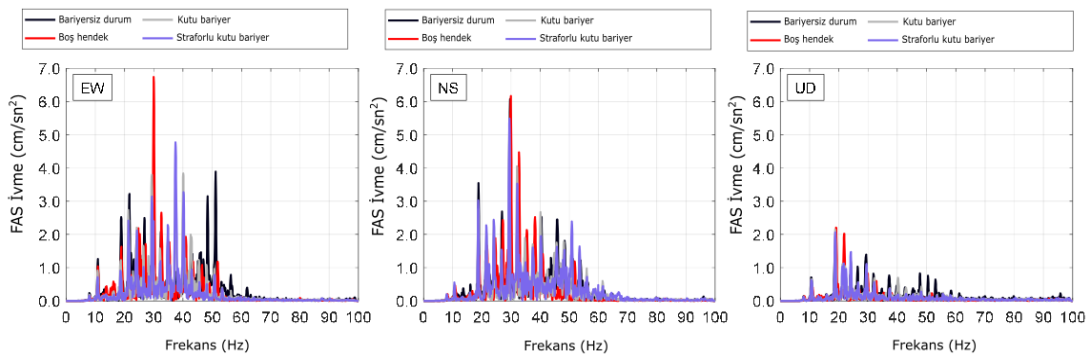
- EW yönü incelendiğinde, boş hendek uygulaması sırasıyla M131, M132 ve M133 noktalarında %52.8, %53.4 ve %41.1 oranlarında genlik azaltımı sağlamıştır. Buna karşılık, kutu bariyer aynı noktalarda sırasıyla %17, %24.8 ve %33.9'luk bir azaltım gösterirken; straforlu kutu bariyer %31.7, %44.4 ve %54.2 oranlarında genlik azaltımı gerçekleştirmiştir. EW yönünde özellikle M133 noktasında straforlu sistemin diğerlerinden daha başarılı olduğu dikkat çekmektedir.
- NS yönünde boş hendek uygulaması, M131, M132 ve M133 noktalarında sırasıyla; %60.3, %59.2 ve %63.6 oranlarında genlik azaltımı sağlamıştır. Kutu bariyerin aynı noktalarda sağladığı azaltım oranları %34.0, %34.9 ve %16.3 iken, straforlu kutu bariyerin sağladığı azaltım oranları %20.9, %21.6 ve %8.4 olarak ölçülmüştür. NS yönü, hem boş hendek hem de kutu bariyer

uygulamalarında yüksek performans göstermesine rağmen, straforlu kutu bariyerin bu yöndeki performansının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

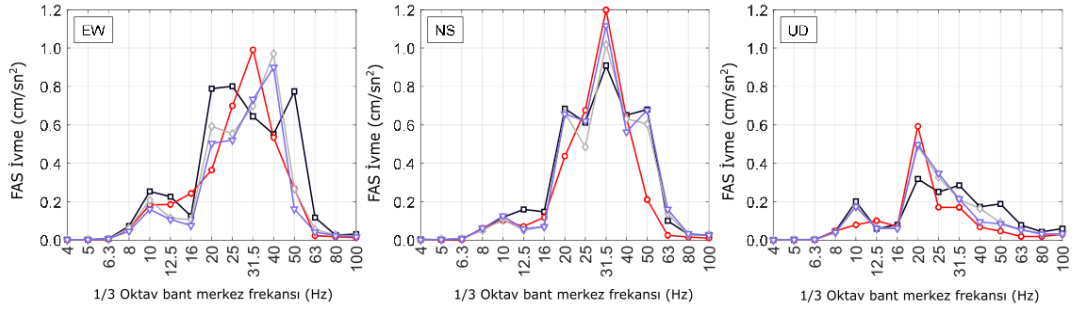
- UD yönü açısından değerlendirildiğinde, boş hendek uygulaması M131, M132 ve M133 noktalarında sırasıyla; %63.2, %67.9 ve %29.7 oranlarında genlik azaltımı sağlamıştır. Kutu bariyer ise aynı noktalarda %24.4, %28.8 ve %16.1'lik bir performans göstermiştir. Straforlu kutu bariyerin genlik azaltım oranları ise M131 için %27.0, M132 için %25.1 ve M133 için %32.4 olarak belirlenmiştir. UD yönünde ise M133 noktasında straforlu kutu bariyerin boş hendeğe göre daha iyi performans gösterdiği dikkat çekmektedir.

Boş hendek uygulaması tüm yönlerde ve ölçüm noktalarında en yüksek genlik azaltım oranlarını sunmuş, özellikle NS yönünde %60'ın üzerinde performans sergilemiştir. Bununla birlikte; kutu bariyer uygulaması boş hendeğe kıyasla daha düşük ancak yine de anlamlı genlik azaltımları sağlamıştır. Straforlu kutu bariyer uygulaması ise, çoğu durumda kutu bariyerden daha düşük performans göstermiştir; ancak bazı noktalarda (özellikle EW yönünde M133 ve UD yönünde M133) daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

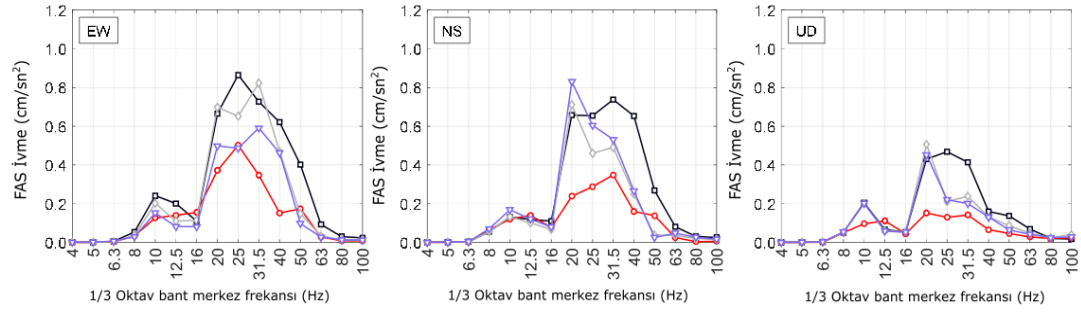
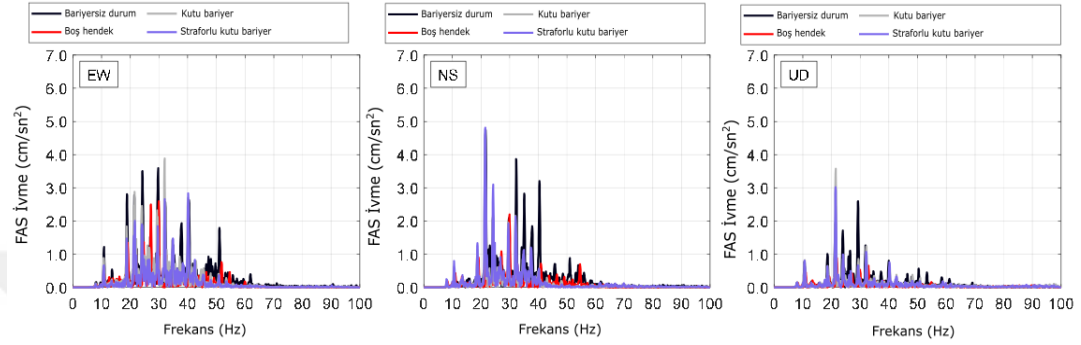
Normalize edilmiş zaman tanım alanlı analizlere ek olarak, bariyerlerin frekans alanındaki performanslarını değerlendirmek amacıyla, Fourier Spektral İvme (FAS) analizleri ve 1/3 oktav bant merkez frekansları üzerinden spektral değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, her bir bariyer uygulamasının belirli frekans aralıklarındaki etkinliğini ortaya koymak amacıyla Şekil 4.28'de sunulmuştur.



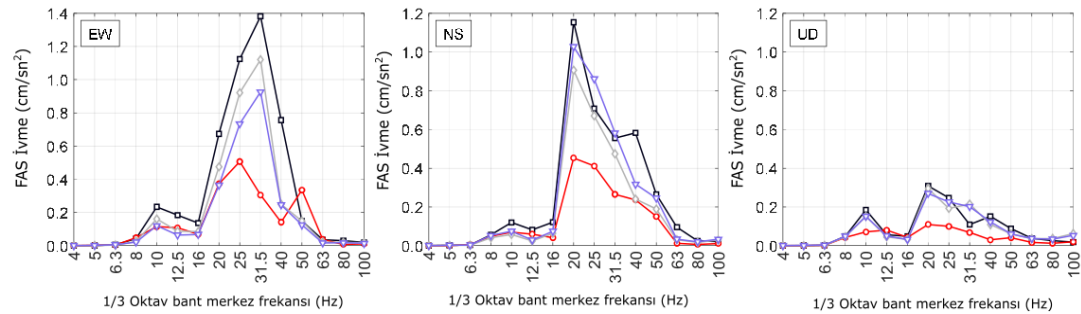
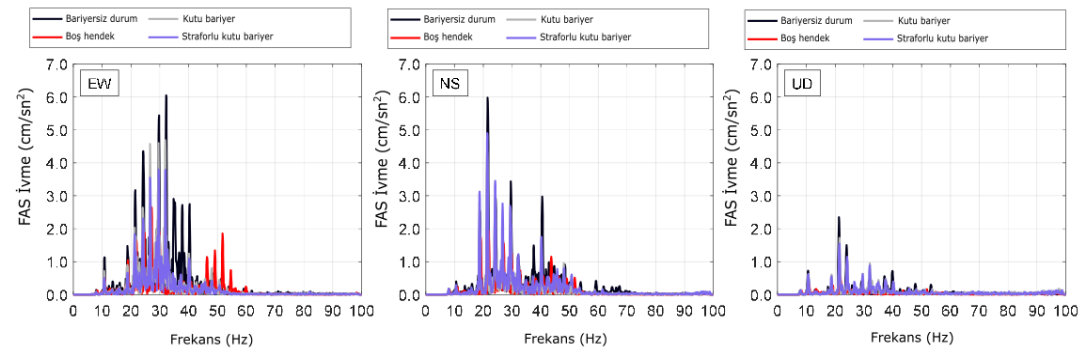
Şekil 4.28. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.



(a) M130

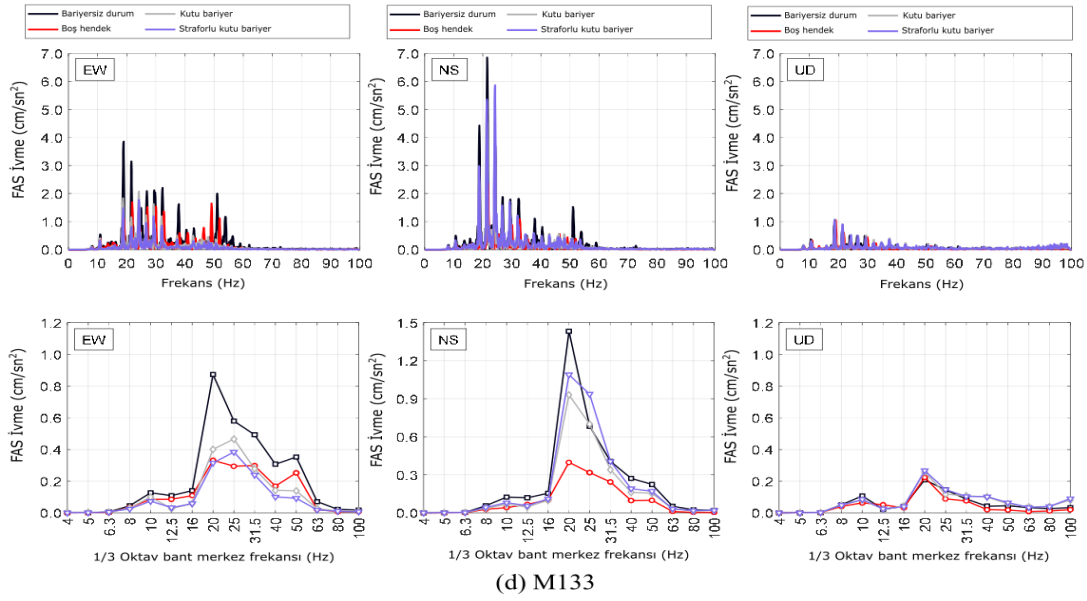


(b) M31



(c) M132

Şekil 4.28. (Devamı) 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.



Şekil 4.28. (Devamı) 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.

M130 ivmeölçerinin spektral analizi, bariyerin önündeki dalga karakteristiğini ortaya koymaktadır. Ham FAS spektrumunda, EW ve NS yönlerinde en yüksek genliklerin 30-35 Hz aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle EW yönünde 32 Hz civarında belirgin bir tepe değeri oluşmuştur. Boş hendek uygulaması, 30-40 Hz frekans aralığında titreşim genliklerinde yaklaşık %40 oranında bir azaltım sağlamıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları ise, 20-40 Hz arasında %20-25 seviyelerinde bir sönümlleme gerçekleştirmiştir. 1/3 Oktav Bant analizi incelendiğinde ise; EW ve NS yönlerinde, özellikle 25 Hz ve 31.5 Hz merkez frekanslarında bariyerli durumların FAS değerlerinde bariyersiz duruma kıyasla %30-40 oranında bir düşüş izlenmiştir. UD yönünde ise, tüm frekans aralıklarında bariyer etkisi sınırlı kalmış, ancak 20-31.5 Hz bantlarında %15-20 civarında bir iyileşme sağlanmıştır.

Tablo 4.10. 250 km/sa'lık tren geçişlerine ait fourier genliklerinin bariyerin hemen arkasındaki azalım yüzdeleri.

İvmeölçer	Analiz Türü	Yön	Frekans Bandı	Bariyer Tipi	FAS İvme (%)
M131	1/3 Oktav	EW	16-31.5 Hz	Boş Hendek	50%
M131	1/3 Oktav	EW	25-31.5 Hz	Kutu Bariyer	38%
M131	1/3 Oktav	EW	25-31.5 Hz	Straforlu Kutu Bariyer	33%
M131	1/3 Oktav	NS	16-63 Hz	Boş Hendek	50%
M131	1/3 Oktav	NS	25-63 Hz	Kutu Bariyer	38%
M131	1/3 Oktav	NS	25-63 Hz	Straforlu Kutu Bariyer	33%
M131	1/3 Oktav	UD	16-63 Hz	Boş Hendek	50%
M131	1/3 Oktav	UD	25-63 Hz	Kutu Bariyer	35%
M131	1/3 Oktav	UD	25-63 Hz	Straforlu Kutu Bariyer	30%

M131 ivmeölçeri, bariyerin hemen arkasında yer aldığından, kutu bariyer sistemlerinin frekans bazlı izolasyon performansını en doğrudan yansıtmakta olup, kritik bir ölçüm noktasıdır. Yapılan 1/3 oktav bant analizine göre, tüm yönlerde (EW, NS ve UD) titreşim enerjisinin en yoğun olduğu frekans bandının 16-31.5 Hz aralığı olduğu tespit

edilmiştir. Özellikle EW ve NS yönlerinde, 20 Hz, 25 Hz ve 31.5 Hz merkez frekanslarında önemli spektral azalmalar kaydedilmiştir. Bu frekans bantlarında, boş hendek uygulaması yaklaşık %50'ye varan bir azaltım sağlayarak en yüksek izolasyon performansını göstermiştir (Tablo 4.10). Kutu bariyer uygulaması, özellikle 25 Hz ve 31.5 Hz merkez frekanslarında boş hendek uygulamasına kıyasla daha sınırlı olmakla birlikte, %35-40 aralığında bir spektral azaltım gerçekleştirmiştir. Öte yandan, straforlu kutu bariyer uygulaması, kutu bariyere göre biraz daha düşük bir performans sergileyerek aynı frekans bantlarında %30-35 oranında bir azalma üretmiştir. UD yönünde de benzer bir eğilim gözlenmiş; boş hendek uygulaması 16-20 Hz bantlarında yaklaşık %50 oranında bir azaltım sağlarken, kutu bariyer yaklaşık %35, straforlu kutu bariyer ise %30 civarında bir iyileşme sunmuştur. Ayrıca, NS yönünde tüm bariyer uygulamalarının 25-63 Hz frekans aralığında belirgin bir sönüm etkisi sağladığı ve titreşim enerjisinin bu bant içinde etkili bir şekilde azaltıldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kutu bariyer uygulamasının straforlu kutu bariyere kıyasla titreşim enerjisinin azaltılmasında daha etkili olduğunu ve strafor katkısının bu ölçüm noktasında izolasyon performansını sınırlı oranda artırabildiğini göstermektedir.

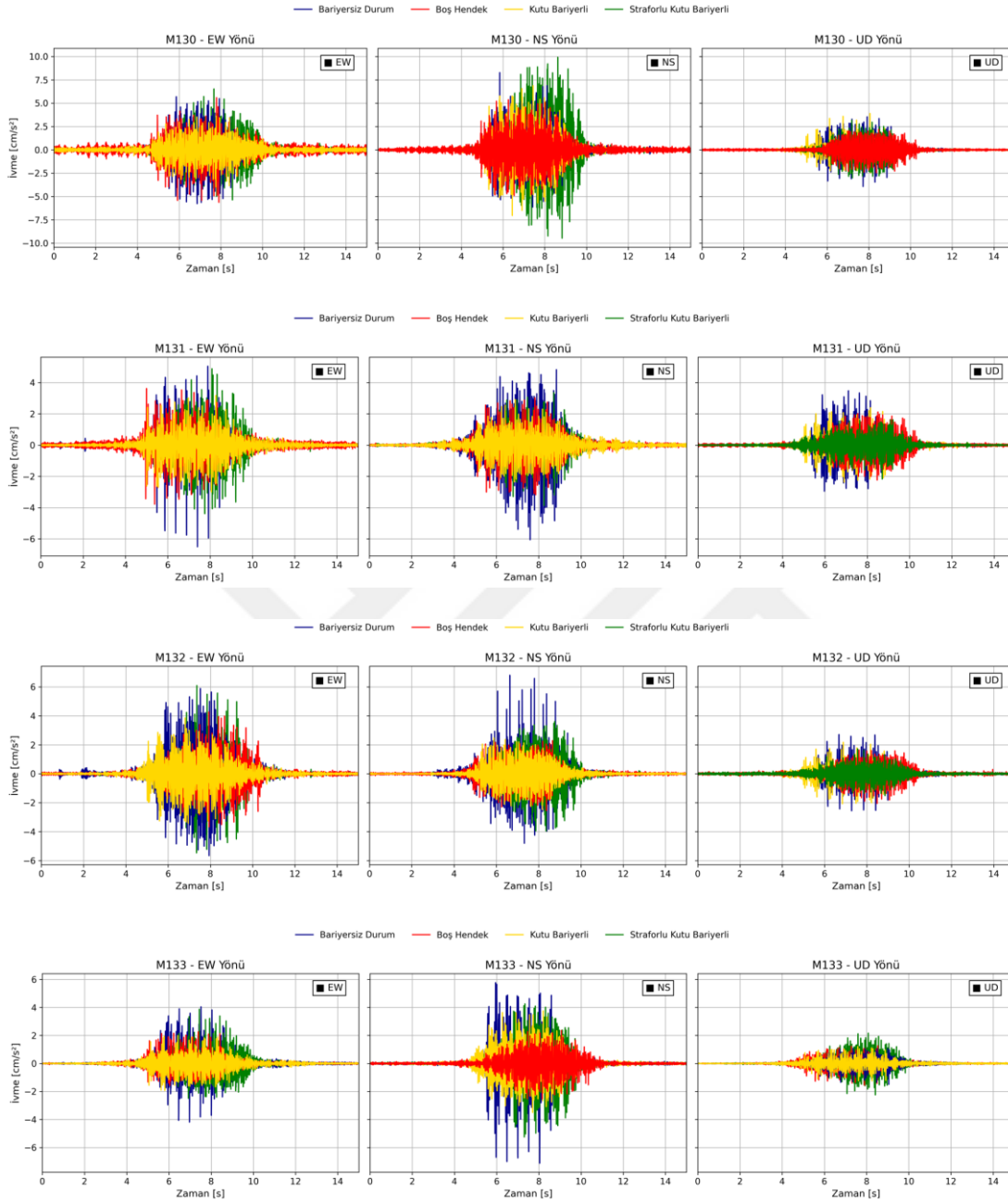
M132 ivmeölçerinin olduğu noktada; boş hendek uygulaması, 25-40 Hz frekans aralığında titreşim enerjisinde yaklaşık %40-50 azalma sağlamıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer ise 20-31.5 Hz bantlarında %25-35 arasında etkili olmuştur. 1/3 Oktav Bant analizlerinde EW ve NS yönlerinde 20 Hz ve 25 Hz merkez frekanslarında önemli spektral azaltımlar gözlenirken, UD yönünde 16–20 Hz arasında %15-20 civarında sınırlı bir azalma kaydedilmiştir. 1/3 Oktav Bant analizlerinde en anlamlı azalmalar 16-31.5 Hz aralığında gerçekleşmiştir.

Bariyere en uzak bölge olan M133 ivmeölçerinin konumlandırıldığı noktada ise; boş hendek uygulaması, 20-31.5 Hz frekans bandında %40-50 aralığında belirgin bir azaltım sağlamıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları da bu bantlarda %25-40 seviyelerinde etkili olmuştur. 1/3 Oktav Bant analizlerinde; EW ve NS yönlerinde 20 Hz, 25 Hz ve 31.5 Hz frekanslarında belirgin spektral azaltımlar gözlenmiştir.

4.7.1.2.2. 160 km/sa hızındaki tren geçişleri sırasında ölçülen zemin titreşimleri

Zemin titreşimi ölçümlerinin değerlendirilmesinin bir sonraki aşaması, ivmeölçerlerden elde edilen ham verilerin incelenmesinden oluşmakta olup; ‘160

km/sa'lik tren geçişleri'ne ait ham verilerin ivme-zaman karşılaştırmaları Şekil 4.29'da sunulmuştur.



Şekil 4.29. 160 km/sa'lik tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı ivme-zaman ilişkileri.

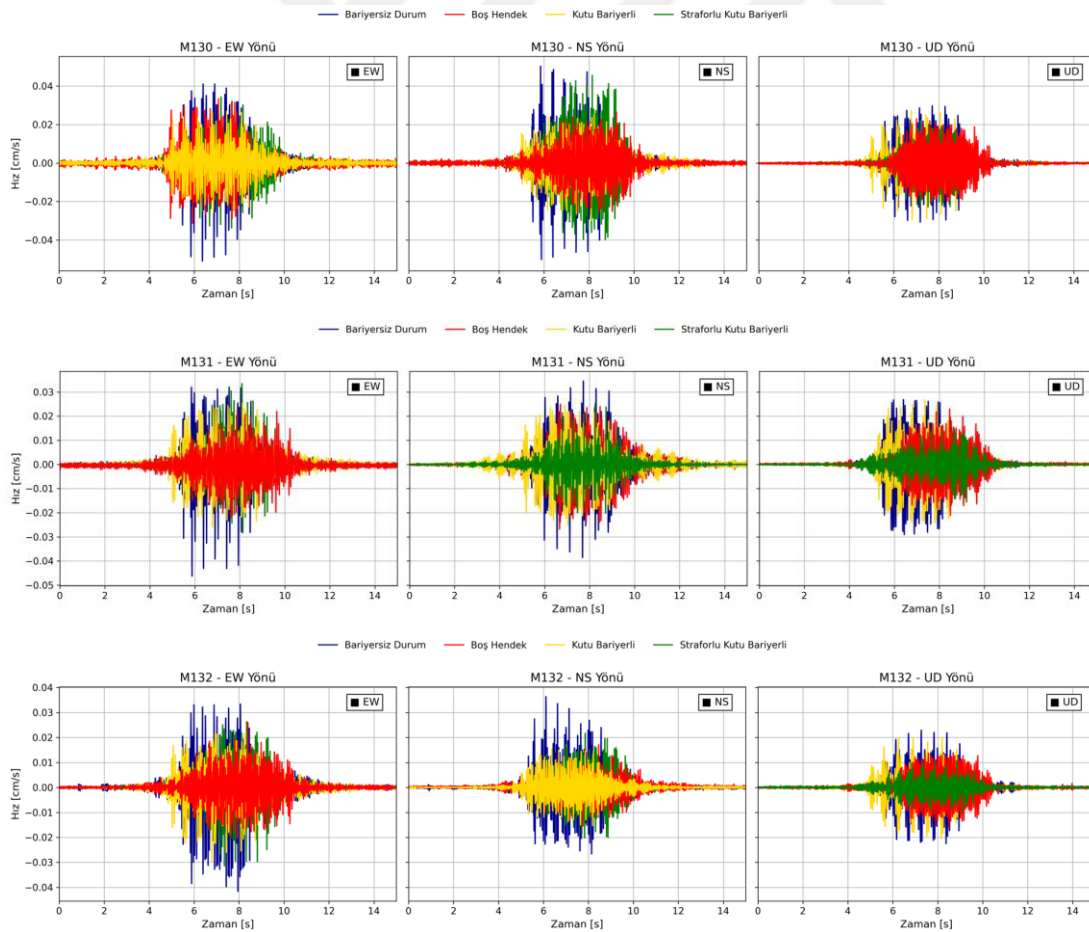
Şekil 4.29'da sunulan 160 km/sa'lik tren geçişlerine ait ham ivme-zaman eğrileri değerlendirildiğinde, elde edilen ilk dikkat çekici bulgu; bariyerin hemen arkasında yer alan M131 ivmeölçerinden kaydedilen kutu bariyere ait titreşim genliklerinin, hem doğu-batı (EW), hem de kuzey-güney (NS) yönünde, bariyersiz duruma kıyasla belirgin şekilde azalmış olmasıdır. Bariyerin önünde konumlandırılan M130

ivmeölçerine ait ölçümlerde, kutu bariyer durumunun EW yönündeki ivme değeri 39.93 mm/s² olup, bariyersiz duruma kıyasla %30.7 oranında azalma göstermiştir. Strafor dolgulu kutu bariyer ise 65.33 mm/s² ile ivme büyüklüğünü %13.3 oranında artırmıştır. Bu noktada yapılan ölçüm, bariyerin ön tarafında gerçekleştirildiğinden; gözlemlenen genlik artışı, dalga yansıması sonucu oluşan büyütme etkisinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bariyerin hemen arkasında bulunan M131 ivmeölçerinden alınan veriler değerlendirildiğinde; boş hendek durumunun EW yönündeki ivme genliklerini %41.8 oranında, kutu bariyerin %51.2 oranında, strafor dolgulu kutu bariyerin ise %24.9 oranında azalttığı görülmüştür. EW yönünde kutu bariyerin, boş hendeğe kıyasla daha etkili bir yalıtım performansı sunduğu; straforlu kutu bariyerin ise daha sınırlı bir azalma sağladığı söylenebilir. Bu durumun temel nedeni, değerlendirmelerin ham ivme verileri üzerinden yapılmasıdır. Ham veriler, çevresel etkiler ve ölçüm anındaki rastlantısal faktörler nedeniyle teorik beklentilerden sapmalara yol açabilmektedir. Bununla birlikte, karşılaştırılan tren setlerinin titreşim üretimi bakımından en elverişsiz koşulları oluşturması, boş hendeğin teorik olarak beklenen en yüksek izolasyon performansını her yön için sergileyememesine neden olmuştur. Ancak, 160 km/sa'lik tren geçişlerinin ürettiği titreşimler üzerinde; kutu bariyerin boş hendeğe oldukça yaklaşan performans sergilemesi, sistemin etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. M132 noktasında ise boş hendek yaklaşık %27.5 azalma sağlarken, kutu bariyer %34.5 oranında azalma sunmuş; straforlu kutu bariyer ise %3 oranında bir artış göstermiştir. Bariyere en uzak olan M133 ivmeölçerinden alınan verilerde ise boş hendek ve kutu bariyerin sırasıyla %46 ve %53.5 oranlarında başarılı bir izolasyon sağladığı, straforlu kutu bariyerin ise %8 oranında artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

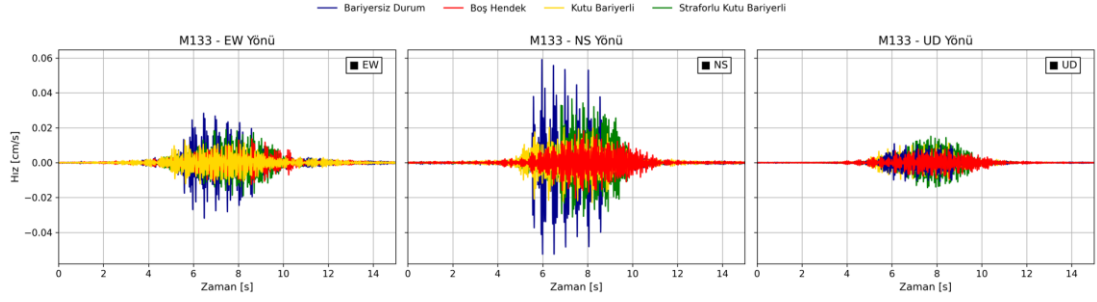
NS yönünden alınan ivme değerleri incelendiğinde, bariyerin hemen arkasındaki M131 noktasında boş hendek %48.4 oranında azalma sağlarken; kutu bariyer %64.8 ve straforlu kutu bariyer %64.2 oranlarında oldukça yüksek bir yalıtım performansı sergilemiştir. M132 noktasında boş hendek %62.6 oranında azalma sağlamış; kutu bariyer %63.8 ve straforlu sistem ise %44.3 oranında azalma göstermiştir. Bariyere en uzak olan M133 ölçüm noktasında ise boş hendek %71.5 oranında etkili bir azalma sunarken; kutu bariyer %48.1 ve straforlu sistem %38.2 oranında azalma göstermiştir. NS yönü, her üç bariyer senaryosunda da yüksek oranda sönümleme etkisinin gözlemlendiği doğrultu olmuştur.

UD yönünden alınan ivme değerleri incelendiğinde ise, bariyerin hemen arkasındaki M131 noktasında boş hendek durumu %35.8 oranında azalma sunarken; kutu bariyer %39.2 oranında azalma göstermiş, straforlu kutu bariyer ise %43.6 oranında bir azalma sağlamıştır. M132 noktasında boş hendek yaklaşık %47.6 azalma sağlamış; kutu bariyer %56.2 ve straforlu sistem %62.1 oranlarında daha yüksek bir sönümleme etkisi sunmuştur. Bu bulgular, UD yönünde özellikle kutu bariyerin boş hendeğe göre daha yüksek bir yalıtım performansı sunduğunu göstermektedir. Ancak yine buradaki değerlendirmelerin ham ivme verileri üzerinden yapıldığını ve karşılaştırılan tren setlerinin titreşim üretimi açısından en elverişsiz koşulları oluşturan setler olduğunu hatırlatmakta fayda vardır.

İvmeölçerlerden elde edilen ivme genliklerinin değerlendirilmesi tamamlandıktan sonra, hız genlikleri incelenmiştir. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait ivmeölçer kayıtlarından alınan her 3 yöndeki ham verilerin hız-zaman karşılaştırmaları Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı hız-zaman ilişkileri.



Şekil 4.30. (Devamı) 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait her 3 doğrultudaki karşılaştırmalı hız-zaman ilişkileri.

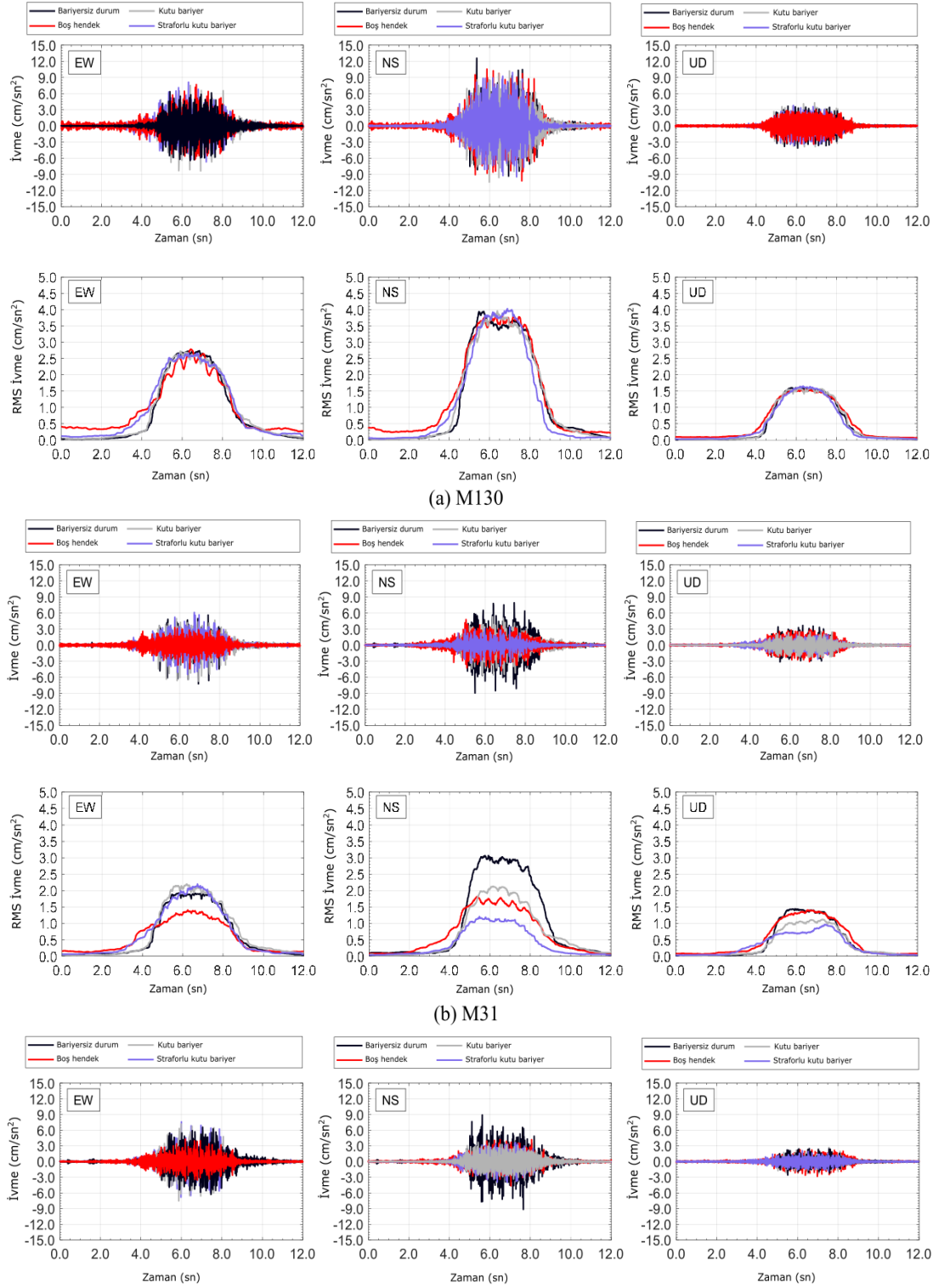
EW doğrultusundan elde edilen hız genlikleri incelendiğinde, bariyerin önündeki M130 ölçüm noktasında boş hendeğin yaklaşık %34 oranında azalma sağladığı görülmüştür. Kutu bariyerin bu yöndeki katkısı %47 oranında bir azalma iken, strafor dolgulu kutu bariyer hız genliklerinde %33 oranında azalma sunmuştur. Bariyerin hemen arkasındaki M131 ölçüm noktasında ise boş hendeK %52 oranında izolasyon sağlamış, kutu bariyer %45, strafor dolgulu kutu bariyer ise %32 oranında titreşim azaltması göstermiştir. M132 noktasında boş hendeK yaklaşık %38 oranında hız azalması sunmuş, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer ise %29-23 oranlarıyla benzer yalıtım performansları göstermiştir.

NS yönünden alınan hız değerleri incelendiğinde, bariyerin hemen arkasındaki M131 ölçüm noktasında boş hendeK %31 oranında titreşim yalıtımı sağlarken, kutu bariyer %34 ve straforlu kutu bariyer %35 oranında benzer seviyelerde azalma sunmuştur.

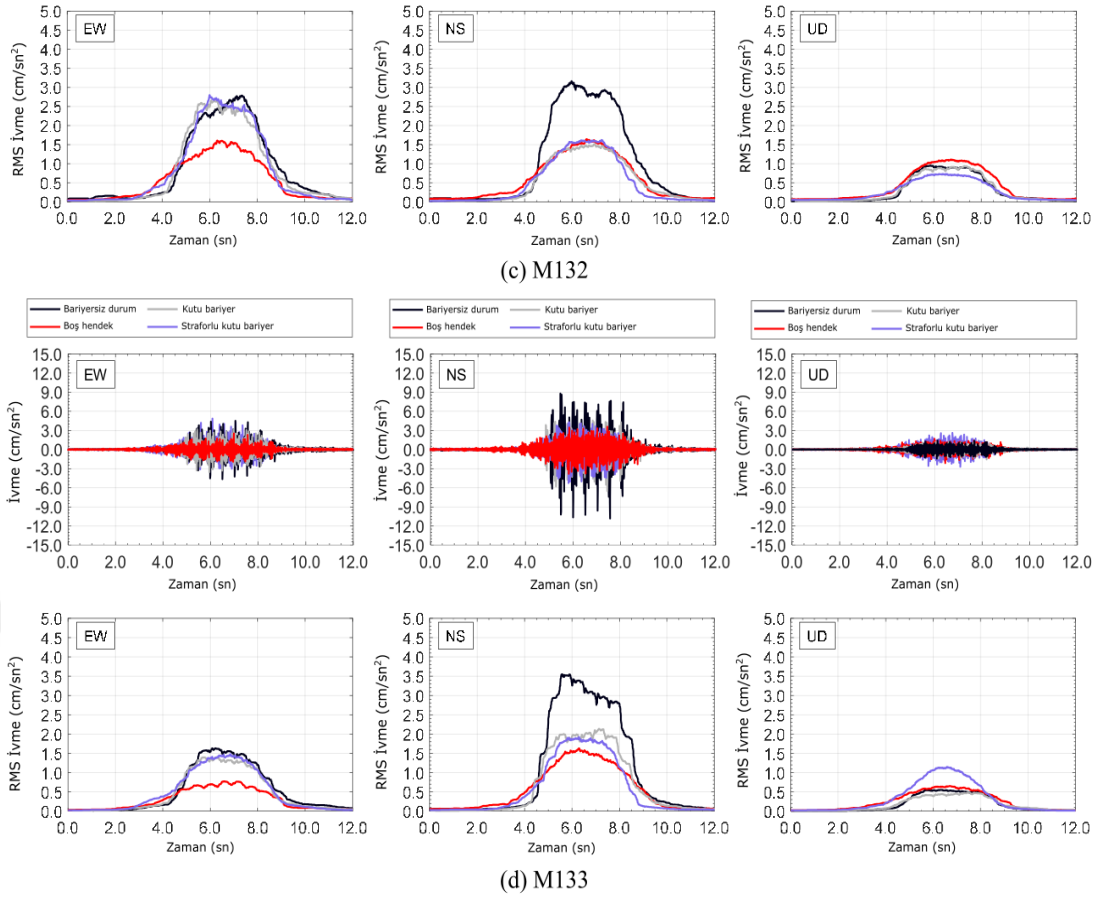
UD yönünden ölçülen hız değerleri değerlendirildiğinde, bariyerin hemen arkasındaki M131 noktasında boş hendeK; hız genliklerini %22 oranında azaltırken, kutu bariyer %49 ve straforlu kutu bariyer %13 oranında genlik azaltması göstermiştir.

160 km/sa'lık tren geçişleri sırasında oluşan ham titreşimlerin en yüksek değerleri arasındaki standart sapmanın azaltılması ve bu sayede farklı senaryoların titreşim performanslarının daha sağlıklı karşılaştırılabilmesi amacıyla, yük kaynağındaki ivme büyüklüklerinin tüm durumlar için dengelenmesi gerekmiştir. Önceki bölümde de anlatılan yöntem tekrar edilerek; ham ivme değerleri normalize edilmiştir. Böylece her bir tren geçişinde, aynı yöndeki ivme verileri ortak bir yük büyüklüğüne referanslanmış ve doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Normalize işleminin ardından, ivme-zaman ilişkileri RMS yöntemiyle yumuşatılarak çizdirilmiş ve sonuçlar 160 km/sa'lık tren geçişlerine özel olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, kutu bariyerin titreşim enerjisini azaltma kapasitesi hem insan konforu hem de hassas

ekipmanlar üzerindeki etkisi açısından daha açık bir şekilde analiz edilebilmiştir. Normalize edilmiş ivme-zaman eğrileri ve A_{RMS} -zaman eğrilerinin farklı yönler (EW, NS, UD) için karşılaştırılması Şekil 4.31’de sunulmaktadır.



Şekil 4.31. 160 km/sa’lık tren geçişlerine ait normalize edilmiş ivme-zaman ve A_{RMS} -Zaman ilişkileri.



Şekil 4.31. (Devamı) 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize edilmiş ivme-zaman ve ARMS-Zaman ilişkileri.

Bariyerin önünde yer alan M130 ivmeölçerinin EW doğrultusunda elde edilen normalize edilmiş RMS ivme eğrileri incelendiğinde, tüm bariyerli uygulamalarda bariyersiz duruma kıyasla belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle boş hendek durumunda, en yüksek RMS ivme değerinin bariyersiz duruma göre yaklaşık %9 oranında arttığı hesaplanmıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamalarında da sırasıyla %4 ve %6 seviyelerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, bariyer önünde yansıyan dalgaların birikerek genlikleri artırmasıyla açıklanabilir. NS yönünde de benzer bir eğilim izlenmiş, boş hendek uygulamasında yaklaşık %7'lik, kutu bariyerde %5'lik, straforlu kutu bariyerde ise %8'lik artış meydana gelmiştir. Düşey doğrultuda (UD) elde edilen normalize edilmiş RMS ivme eğrileri incelendiğinde, boş hendek uygulamasının bariyersiz duruma kıyasla belirgin bir azalma sağlamadığı, genliklerin hemen hemen aynı seviyede kaldığı gözlenmiştir. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamalarında ise bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %5 oranında küçük bir artış meydana gelmiştir. Bu bulgu, UD yönündeki dalga enerjisinin yatay

bileşenlere göre daha düşük yoğunlukta olduğunu ve bariyer yüzeylerinden yansıyan dalgaların düşey titreşim büyüklüklerine sınırlı bir katkı sağladığını göstermektedir.

Bariyerin hemen arkasındaki M131 ivmeölçerinin EW doğrultusunda, normalize RMS ivme değerleri açısından boş hendek uygulaması, bariyersiz duruma göre yaklaşık %35 oranında bir azalma sağlamıştır (Tablo 4.11). Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları ise sırasıyla yaklaşık %20 ve %23 düzeyinde azalma üretmiştir. NS doğrultusunda, boş hendek uygulaması yaklaşık %50 oranında bir azaltım sunmuştur. Kutu bariyer uygulaması %40, straforlu kutu bariyer ise yaklaşık %48 oranında bir azalma sağlamıştır. Bu sonuçlar; kutu bariyer uygulamasının, 160 km/sa'lık tren geçişleriyle yapılan deneylerde NS doğrultusunda, boş hendeğe çok yakın bir yalıtım performansı gösterdiğini kanıtlamaktadır. UD yönünde ise iyileşmeler daha sınırlı kalmıştır. Boş hendek durumu, bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %26 oranında bir azalma sağlamıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları ise sırasıyla %21 ve %33 oranlarında azaltım göstermiştir.

Tablo 4.11. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait bariyerin hemen arkasındaki RMS İvme azalım yüzdeleri

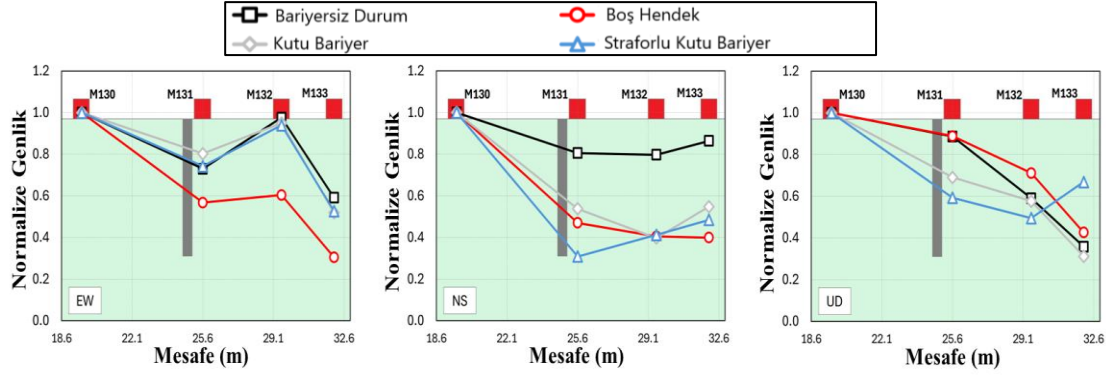
İvmeölçer	Yön	Bariyer Tipi	Normalize RMS İvme Azalımı (%)
M131	EW	Boş Hendek	35%
M131	EW	Kutu Bariyer	20%
M131	EW	Straforlu Kutu Bariyer	23%
M131	NS	Boş Hendek	50%
M131	NS	Kutu Bariyer	40%
M131	NS	Straforlu Kutu Bariyer	48%
M131	UD	Boş Hendek	26%
M131	UD	Kutu Bariyer	21%
M131	UD	Straforlu Kutu Bariyer	33%

M132 ivmeölçeri, bariyerin hemen arkasında konumlanan M131'e göre daha uzak bir noktada yer almakta olup, dalga yayılımının bariyer etkisi altındaki mesafeye olan durumunu değerlendirmek açısından önemlidir. EW yönünde değerlendirildiğinde, boş hendek uygulaması bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %39 oranında RMS ivme azaltımı sağlamıştır. Kutu bariyer yaklaşık %10, straforlu kutu bariyer ise %15 düzeyinde bir sönümleme etkisi sunmuştur. NS doğrultusunda ise boş hendek uygulaması %48'lik bir azalma sağlamış; kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları ise sırasıyla %44 ve %42 oranlarında ivme azaltımı üretmiştir. Bu veriler, NS yönünde tüm bariyer türlerinin yüksek performans gösterdiğini ortaya

koymaktadır. Öte yandan, düşey bileşende tüm bariyer uygulamaları sınırlı düzeyde iyileşme sağlamış; boş hendek %18, kutu bariyer %9 ve straforlu kutu bariyer %21 oranlarında azaltım üretmiştir. UD yönündeki bu sınırlı etki, düşey bileşende bariyer performansının yatay bileşenlere kıyasla daha zayıf kaldığını göstermektedir.

M133 konumu, bariyerin en uzak noktasındaki titreşim davranışını temsil etmekte olup; EW yönünde, boş hendek uygulaması, bariyersiz duruma kıyasla yaklaşık %54 oranında bir azalma sağlamıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer ise sırasıyla %36 ve %40 oranlarında titreşim genliğini düşürmüştür. NS doğrultusunda, boş hendek %48 oranında bir azalma üretmiş; kutu bariyer %41, straforlu kutu bariyer ise %45 oranında titreşim sönümlleme performansı sergilemiştir. UD yönünde ise yalnızca straforlu sistemde artış gözlenmiş; boş hendek ve kutu bariyer uygulamaları sırasıyla yaklaşık %6 ve %8 oranlarında zayıf bir azaltım sağlamıştır. Straforlu sistemde ise UD yönünde bariyersiz duruma göre yaklaşık %35 oranında bir artış meydana gelmiştir. Bu beklenmedik artış, düşük genlikli UD bileşenlerinde normalizasyon işleminin küçük farkların oransal olarak büyümesine yol açmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte zemin tabakalarının heterojenliği de bu artışın diğer olası nedenleri arasında değerlendirilebilir. Genel olarak M133 konumunda, yatay bileşenlerde izolasyon performansı güçlü bir şekilde korunmuş; straforlu sistem, NS yönünde kutu bariyere göre daha başarılı sonuçlar sunmuştur.

Kutu bariyer sistemlerinin yönler (EW, NS, UD) göre mesafeye bağlı sönümlleme etkilerini karşılaştırmalı olarak inceleyebilmek amacıyla, genlik verileri normalize edilerek analiz yapılmıştır. Bu kapsamda, kaynak noktasındaki (M130) maksimum genlik değeri referans alınmış ve diğer ölçüm noktalarındaki değerler bu referansa oranlanmıştır. Elde edilen normalize genlik yanıtları ("Normalized Amplitude Response"), dalga yayılımının bariyer etkisiyle nasıl değiştiğini görsel olarak değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm doğrultular için ayrı ayrı elde edilen normalize genlik yanıtları Şekil 4.32'de sunulmaktadır.

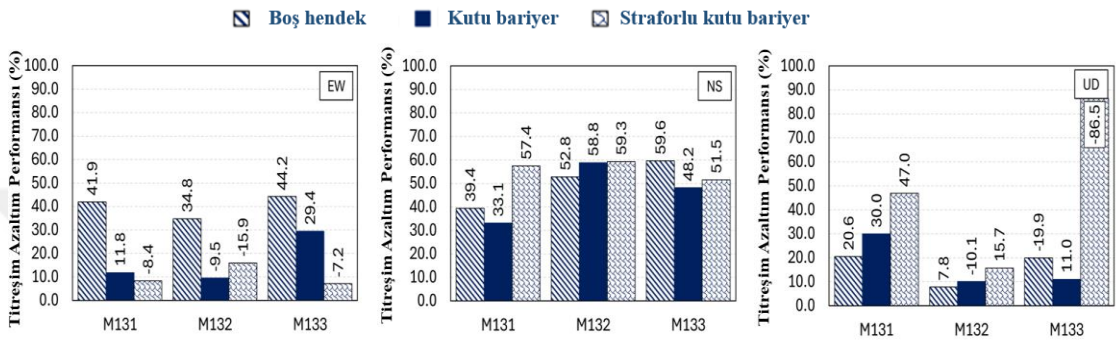


Şekil 4.32. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.32’de, 160 km/sa’lık tren geçişleri sırasında elde edilen EW, NS ve UD yönlerindeki normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir. EW yönünde, tüm senaryolarda M130 sonrası genlikte belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. En güçlü azalma boş hendek durumunda görülmüş, bu senaryoda M131 noktasında normalize genlik yaklaşık 0.55 seviyesine kadar düşmüştür. Kutu bariyer ise daha ılımlı bir sönümlleme etkisi sunmuştur. Straforlu sistemin M133 noktasında yeniden yükseliş göstermesi, bu yön için dalga yansıması etkilerinin hakim olduğunu düşündürmektedir. NS yönünde genlikteki azalmalar daha belirgindir ve tüm bariyer türleri etkili bir sönümlleme sağlamıştır. Özellikle M131 noktasında, boş hendek ve straforlu kutu bariyer durumlarında genlik değeri 0.5’in altına inmiştir. Bu yön, dalga yayılımının bariyere dik olması nedeniyle, bariyer sistemlerinin en etkili çalıştığı yön olarak öne çıkmaktadır. Straforlu sistemin, M132 noktasına kadar olan bölgede diğer sistemlere kıyasla daha başarılı bir sönümlleme sağladığı gözlemlenmiştir. UD yönündeki dalga bileşenlerinde ise genlikler mesafeye bağlı olarak sürekli bir azalma göstermektedir. M130 sonrası tüm senaryolarda düzenli bir azalma eğilimi gözlenmiştir. M133 noktasında en düşük normalize genlik değeri boş hendek durumunda kaydedilmiş, bunu kutu bariyer ve straforlu sistem takip etmiştir. Straforlu sistemin M132 noktasında düşük genlik üretmesi dikkat çekicidir, ancak M133’teki artış, bu yön için sınırlı bir etki mesafesi olabileceğini düşündürmektedir. Tüm yönler birlikte değerlendirildiğinde, normalize genlik yanıtlarının mesafeye bağlı olarak anlamlı ölçüde azaldığı ve bu azalmanın özellikle NS yönünde daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, bariyerin dalga geliş yönüne dik olduğu durumda daha etkili bir sönümlleme sağladığını ortaya koymaktadır. Boş hendek en yüksek sönümlleme performansını sunarken, strafor dolgulu kutu bariyer sisteminin belirli mesafelerde dengeli ve etkili bir performans sunduğu söylenebilir.

Normalize genlik yanıtlarının bu şekilde değerlendirilmesi, dalga yayılım karakteristiklerinin konuma ve doğrultuya dayanan analizlerine imkan sağlamıştır.

Bariyersiz durum ile boş hendek, kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları arasındaki titreşim azaltım performans farklarının belirlenebilmesi amacıyla; farklı mesafelerde ve yönlerde elde edilen, 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait normalize genliklerin maksimum mutlak değerlerinin yüzdelik azalimleri Şekil 4.33'teki bar grafikleriyle sunulmaktadır.



Şekil 4.33. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait titreşim azaltım performansları.

Şekil 4.33'te, 160 km/sa'lık tren geçişleri için üç farklı bariyer tipine (boş hendek, kutu bariyer ve strafor dolgulu kutu bariyer) ait normalize genliklerin maksimum mutlak değerlerinden hesaplanan titreşim azaltım performansları, yüzdelik olarak karşılaştırılmaktadır:

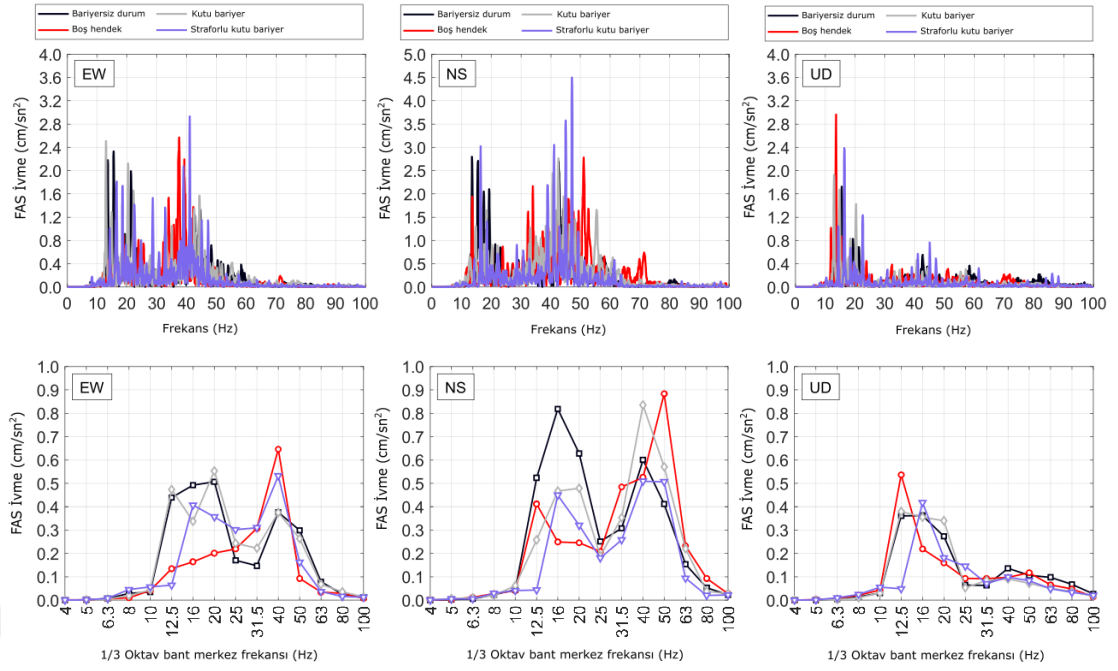
- EW yönü incelendiğinde; boş hendek uygulamasının M131, M132 ve M133 noktalarında sırasıyla %41.9, %34.8 ve %44.2 oranlarında azaltım sağladığı görülmektedir. Buna karşılık, kutu bariyer aynı noktalarda %11.8, %-9.5 ve %29.4 oranlarında, straforlu kutu bariyer ise %-8.4, %-15.9 ve %-7.2 oranlarında genlik değişimi sunmuştur. Straforlu sistemin bu yönde üç noktada da negatif performans göstermesi, önceki paragrafta da anlatıldığı üzere; normalizasyon işleminin küçük farkların oransal olarak büyümesine yol açmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte zemin tabakalarının heterojenliği de bu artışın diğer olası nedenleri arasında değerlendirilebilir. Özellikle M132 noktasında kutu ve straforlu sistemlerin performansı oldukça düşüktür.
- NS yönünde, tüm bariyer türleri pozitif azaltım değerleri sunmuştur. Boş hendek uygulaması, M131, M132 ve M133 noktalarında sırasıyla %39.4, %52.8 ve %59.6 oranlarında başarılı sonuçlar verirken; kutu bariyerin aynı

noktalardaki performansı %33.1, %59.3 ve %48.2 olarak belirlenmiştir. Straforlu kutu bariyer ise %57.4, %52.8 ve %51.5 oranlarında genlik azaltımı sağlamıştır. Bu yön, üç bariyer türü açısından da en yüksek performansın elde edildiği doğrultu olmuş; straforlu kutu bariyer de ilk kez diğer yönlerin aksine oldukça yüksek başarı göstermiştir.

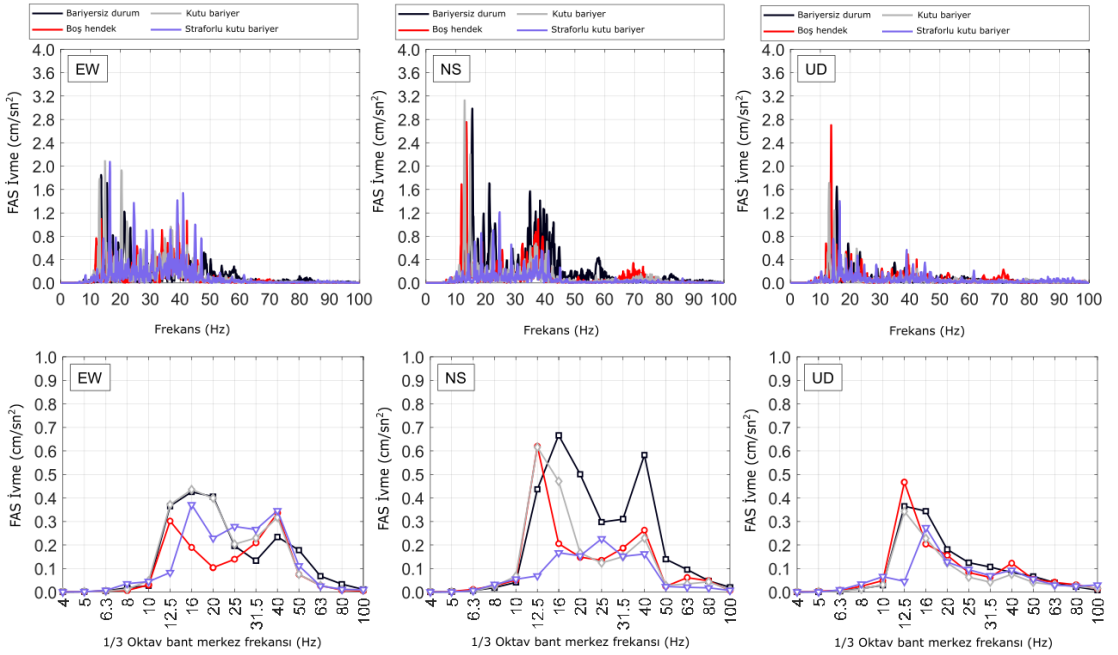
- UD yönü açısından değerlendirildiğinde, boş hendek uygulaması M131, M132 ve M133 noktalarında sırasıyla %20.6, %7.8 ve %15.7 oranlarında sönümleme sunmuştur. Kutu bariyerin aynı noktalardaki performansı %30.0, %-10.1 ve %-19.9 olarak ölçülmüş; straforlu kutu bariyer ise %47.0, %15.7 ve %-86.5 oranlarında genlik azaltımı sunmuştur. M131 noktasında straforlu kutu bariyer en yüksek azaltımı sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde; 160 km/sa'lik tren geçişlerinde NS yönü, tüm bariyer türleri için en etkili yön olarak öne çıkmaktadır. Boş hendek, EW ve NS yönlerinde çoğu noktada en yüksek performansı sunarken; UD yönünde bu başarısını sürdürmemiştir. Kutu bariyer, NS yönünde anlamlı azaltım değerleri gösterse de, EW ve UD yönlerinde özellikle M132 ve M133 noktalarında yetersiz kalmıştır. Straforlu kutu bariyer ise NS yönünde dikkat çekici bir performans sergilemiş; ancak diğer yönlerde bazı noktalarda negatif değerlere ulaşarak tutarsız bir sönümleme davranışı sergilemiştir. Özellikle UD yönünde M133 noktasında gözlenen yüksek genlik artışı, sistemin bu noktadaki etkinliğini kaybettiğini göstermektedir.

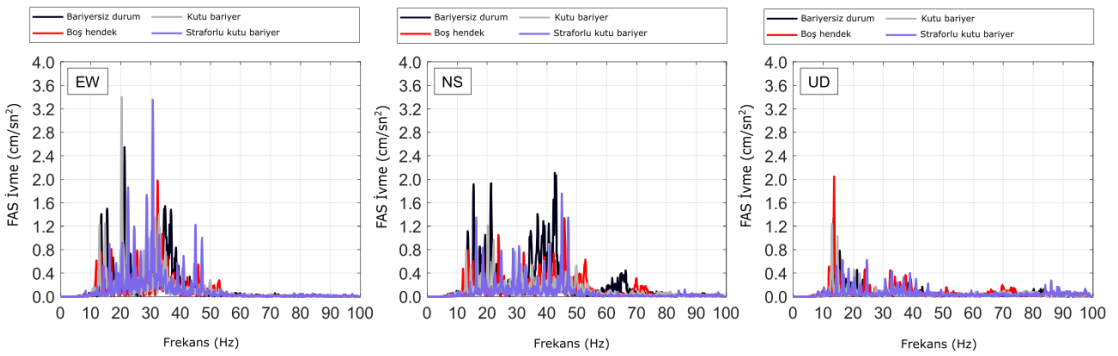
Normalize edilmiş zaman tanım alanlı analizlere ek olarak, bariyerlerin frekans alanındaki performanslarını değerlendirmek amacıyla, Fourier Spektral İvme (FAS) analizleri ve 1/3 oktav bant merkez frekansları üzerinden spektral değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, her bir bariyer uygulamasının belirli frekans aralıklarındaki etkinliğini ortaya koymak amacıyla Şekil 4.34'te sunulmuştur.



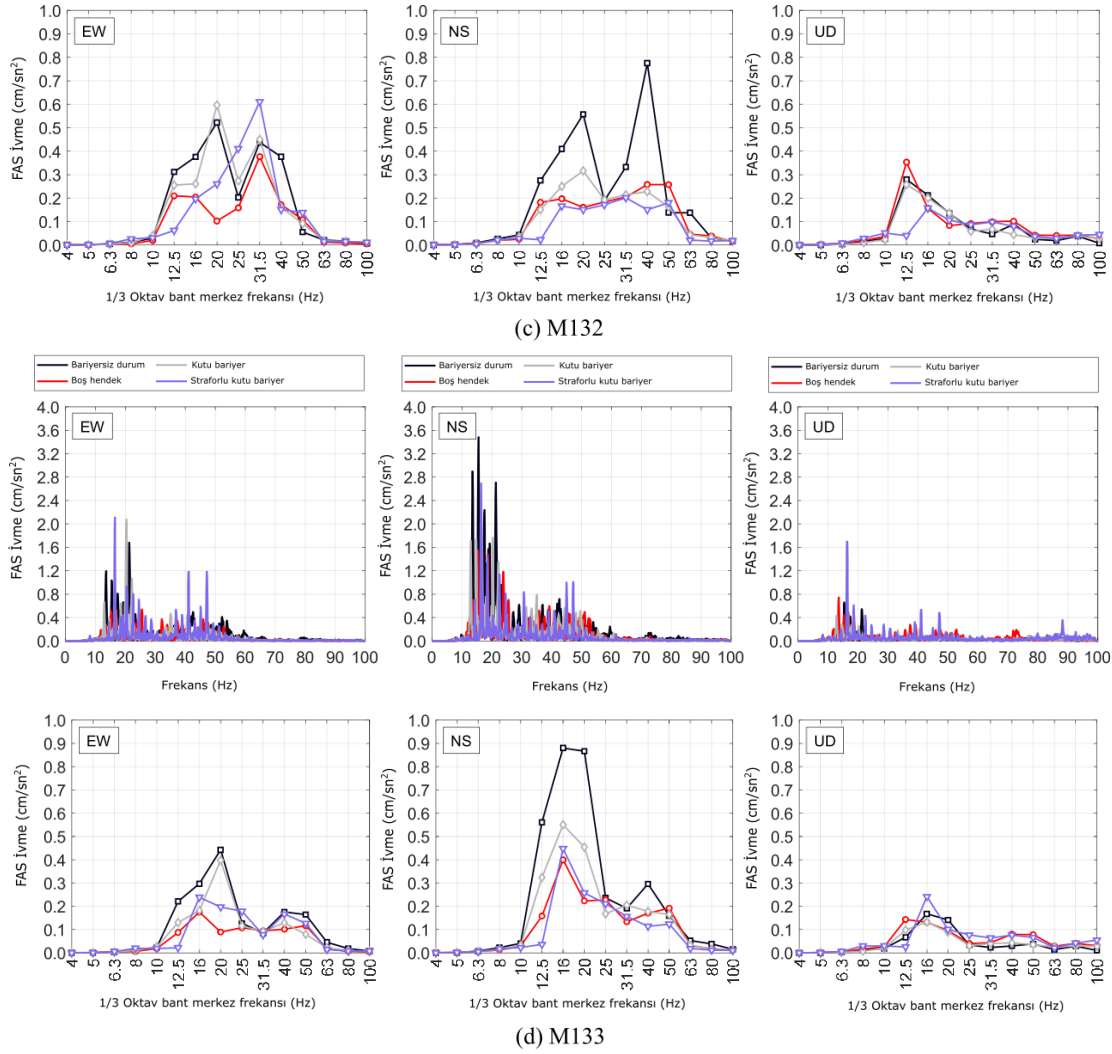
(a) M130



(b) M31



Şekil 4.34. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.



Şekil 4.34.(Devamı) 160 km/sa'lik tren geçişlerine ait tüm bariyerli durumlar için ölçülen Fourier Amplitüd Spektrumları.

Bariyerin önünde konumlandırılan M130 ivmeölçerine ait frekans alanı analizleri, 160 km/sa'lik tren geçişleri sırasında zemine iletilen titreşimlerin spektral dağılımını ortaya koymakta ve bariyer uygulamalarının kaynak yakınındaki etkinliğini değerlendirmek açısından kritik veriler sunmaktadır. Ham FAS spektrumları incelendiğinde; EW ve NS yönlerinde 25-45 Hz, UD yönünde ise 12.5-20 Hz aralığında genliklerin yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle EW yönünde 32 Hz, NS yönünde 40-50 Hz, UD yönünde ise 12.5 Hz frekanslarında belirgin pik değerler dikkat çekmektedir. Boş hendek uygulaması, EW yönünde bu tepe bölgesinde yaklaşık %38 oranında bir spektral azalma sağlamış; NS yönünde ise 25-50 Hz bandında %45 oranında bir iyileşme göstermiştir. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları EW ve NS yönlerinde daha sınırlı kalmakla birlikte, 25-40 Hz aralığında sırasıyla %30 ve %25 oranlarında sönümleme gerçekleştirmiştir. UD yönünde ise, tüm

uygulamaların etkisi daha düşük seviyede kalmış, ancak 12.5-16 Hz bandında %15-25 oranında iyileşme kaydedilmiştir. 1/3 Oktav Bant analizleri de bu bulguları desteklemektedir. EW yönünde 25 Hz, 31.5 Hz ve 40 Hz merkez frekanslarında, boş hendek uygulaması en etkili performansı göstermiş; kutu bariyer %33, straforlu kutu bariyer ise %25 civarında bir azaltım sağlamıştır. NS yönünde, özellikle 16 Hz, 25 Hz ve 50 Hz merkez frekanslarında, boş hendek yaklaşık %50'ye yakın bir değerde azalma üretmiş, kutu bariyer ve straforlu sistem sırasıyla %38 ve %33 düzeyinde sönümleme gerçekleştirmiştir. UD yönünde, 12.5-16 Hz merkez frekansları aralığında en anlamlı düşüşler izlenmiş; boş hendek %25'e kadar, kutu bariyer %20, straforlu sistem ise yaklaşık %15 seviyelerinde bir azalma sunmuştur. Bu analizler, boş hendek uygulamasının özellikle kaynak yakınında yüksek frekanslı titreşimlerde daha etkili olduğunu, kutu bariyer sistemlerinin ise EW ve NS yönlerinde belirli frekans bantlarında kısmi ancak anlamlı sönümleme sağladığını göstermektedir. Strafor katkısının bu noktadaki etkisi ise, sınırlı düzeyde kalmıştır.

Bariyerin hemen arkasında yer alan M131 ivmeölçerinin spektral analizi, bariyer sistemlerinin frekans bazlı izolasyon performansını değerlendirmek açısından oldukça önemlidir. FAS analizleri doğrultusunda; EW yönünde 10-25 Hz, NS yönünde 10-30 Hz, UD yönünde ise 10-20 Hz aralığında titreşim enerjisinin yoğunlaştığı görülmüştür. EW yönünde özellikle 12-16 Hz aralığında belirgin spektral tepe değerleri izlenirken, NS yönünde 12.5 Hz ve 25 Hz çevresindeki frekanslarda dikkat çekici genlik artışları gözlemlenmiştir. UD yönünde ise en belirgin titreşim genlikleri 12.5 Hz merkezinde yoğunlaşmıştır. Bu doğrultuda yapılan 1/3 Oktav Bant analizlerinde: EW yönünde, 12.5 Hz ve 25 Hz merkez frekanslarında boş hendek ve kutu bariyer uygulamalarının yaklaşık %35 oranında, straforlu kutu bariyerin ise %30 mertebelerinde spektral azaltım sağladığı görülmektedir. NS yönünde, 12.5 Hz merkez frekansında boş hendek uygulaması yaklaşık %50 oranında en güçlü sönümleme performansını gösterirken; kutu bariyer 16 Hz-63 Hz aralığında ve straforlu kutu bariyer 12.5-63 Hz aralığında etkili olarak; sırasıyla %38 ve %30 oranlarında azalma sağlamıştır. UD yönünde, 12.5-16 Hz bantlarında tüm bariyerli durumların bariyersiz duruma göre anlamlı iyileşmeler sunduğu; boş hendek uygulamasının %35'e kadar, kutu bariyerin %30, straforlu sistemin ise yaklaşık %25 seviyelerinde spektral sönümleme sağladığı tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, en yüksek performans boş hendek uygulamasında kaydedilirken, kutu bariyerin özellikle EW ve NS yönlerinde boş

hendeğe yakın seviyede performans sunduğu gözlemlenmiştir. Strafor katkısının bu ölçüm noktasındaki etkisi ise, sınırlı düzeyde kalmıştır (Tablo 4.12).

Tablo 4.12. 160 km/sa'lık tren geçişlerine ait fourier genliklerinin bariyerin hemen arkasındaki azalım yüzdeleri.

İvmeölçer	Analiz Türü	Yön	Frekans Bandı	Bariyer Tipi	FAS İvme (%)
M131	1/3 Oktav	EW	16-31.5 Hz	Boş Hendek	35%
M131	1/3 Oktav	EW	25-31.5 Hz	Kutu Bariyer	20%
M131	1/3 Oktav	EW	25-31.5 Hz	Straforlu Kutu Bariyer	23%
M131	1/3 Oktav	NS	16-63 Hz	Boş Hendek	50%
M131	1/3 Oktav	NS	25-63 Hz	Kutu Bariyer	40%
M131	1/3 Oktav	NS	25-63 Hz	Straforlu Kutu Bariyer	48%
M131	1/3 Oktav	UD	16-63 Hz	Boş Hendek	26%
M131	1/3 Oktav	UD	25-63 Hz	Kutu Bariyer	21%
M131	1/3 Oktav	UD	25-63 Hz	Straforlu Kutu Bariyer	33%

M132 ivmeölçeri incelendiğinde; EW yönünde 20-35 Hz aralığında titreşim enerjisinin yoğunlaştığı, özellikle 25 Hz ve 32 Hz civarında belirgin spektral tepe değerlerinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu frekans aralığında boş hendek uygulaması yaklaşık %48 oranında spektral azaltım sağlamıştır. Kutu bariyer ve straforlu kutu bariyer uygulamaları ise çok düşük frekans aralıklarında etkili olarak; sırasıyla %35 ve %30 düzeylerinde bir sönümleme gerçekleştirmiştir. NS yönünde 12.5-40 Hz aralığında belirgin spektral genlik azalmaları görülmektedir. Bu bantta, boş hendek uygulaması yine %45, kutu bariyer %33, straforlu sistem ise %28 civarında spektral azalma üretmiştir. UD yönünde en güçlü titreşim genliklerinin 12.5-16 Hz bantlarında toplandığı görülmektedir. Bu aralıkta boş hendek uygulaması yaklaşık %20, kutu bariyer %15, straforlu kutu bariyer ise %10 seviyelerinde sınırlı bir azalma sağlamıştır. 1/3 Oktav Bant analizleri, bu bulguları desteklemektedir: EW yönünde 16, 25 ve 31.5 Hz merkez frekanslarında en anlamlı azalmalar kaydedilmiş olup; NS yönünde, 16 Hz, 25 Hz ve 40 Hz frekanslarında benzer şekilde tüm bariyer uygulamaları etkili olmuştur. UD yönünde, özellikle 12.5 Hz merkez frekansında tüm sistemlerin sınırlı ancak ölçülebilir düzeyde iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, M132 noktasında boş hendek uygulaması tüm yönlerde en yüksek spektral azalmaları sağlarken; kutu bariyer uygulaması, özellikle EW ve NS yönlerinde boş hendeğe yakın performans göstermektedir. Strafor katkısı ise bu noktada, kutu bariyere kıyasla ek bir avantaj sağlamamış; bazı frekans bantlarında daha düşük bir sönümleme etkisi göstermiştir.

M133 ivmeölçeri, bariyerden en uzak konumda yer almakta olup, dalga yayılımının daha uzak mesafedeki spektral etkilerini gözlemlemek amacıyla değerlendirilmiştir. FAS grafiklerine göre: EW yönünde, 16-32 Hz aralığında öne çıkan spektral tepe değerleri görülmektedir. Bu frekans bandında boş hendek uygulaması yaklaşık %45, kutu bariyer %35, straforlu kutu bariyer ise %30 civarında bir spektral azalma sağlamıştır. NS yönünde, özellikle 12.5-25 Hz arasında oldukça belirgin spektral genlikler dikkat çekmektedir. Bu bantta boş hendek uygulaması %50'ye yakın, kutu bariyer %35, straforlu sistem ise %30 seviyelerinde sönümleme etkisi göstermiştir. UD yönünde, genel olarak düşük seviyeli titreşim genlikleri izlenmiş olup, 12.5-16 Hz aralığında en dikkat çekici değerler kaydedilmiştir. 1/3 Oktav Bant analizlerine göre: EW yönünde, 16 Hz ve 25 Hz merkez frekanslarında boş hendek uygulamasının spektral değeri bariyersiz duruma göre yaklaşık %40 daha düşüktür. Kutu bariyer %30, straforlu sistem ise %25 oranında iyileşme sunmuştur. NS yönünde, 10 Hz-25 Hz frekans aralığında tüm bariyer durumlarında azalma görülmüş; UD yönünde yalnızca 12.5-16 Hz bandında anlamlı bir sönümleme etkisi gözlemlenmiştir. Genel olarak, M133 noktasında da tüm bariyer sistemlerinin özellikle EW ve NS yönlerinde, düşük ve orta frekans bantlarında etkili olduğu, ancak mesafe arttıkça bu etkinin kademeli olarak azaldığı gözlemlenmektedir. Straforlu kutu bariyerin, bu noktada da kutu bariyere kıyasla daha sınırlı bir katkı sunduğu anlaşılmaktadır.

4.7.2. Hava kaynaklı titreşim (gürültü) ölçümleri

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen kutu bariyer sisteminin hava kaynaklı titreşimleri (gürültü) azaltma performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen saha testlerine ilişkin bulgular sunulmaktadır. Deneysel çalışmalar, yüksek hızlı tren trafiği koşullarında, 2.5 m yüksekliğindeki gürültü bariyeri prototipi kullanılarak yürütülmüştür. Gürültü kaynaklarını; yüksek hızlı tren güzergahındaki İstanbul hattı ve Ankara hattındaki geçişler oluşturmaktadır. Bu kapsamda; bariyere uzaklığı 6.4 m olan İstanbul hattı tren geçişleri “bariyere yakın hat”, bariyere uzaklığı 10.9 m olan Ankara hattı tren geçişleri “bariyere uzak hat” olarak kategorize edilerek değerlendirilmiştir. Gürültü testlerindeki tüm trenler; çalışmanın yapıldığı dönemde hattaki yol çalışması nedeniyle 100 km/sa hızla geçiş yapmışlardır. Tüm ölçümler, hem bariyerin bulunduğu hem de açık alan koşullarının gözlemlendiği referans noktalar dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve bariyerin ses yalıtım performansı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Tablo 4.13. Hava kaynaklı titreşim ölçümlerine ait deney matrisi.

Deney No	Bariyer Durumu	Deney Türü	Tren Hattı
1. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
2. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum		
3. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
4. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum	BARİYERE YAKIN HAT (6.4 m)	İstanbul Hattı
5. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
6. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum		
7. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
8. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum		
9. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
10. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum		
11. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
12. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum	BARİYERE UZAK HAT (10.9 m)	Ankara Hattı
13. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
14. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum		
15. Ölçüm	Bariyersiz Durum		
16. Ölçüm	Kutu Bariyerli Durum		

Deney matrisi Tablo 4.13'te verilen gürültü deneylerine ait saha uygulamalarında, ilk olarak serbest alan koşullarını temsil eden bariyersiz durumda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ses seviyesi ölçer cihazı, tren geçiş hattına yakın, ancak bariyerin yerleştirilmediği bir pozisyonda, yani serbest alan koşulunu temsil eden noktada konumlandırılmıştır. Aslında bu konum, bariyerli senaryodaki ölçümlerin yapıldığı noktaya, yani bariyerin hemen arkasına karşılık gelmektedir. Bariyerin yerleştirildiği saha koşulları dikkate alındığında, bu referans ölçüm noktası tren hattının merkezinden yaklaşık 9.25 metre uzaklıkta yer almakta olup, bu mesafe hattın bitimindeki çitin hemen önüne konumlandırılan ve genişliği 0.6 metre olan bariyerin saha yerleşimine göre belirlenmiştir. Ardından, aynı cihaz bariyerin hemen arkasına, yerden 1.5 metre yükseklikte olacak şekilde yeniden yerleştirilmiş ve ikinci ölçüm seti tamamlanmıştır (Şekil 4.35-36). Bu yükseklik, insan kulağına yakınlığı ve standart gürültü ölçüm protokollerinde önerilen mikrofön yüksekliğiyle uyumludur.



Şekil 4.35. Serbest alan gürültü ölçümleri.



Şekil 4.36. Kutu bariyer prototipi ile yapılan gürültü ölçümleri.

Her iki ölçümde de, cihaz trenin geçiş saatinden kısa bir süre önce manuel olarak başlatılarak, hem geçiş sırasındaki maksimum ses düzeyleri hem de geçiş öncesi/sonrası çevresel arka plan gürültüsü kayıt altına alınmıştır. Böylece yalnızca tren geçişi sırasında oluşan gürültü değil, aynı zamanda geçiş öncesi ve sonrasında

meydana gelebilecek kısa süreli çevresel ses değişimleri de sağlıklı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ölçüm sırasında meteorolojik etkilerin kontrolü amacıyla, termo-anemometre cihazı ile anlık sıcaklık ve rüzgar hızı verileri de kaydedilmiştir (Şekil 4.37). Bu bağlamda, rüzgar hızının 0.8 m/s ve sıcaklığın gün boyu ortalama 30 °C olarak ölçülmesi, ortam koşullarının sabit ve ölçüm açısından elverişli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.37. Gürültü deneylerinde kullanılan termo-anemometre.

Bu bölümde, hızlı tren geçişleri sırasında elde edilen dB-zaman verileri doğrultusunda; kutu bariyer sisteminin hava kaynaklı titreşimleri azaltma performansı değerlendirilmektedir. Yapılan analizlerde, bariyerli durumdan elde edilen ses düzeyi ölçümleri, serbest zemin koşullarında yapılan referans ölçümlerle karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve gürültü bariyerinin akustik performansı değerlendirilmiştir (Tablo 4.14).

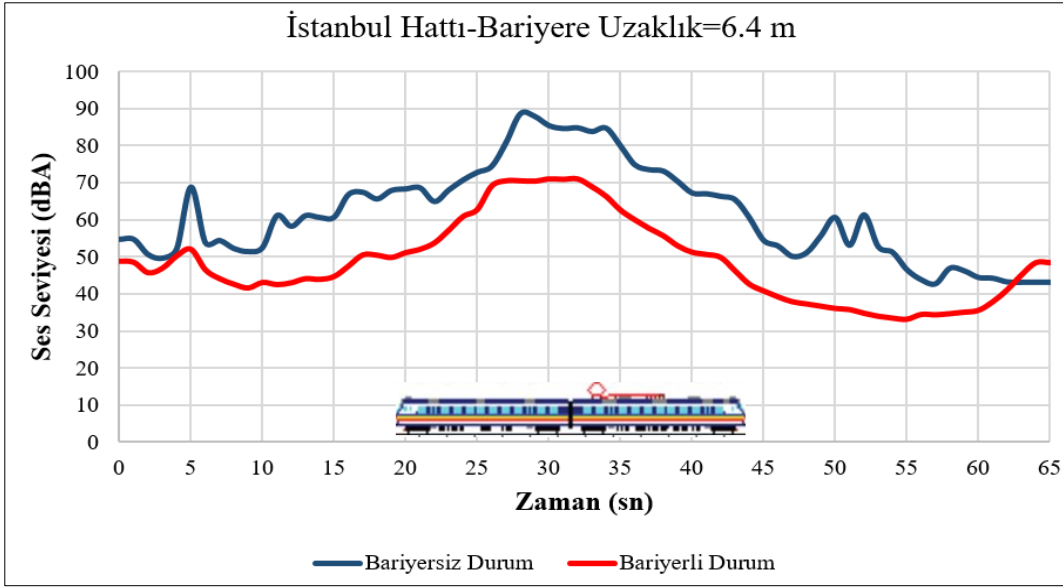
Tablo 4.14. Bariyerli ve bariyersiz durumlar için ses seviyesi (dBA) ölçüm sonuçları.

DENEY	DURUM	ANKARA HATTI (Bariyere uzak)	İSTANBUL HATTI (Bariyere yakın)	BİRİM
1. ÖLÇÜM	BARİYERSİZ	79	84.7	dBA
	BARİYERLİ	67.5	71	dBA
2. ÖLÇÜM	BARİYERSİZ	79.5	88.5	dBA
	BARİYERLİ	68.4	71.6	dBA
3. ÖLÇÜM	BARİYERSİZ	82.7	86.2	dBA
	BARİYERLİ	69.8	73	dBA
4. ÖLÇÜM	BARİYERSİZ	87.7	88.4	dBA
	BARİYERLİ	69.3	79	dBA
ORT.	BARİYERSİZ	82.2	86.95	dBA
	BARİYERLİ	68.8	73.65	dBA

Tablo 4.14’te, tren geçişleri sırasında hem bariyere yakın (İstanbul hattı) hem de bariyere uzak (Ankara hattı) konumlarda yapılan ses seviyesi ölçümleri sunulmaktadır. Ölçümler, bariyersiz ve kutu bariyerli durumlar için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, kutu bariyer sisteminin hava kaynaklı titreşimler üzerindeki etkisini her iki konumda da karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Tüm ölçüm setleri dikkate alındığında, bariyerli durumda ölçülen ses seviyeleri istikrarlı bir biçimde daha düşüktür. Bu durum, sistemin etkin bir akustik sönümleme sağladığını göstermektedir. Ortalama bazda, Ankara hattında 13.4 dBA, İstanbul hattında ise 13.3 dBA düzeyinde bir azalma sağlanmıştır. Bu farklar, ses enerjisinin logaritmik doğası gereği oldukça anlamlıdır; zira 10 dBA’lık bir fark insan kulağı tarafından sesin yaklaşık yarı yarıya azalmış gibi algılanmasına neden olur. Dolayısıyla bu sonuçlar, bariyer sisteminin insan algısı açısından da ciddi bir gürültü azaltımı sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, bariyere yakın konumda (İstanbul hattı) elde edilen referans ölçümlerin, bariyere uzak konumlara kıyasla her zaman daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, tren kaynaklı gürültünün hat eksenine daha yakın bölgelerde daha yüksek seviyelerde algılandığını ve dolayısıyla bu bölgelerde alınan önlemlerin daha kritik olduğunu göstermektedir. Bariyer uygulamasının her iki konumda da benzer düzeyde azaltım sağlaması, sistemin etkili bir biçimde hem doğrudan hem de yansıyan ses dalgalarını sönümlediğini göstermektedir.

4.7.2.1. Bariyere yakın hattaki geçişler ile yapılan gürültü ölçümleri

Bu bölümde, bariyere yakın olan İstanbul hattından geçen trenlerin ürettiği ses düzeyleri; bariyer öncesi ve bariyerli durum olmak üzere Şekil 4.38’de karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

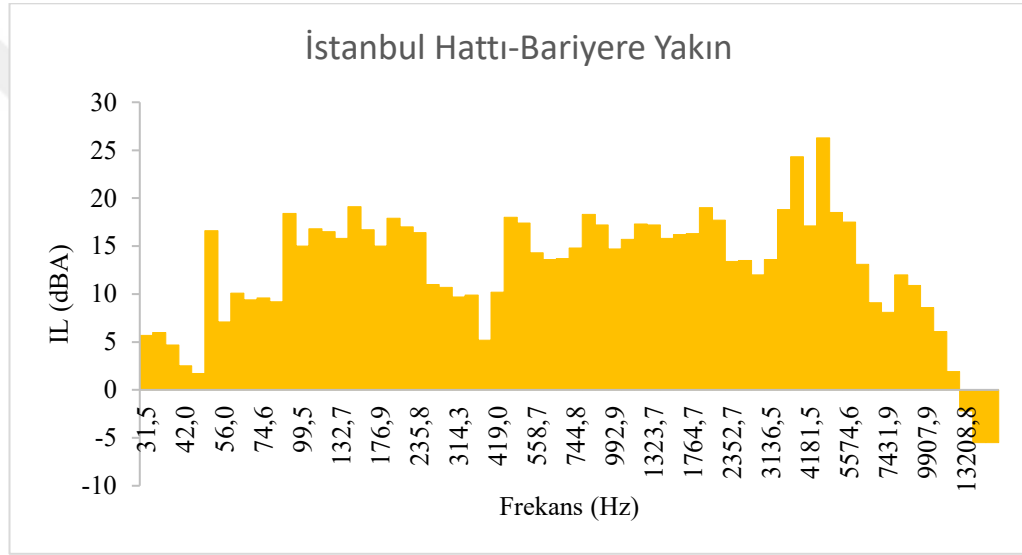


Şekil 4.38. Bariyere yakın durumda gerçekleştirilen ses seviyesi (dBA) ölçümlerinin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.38’de, İstanbul hattında (bariyere 6.4 metre mesafede) gerçekleştirilen ses seviyesi ölçümlerine ait zaman serisi grafiği sunulmaktadır. Grafik, hem bariyersiz hem de bariyerli durumlar için, ses seviyesi ölçer cihazı tarafından kaydedilen anlık ses düzeylerinin (dBA) zamana bağlı değişimini göstermektedir. Bu tür zaman serisi veriler, tren gibi sürekli titreşim üreten kaynaklardan yayılan gürültünün geçiş süresince hangi noktalarda yoğunlaştığını analiz etmek için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Grafik incelendiğinde, trenin geçişi sırasında ses düzeyinin yaklaşık 20. saniyeden itibaren yükselmeye başladığı, 30-35. saniyeler arasında ise tepe noktasına ulaştığı görülmektedir. Bu aralıktaki yüksek ses seviyeleri; trenin gövdesi ve tekerlek-ray etkileşiminden doğan aerodinamik ve mekanik kaynaklı gürültü bileşenlerinin etkisini yansıtmaktadır. Bu aralık, trenin ölçüm noktasına en yakın olduğu, yani maksimum ses basıncının algılandığı bölgedir. Bariyersiz durumda ses seviyesi yaklaşık 90 dBA’ya kadar çıkarken, bariyerli durumda bu değer 70 dBA civarında kalmıştır. Bu fark, yaklaşık 20 dBA’lık bir azalmaya karşılık gelmekte olup, ses basıncında logaritmik ölçekte önemli bir sönümlenme anlamına gelmektedir. Trenin uzaklaşmasıyla birlikte, her iki durumda da ses seviyesinde düşüş gözlenmektedir. Ancak bu düşüş, bariyersiz senaryoda daha düzensiz ve dalgalı bir yapı sergilerken; bariyerli durumda daha istikrarlı ve bastırılmış bir eğilim göstermektedir. Bu durum, kutu bariyer sisteminin yalnızca ses düzeyinin pik noktalarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda gürültünün zamansal yayılımını da düzenlediğini göstermektedir.

Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO, 2018) göre, çevresel ortamlarda uzun süreli gürültü maruziyeti, kalp-damar hastalıkları ve uyku bozuklukları gibi sağlık risklerini artırabilmektedir. Bu bağlamda, tren geçişleri sırasında duyulan anlık ses düzeylerinin kutu bariyer uygulamasıyla 15-20 dBA oranında azaltılması, hem bireysel konfor hem de halk sağlığı açısından oldukça önemli bir iyileşme sunmaktadır.

Kutu bariyer prototipinin akustik performansını daha detaylı değerlendirebilmek için Insertion Loss (IL)-Frekans grafiği (Şekil 4.39) çizdirilmiş ve iletim kaybı parametrelerinin farklı frekans bantlarında ne ölçüde değiştiği incelenmiştir. Tüm bantlar boyunca IL değerleri 0 dBA'nın üzerinde kalmıştır. Bu durum bariyerin tüm frekanslarda pozitif bir yalıtım etkisi gösterdiğini kanıtlamaktadır.



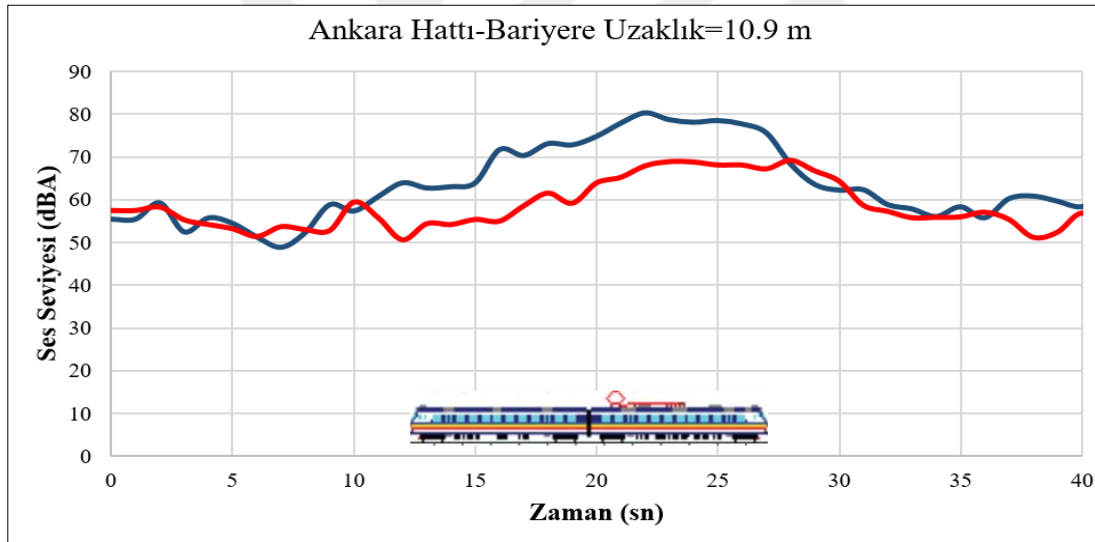
Şekil 4.39. İstanbul hattında bariyere yakın yapılan ölçümlerden elde edilen frekans bazlı Insertion Loss (IL) dağılımı.

Şekil 4.39 incelendiğinde; bariyerin düşük frekanslarda (özellikle 31.5-100 Hz) daha sınırlı bir performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu bantta IL değerleri çoğunlukla 5 dBA'nın altında kalmaktadır. Bu durum, düşük frekanslı seslerin daha uzun dalga boylarına sahip olması nedeniyle klasik pasif bariyer sistemleri tarafından kolayca engellenememesinden kaynaklanmaktadır. Buna karşın, 250 Hz ile 4000 Hz frekans aralığında IL değerlerinin genellikle 10-20 dBA arasında seyrettiği ve en yüksek azaltımın yaklaşık 25 dBA ile 4181.5 Hz civarında elde edildiği dikkat çekmektedir. Bu frekans aralığı, hem tren kaynaklı aerodinamik ve yapısal gürültünün yoğunlaştığı bölgeyi, hem de insan kulağının en hassas olduğu orta frekansları kapsamaktadır. Bu nedenle, bu bantlardaki yüksek yalıtım performansı hem çevresel konfor hem de sağlık açısından oldukça değerlidir. Grafikte ayrıca, IL değerlerinin 3500 Hz üzeri

frekanslarda tekrar düşüş eğilimine girdiği, bununla birlikte 5-10 dBA civarında azaltım sağlamaya devam ettiği gözlemlenmektedir. Yüksek frekanslardaki ses seviyeleri, tren kaynaklı gürültüde genellikle daha düşük olduğundan, bu bantlarda elde edilen azaltım miktarı da doğal olarak sınırlı kalmaktadır. Yani bariyerin burada daha az etkili görünmesinin sebebi, zaten bu frekanslarda çok fazla ses enerjisinin bulunmamasıdır. Ancak bariyerin bu bölgelerde de belirli bir azaltım sağlaması, geniş bantlı bir yalıtım etkisine sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, frekans bazlı IL analizi, kutu bariyer sisteminin özellikle orta frekanslar başta olmak üzere geniş bir spektrumda etkili bir ses azaltım performansı sergilediğini göstermektedir.

4.7.2.2. Bariyere uzak hattaki geçişler ile yapılan gürültü ölçümleri

Bu bölümde, bariyere uzak olan Ankara hattından geçen trenlerin ürettiği ses düzeyleri; bariyer öncesi ve bariyerli durum olmak üzere Şekil 4.40’da karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



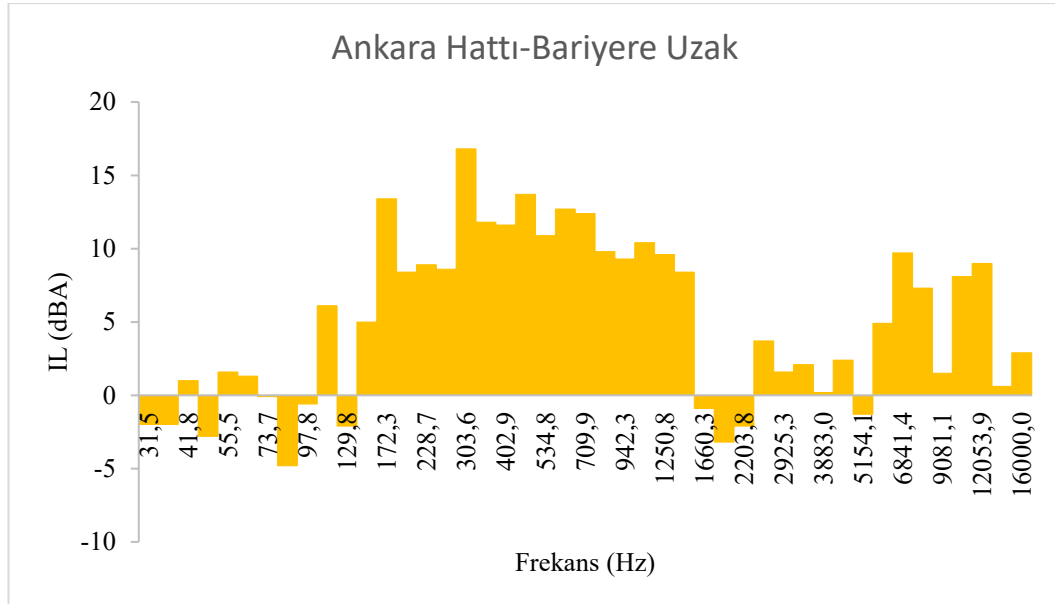
Şekil 4.40. Bariyere uzak durumda gerçekleştirilen ses seviyesi (dBA) ölçümlerinin zamana bağlı değişimi.

Şekil 4.40’deki grafik incelendiğinde, tren geçişinin etkisiyle ses seviyesinin yaklaşık 15. saniyeden itibaren artmaya başladığı ve 20-25. saniyeler arasında tepe noktasına ulaştığı görülmektedir. Bu aralık, trenin ölçüm cihazına en yakın konumdan geçtiği ve dolayısıyla ses düzeyinin maksimum olduğu zaman dilimidir. Bariyersiz senaryoda ses seviyesi bu aralıkta yaklaşık 80 dBA’ya kadar çıkarken, bariyerli durumda aynı anlarda ölçülen seviyeler 70 dBA civarındadır. Bu fark, yaklaşık 10 dBA’lık bir azalmaya karşılık gelmekte olup, ses enerjisinde belirgin bir düşüş sağlandığını göstermektedir. Trenin uzaklaşmasıyla birlikte, her iki durumda da ses seviyesi kademeli olarak düşüş

göstermektedir. Ancak bariyersiz durumda bu düşüş daha dalgalı ve düzensiz bir seyir izlerken, bariyerli durumda daha yumuşak ve bastırılmış bir yapı gözlemlenmektedir. Bu durum, kutu bariyerin yalnızca ses seviyesinin zirve noktalarını düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda sesin zamansal yayılımını da dengeleyerek daha istikrarlı bir gürültü profili sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bariyere yakın konumdaki İstanbul hattında, bariyerin sağladığı azalma yaklaşık 20 dBA düzeyinde iken; Ankara hattında bu değer yaklaşık 10 dBA civarındadır. Bu fark, bariyerin kaynağa daha yakın konumlandırıldığında çok daha etkili olduğunu göstermektedir. Çünkü ses dalgaları, yayılım mesafesi arttıkça daha geniş alana dağılmakta ve bariyerin etki gücü azalmaktadır. Ayrıca, Ankara hattında elde edilen ses seviyeleri genel olarak daha düşük seyretmekte olup, bu da uzak konumlarda sesin zaten bir miktar zayıflamış olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu karşılaştırma kutu bariyer sisteminin etki mesafesinin önemli bir tasarım kriteri olduğunu ve maksimum etki için tren kaynağına yakın bölgelerde konumlandırılmasının kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Akustik yalıtımın daha detaylı analiz edilebilmesi için Insertion Loss (IL)-Frekans grafiği (Şekil 4.41) çizdirilmiş ve iletim kaybı parametrelerinin farklı frekans bantlarında ne ölçüde değiştiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.41. Ankara hattında bariyere uzak yapılan ölçümlerden elde edilen frekans bazlı Insertion Loss (IL) dağılımı.

Şekil 4.41’de sunulan Insertion Loss (IL)-Frekans grafiği incelendiğinde; düşük frekans bölgelerinde (31.5-125 Hz) bazı IL değerlerinin negatif seviyelere düştüğü

gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük frekanslı seslerin uzun dalga boyları nedeniyle pasif bariyerler tarafından kolayca engellenememesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca uzak mesafelerde düşük frekanslı dalgaların daha az sönümlenerek yayılma eğilimi göstermesi de bu negatif değerleri açıklayabilir. Öte yandan, 125 Hz bandında görülen yaklaşık 7 dBA'lık IL değeri, bu frekans eşiğinden itibaren bariyerin daha etkili olmaya başladığını göstermektedir. Orta frekans aralığında (250-1000 Hz) IL değerlerinin 10-17 dBA arasında değiştiği ve bu bölgenin bariyerin en etkili olduğu frekans aralığı olduğu görülmektedir. En yüksek IL değeri yaklaşık 17 dBA ile 300 Hz bandında gözlenmektedir. Bu aralık, tren kaynaklı aerodinamik ve yapısal bileşenlerin yoğun olduğu bölgeyle örtüşmektedir. İnsan kulağının en hassas olduğu bu bantlardaki yüksek performans, hem işitsel konfor hem de çevresel sağlık açısından önemli katkılar sunmaktadır. Yüksek frekanslarda (2.000 Hz ve üzeri) IL değerlerinin genellikle 5-10 dBA aralığında seyrettiği ve bazı bantlarda etkili azalmalar sağladığı görülmektedir. Bu bölgede dikkat çeken bir diğer nokta ise IL değerlerindeki dalgalanmadır. Bu, uzak mesafelerde yansıma ve saçılmaların daha belirgin hale gelmesiyle açıklanabilir. En yüksek IL değerleri bu bölgede 6841 Hz ve 9601 Hz bantlarında yaklaşık 10-11 dBA düzeyinde elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, bariyere uzak konumda yapılan bu ölçümlerde; bariyerin farklı frekanslardaki performansı daha dengeli bir seyir izlemektedir. Ancak bu dengeye rağmen; ses azaltım seviyeleri, kaynağa yakın konumda elde edilen değerlere kıyasla daha düşük kalmıştır. Yani bariyer, burada belirli frekanslarda çok yüksek sönümleme sağlamaktan ziyade, geniş bir frekans aralığında orta düzeyde bir azaltım etkisi göstermiştir. Bu durum, ses dalgalarının uzak mesafelerde daha fazla yayılması nedeniyle enerjinin bariyere ulaşmadan önce kısmen dağılmasından kaynaklanabilir. Özellikle düşük frekanslı dalgaların geniş dalga boyları sayesinde bariyeri daha kolay aşabilmesi, bu bölgelerdeki sönümleme etkisinin sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, kutu bariyer sistemi, uzak mesafede dahi özellikle orta frekanslarda etkin bir sönümleme sağlamış; ancak toplam IL performansı, kaynağa yakın konumda elde edilen değerlere kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Bu, bariyer yerleşiminin performans üzerindeki belirleyici etkisini bir kez daha ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, çevresel titreşim ve gürültünün azaltılması amacıyla; düşük empedanslı, geri dönüştürülebilir ve ekonomik malzemeler kullanılarak geliştirilen kutu şeklindeki pasif dalga bariyer sisteminin yalıtım performansını değerlendirmek üzere gerçek saha koşullarında yürütülen deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Bu kapsamda; kutu bariyerin tasarlanması, nem ve yanal toprak basıncına karşı dayanımının analiz edilmesi, üretim sürecinin gerçekleştirilmesi ve geliştirilen prototiplerin saha koşullarında test edilmesi çalışmanın temel aşamalarını oluşturmaktadır. Bu çalışmanın özgün yanı, geleneksel sert dalga bariyerlerine alternatif olarak çevre dostu ve düşük empedanslı malzemelerle geliştirilen kutu tipi bir bariyer sisteminin sunulmasıdır. Balsa ağacı ve oluklu mukavva gibi hafif malzemeler kullanılarak tasarlanan bu sistem, hem zemin hem de hava kaynaklı titreşimleri azaltmayı hedeflemektedir. Kullanılan malzemeler, yüzeyle ani empedans farkı oluşturmada dalgaların geçişine imkân tanıdığı için, dalga iletim mekanizmasını bozmadan sönümleme sağlar. En önemli farkı ise bu sistemin, gerçek dinamik yük koşullarında ve doğal saha ortamında ilk kez doğrudan test edilmiş olmasıdır. Literatürde benzeri bulunmayan bu yaklaşımın en özgün katkısı, geliştirilen sistemin gerçek saha koşullarında ve dinamik yük etkisi altında doğrudan test edilerek performansının bütüncül şekilde değerlendirilmiş olmasıdır.

Bu çalışma kapsamında, zemin ve hava kaynaklı titreşimleri azaltma kapasitesine sahip, düşük maliyetli ve geri dönüştürülebilir nitelikte bir kutu bariyer sisteminin performansı ortaya konmuştur. Geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı, sistemin ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilirliğini desteklerken; modüler tasarım yapısı, farklı zemin türleri ve altyapı koşullarına uyarlanabilirliğini mümkün kılmaktadır.

Geliştirilen kutu tipi dalga bariyerinin ayırt edici yönlerinden biri, hem laboratuvar hem de arazi testlerinde gösterdiği yüksek sönümleme performansına ek olarak, sahada kolaylıkla üretilebilen ve uygulanabilen, mühendislik uzmanlığı gerektirmeyen bir yapıya sahip olmasıdır. Üretiminde kullanılan oluklu mukavva ve balsa ahşabı gibi geri dönüştürülebilir malzemeler, çevre dostu bir yaklaşımı desteklerken aynı zamanda

düşük maliyetli üretim ve uygulama avantajı sağlamaktadır. Sahaya tek parça olarak taşınabilmesi ve doğrudan yerleştirilerek kullanılabilir olması, sistemin pratik uygulamalar açısından ön plana çıkmasını sağlamaktadır.

Kutu bariyer uygulamasının zemin ve kaynaklı titreşimleri azaltma performansını değerlendirmek amacıyla, saha koşullarında elde edilen kayıtlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve elde edilen temel sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Yapay darbe uygulamasıyla gerçekleştirilen saha testleri, geliştirilen kutu bariyer sisteminin geleneksel açık hendek sistemleriyle kıyaslanabilir düzeyde bir yalıtım performansı sunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle darbe kaynağına dik yönde PGA tabanlı azaltım oranlarının %88'e ulaştığını göstermektedir. Bu değerler, Woods'un literatürde tanımladığı etkin yalıtım bölgesi sınırlarının altında kalarak, kutu bariyerin darbe kaynaklı basınç dalgalarına karşı başarılı bir performans sunduğunu doğrulamaktadır. Spektral büyüklüklere göre hesaplanan Amplitude Reduction Ratio (ARR) değerleri, kutu bariyer ve strafor dolgulu versiyonlarının dalga yayılımını engellemede etkili olduğunu, boş hendek sistemine yakın bir performans sergilediğini göstermektedir. Bariyerin önünde ölçülen yansımaların ise strafor dolgulu sistemde daha sınırlı kalması, iç dolgu malzemesinin performansı artırıcı yönde katkı sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, geliştirilen sistemin, darbe kaynaklı yüzey dalgalarının kırılması ve yayılımının engellenmesi açısından etkin bir çözüm sunduğu sonucuna varılabilir.
- 160 km/sa'lık ve 250 km/sa'lık hızlı tren geçişleri için yapılan normalize RMS ivme analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, bariyer sistemlerinin sönümleme performanslarının tren hızına duyarlı olduğu açıkça görülmektedir. 160 km/sa'lık tren geçişlerinde özellikle yatay yönlerde (EW ve NS) ölçülen sönümleme oranları sınırlı kalmış, straforlu kutu bariyer en fazla %45'e kadar azaltım sağlamıştır. Buna karşın, 250 km/sa'lık tren geçişlerinde ivme genlikleri daha yüksek olduğu için bariyer etkisi daha net hissedilmiş ve özellikle NS yönünde %50'yi aşan sönümleme oranlarına ulaşılmıştır. Düşey (UD) yönde ise 160 km/sa'lık tren verilerinde zaman zaman artışlar gözlenirken, 250 km/sa'lık tren geçişlerinde bu bileşende de anlamlı düzeyde azaltım sağlandığı görülmüştür. Bu durum, dalga enerjisi arttıkça kutu bariyerin sönümleme etkinliğinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

Ayrıca, strafor dolgulu sistemin bazı yönlerde kutu bariyere göre daha yüksek performans sergilemesi, iç dolgu malzemesinin enerji yutma kapasitesine olumlu katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

- Akustik yalıtım analizlerinde elde edilen bulgular, kutu bariyerin hava kaynaklı titreşimleri azaltma performansının da dikkate değer olduğunu ortaya koymuştur. Bariyerli ve bariyersiz şartlardaki karşılaştırmalarda, tren gövdesi ve ray-tekerlek etkileşiminden kaynaklanan ses seviyelerinde, tren kaynağına yaklaşık 6.5 metre mesafede 20 dBA'ya kadar azalma gözlemlenmiştir. Uzak konumda (10.9 m) ise bu azalma 10 dBA seviyelerinde kalmıştır. Frekans bazlı Insertion Loss analizlerinde, kutu bariyerin orta frekans bantlarında (125 Hz-500 Hz) daha etkili olduğu; yüksek frekanslarda ise sönümleme etkisinin azaldığı belirlenmiştir.
- Arazi testleri kapsamında yapılan değerlendirmelerde; titreşim kaynağına dik doğrultuda, bariyerin hemen önündeki noktada, yansıyan dalgalar nedeniyle genliklerinde artışlar meydana geldiği belirlenmiştir. Ancak, içi strafor ile doldurulmuş kutu bariyer uygulamasında bu yansıma etkisinin belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, kullanılan dolgu malzemesinin yalnızca arkaya iletilen titreşimleri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda kaynak yönünde oluşabilecek geri yansımaları da sınırlayarak daha dengeli bir dalga yayılımı sağladığını göstermektedir. Strafor dolgulu sistemin bu özelliği, özellikle kaynağa yakın bölgelerdeki titreşim kontrolü açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.
- Yapılan saha testleri ve analizler sonucunda, zemin titreşimini azaltma açısından en yüksek performansı boş hendek uygulamasının gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 250 km/sa'lık tren geçişleri ve yapay darbe testi senaryolarında, boş hendek uygulaması birçok yön için %60'a varan oranlarda genlik azaltımı sağlamış ve diğer bariyer tiplerine kıyasla daha yüksek sönümleme kapasitesi sunmuştur. Bununla birlikte, strafor dolgulu kutu bariyer özellikle NS ve UD yönlerinde gösterdiği güçlü performanslarla dikkat çekmiştir. Ayrıca, iç hacmin strafor gibi hafif ve düşük yoğunluklu bir malzeme ile doldurulması, bariyerin açık hacim kaynaklı fiziksel güvenlik risklerini ortadan kaldırarak, güvenlik önlemi sağlamaktadır. Bu bağlamda, maksimum sönümleme performansı açısından boş hendek öne çıkmakla birlikte; uygulanabilirlik, çevresel sürdürülebilirlik, yapısal kararlılık ve

kullanıcı güvenliği gibi değerlendirmeler göz önünde bulundurulduğunda, strafırlu kutu bariyerin daha dengeli ve bütüncül bir çözüm sunduğu söylenebilir.

Kutu bariyerin yapısal dayanımını test etmek üzere yürütölen üç noktalı eğme deneyleri sonucunda, kutu bariyer prototipinin yanal toprak basınçlarına karşı yeterli taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, sistemin sadece sığ hendeklerde değil, daha derin hendeklerde de kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan sayısal model yardımıyla, iç kafes yapısının farklı senaryolara göre optimize edilebileceği ve daha düşük taşıma gücüne sahip zeminlerde de uyarlanabileceği gösterilmiştir.

Prototipin uzun süreli çevresel etkiler altındaki dayanımı da çalışmada ele alınmıştır. Saha koşullarında nem ve yer altı suyu etkilerine karşı en etkili koruma yöntemi olarak sera naylonu tercih edilmiştir. Bu kaplama sayesinde, bariyerin dış ortam koşullarına karşı yapısal bütünlüğünü koruduğu ve su emme oranlarının sınırlı kaldığı gözlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda, bu yüzey kaplamanın yerine daha dayanıklı ve uzun ömürlü yalıtım sistemlerinin uygulanmasıyla, sistemin çevresel dayanıklılığının artırılması hedeflenmektedir.

Gelecek çalışmalarda, kutu bariyer sisteminin zemin kaynaklı titreşimleri azaltma performansının farklı zemin tabakaları altında; hava kaynaklı titreşimleri azaltma performansının ise farklı frekanslardaki gürültü kaynaklarıyla test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, geliştirilen sistemin sürekliliğini değerlendirmek üzere uzun dönemli saha izleme çalışmalarına gerek duyulmaktadır. Son olarak, sistemin şehir içi metro hatları ya da hafif raylı sistem altyapılarında uygulanabilirliği de ayrı bir başlık altında incelenmelidir.

Sonuç olarak; düşük empedanslı ve hafif malzemelerden oluşturulmuş olan kutu bariyer sisteminin, boş hendek sistemlerine yakın seviyede bir yalıtım performansı sergilediği, yerel zemin koşullarına uyarlanabilirliği ve uygulama kolaylığı ile birlikte düşünüldüğünde, mühendislik pratiği açısından uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur. Özellikle kırsal alanlar, düşük bütçeli altyapı projeleri veya geçici raylı sistem uygulamaları için pratik, ekonomik ve çevre dostu bir alternatif oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aboudi, J. (1973). Elastic waves in half-space with thin barrier. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 99(1), 69–83.
- 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>
- Adolfsson, K., Andréasson, B., Bengtson, P. E., Bodare, A., Madshus, C., Massarch, R., & Zackrisson, P. (1999). *High speed lines on soft ground: Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line* (Technical Report). Banverket, Sweden.
- Ahmad, S., & Al-Hussaini, T. M. (1991). Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 67–88.
- 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.
- Alkhatib, S. E., Matar, M. S., Tarlochan, F., Laban, O., Mohamed, A. S., & Alqwasm, N. (2019). Deformation modes and crashworthiness energy absorption of sinusoidally corrugated tubes manufactured by direct metal laser sintering. *Engineering Structures*, 201, 109838.
- Alzawi, A. M. A. (2011). *Vibration isolation using in-filled geofom trench barriers* (Doctoral dissertation). The University of Western Ontario, Canada.
- 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. S. R. K., & Nielsen, S. R. (2005). Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7–10), 701–716.
- Asdrubali, F., Pisello, A. L., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Cornicchia, M., & Fabiani, C. (2015). Innovative cardboard based panels with recycled materials from the packaging industry: Thermal and acoustic performance analysis. *Energy Procedia*, 78, 321–326.

- Auersch, L. (1988). Zur entstehung und ausbreitung von schienenverkehrserschütterungen: theoretische untersuchungen und messungen am hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental. *BAM-Forschungsbericht 155*, Berlin.
- Avilles, J., & Sanchez-Sesma, F. J. (1988). Foundation isolation from vibration using piles as barriers. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 114(11), 1854–1870.
- Babisch, W., Ising, H., Kruppa, B., & Wiens, D. (1994). The incidence of myocardial infarction and its relation to road traffic noise: The Berlin case-control studies. *Environmental International*, 20, 469–474.
- Babu, G. L. S., Srivastava, A., Rao, K. S. N., & Venkatesha, S. (2011). Analysis and design of vibration isolation system using open trenches. *International Journal of Geomechanics*, 11(5), 364–369.
- Bahrekazemi, M. (2004). *Train-induced ground vibration and its prediction* (Doktora tezi). Royal Institute of Technology.
- Baker, J. M. (1994). *An experimental study on vibration screening by in-filled trench barriers* (Master's thesis, State University of New York at Buffalo, USA).
- Ban, Y., & Miyamoto, T. (1975). Noise control of high-speed railways. *Journal of Sound and Vibration*, 43(2), 273–280.
- Banerjee, D., Das, P. P., & Foujdar, A. (2014). Association between road traffic noise and prevalence of coronary heart disease. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 2885–2893.
- Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of bases and foundations*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Bata, M. (1971). Effects on buildings of vibrations caused by traffic. *Building Science*, 6(4), 221–246.
- 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.
- Baziar, M. H., Shahnazari, H., & Kazemi, M. (2018). Mitigation of surface impact loading effects on the underground structures with geofoam barrier: Centrifuge modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 128–142.
- Belingard, P., Poisson, F., & Bellaj, S. (2012). Experimental study of noise barriers for high-speed trains. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, 18–22 October 2010* (pp. 495–503). Springer Japan.
- Beutel, M. E., Brähler, E., Ernst, M., Klein, E., Reiner, I., Wiltink, J., ... & Tibubos, A. N. (2020). Noise annoyance predicts symptoms of depression, anxiety and sleep disturbance 5 years later: Findings from the Gutenberg Health Study. *European Journal of Public Health*, 30(3), 487–492.
- Bewes, O. G. (2005). *The calculation of noise from railway bridges and viaducts* (Doctoral dissertation). University of Southampton.

- Bodare, A. (1999). *A simplified model for train induced ground vibrations* (Report). Div. of Soil and Rock Mechanics, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 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.
- Bos, J. (1997). Dutch group cuts steel bridge noise. *International Railway Journal and Rapid Transit Review*, 38(9).
- 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*.
- British Standards Institution (BSI). (2008). *BS 6472-1: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings–Vibration sources other than blasting*. British Standards Institution.
- Bunn, F., & Zannin, P. H. T. (2016). Assessment of railway noise in an urban setting. *Applied Acoustics*, 104, 16–23.
- 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, 956263.
- Cáceres-Naranjo, D., Bernad, C., Calvo, S., & Royo, J. M. (2023). Assessment and modelling of corrugated board dynamic properties under impact loads: Application to edge crush disposition. *Results in Engineering*, 18, 101072.
- 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., & 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., Fırat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ., & Kırtel, O. (2009). Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 824–833.
- Chew, C. H. (2000). Directivity of train noise in the vertical plane. *Building Acoustics*, 7(1), 41–56.
- 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., & Pflanz, G. (2021). Impediment of wave propagation from a moving source via the subsoil into the building. In *Wave Propagation Moving Load–Vibration Reduction* (pp. 101–111). CRC Press.
- 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.
- Çinicioğlu, Ö. (2016). *Toprak Basınçları ve Dayanma (İstinat) Yapıları*. İMO İstanbul Şubesi Geoteknik Kurs Notları.
- Coulier, P., & Hunt, H. E. (2014). Experimental study of a stiff wave barrier in gelatine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 459–463.
- 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>
- 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.
- Crocker, M. J. (Ed.). (2007). *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley & Sons.
- Dai, W. Q., Zheng, X., Hao, Z. Y., Qiu, Y., Li, H., & Luo, L. (2018). Aerodynamic noise radiating from the inter-coach windshield region of a high-speed train. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37(3), 590–610.
- Dawn, T. M. (1983). Ground vibrations from heavy freight trains. *Journal of Sound and Vibration*, 87(2), 351–356.
- Dawn, T. M., & Stanworth, C. G. (1979). Ground vibrations from passing trains. *Journal of Sound and Vibration*, 66(3), 355–362.
- De Vos, P. (2013). *Railway noise in Europe: State of the art report*. International Union of Railways.
- De Vos, P. (2016). *Railway noise in Europe: State of the art report*. International Union of Railways (UIC).
- De Vos, P. H. (1996). Railway noise: The physics of airborne sound generation and propagation. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 77–82.
- De Vos, P., & Van Lier, S. (2000). Noise-related roughness on railway wheels generated by tread braking. In *Proceedings of the Internoise 2000*, 31, 24–27.
- Degrande, G., & Lombaert, G. (2000, December). High-speed train induced free field vibrations: In situ measurements and numerical modelling. In *Proceedings of the International Workshop WAVE* (Vol. 200, pp. 29–41). Balkema, Rotterdam.
- Degrande, G., & Schillemans, L. (2001). Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, 247(1), 131–144.

- Deng, Y. Q., Xiao, X. B., He, B., & Jin, X. S. (2014). Analysis of external noise spectrum of high-speed railway. *Journal of Central South University*, 21(12), 4753–4761.
- Dijckmans, 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.
- Dittrich, M. G., & Janssens, M. H. A. (2000). Improved measurement methods for railway rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 595–609.
- Dolling, H. J. (1965). Schwingungsisolierung von Bauwerken durch tiefe auf geeignete Weise stabilisierte Schlitze. *VDI-Berichte*, 88, 37–41.
- Dolling, H. J. (1970). Die Abschirmung von Erschütterungen durch Bodenschlitze. *Die Bautechnik*, Heft 5, (1970) S. 151-158.
- dos Santos, J. M. L. (2024). *Soluções Inovadoras para Barreiras Acústicas em Ambiente Ferroviário* (Doctoral dissertation). Universidade do Porto, Portugal.
- Dumitriu, M., & Cruceanu, I. C. (2017). On the rolling noise reduction by using the rail damper. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 10(6).
- El Naggar, M. H., & Chehab, A. G. (2005). Vibration barriers for shock-producing equipment. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 297–306.
- EUROECRAN. (1995). *Noise barriers: State of the art* (Ref. 3A310351.TA1). European Rail Research Institute.
- Eyvazian, A. (2016). Mathematical model for thin-walled corrugated tube under axial compression. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 40, p. 02010). EDP Sciences.
- Federal Highway Administration. (2006). *FHWA road safety audit guidelines*. U.S. Department of Transportation.
- Fei, G. H. (2017, December). Acoustic performance of high-speed railway noise barriers under different conditions and some proposals for design guidance. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 255, No. 1, pp. 6072–6079). Institute of Noise Control Engineering.
- 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.
- Floud, S., Blangiardo, M., Clark, C., De Hoogh, K., Babisch, W., Houthuijs, D., ... & Hansell, A. L. (2013). Exposure to aircraft and road traffic noise and associations with heart disease and stroke in six European countries: A cross-sectional study. *Environmental Health*, 12, 1–11.
- Forchap, E., & Verbic, B. (1994). Wave propagation and reduction of foundation vibrations. In *Proceedings of Berg-Verlag GmbH* (pp. 165–178). Bochum.
- Fortin, G. Y., Elbadry, E. A., & Hamada, H. (2018). Crashworthiness of cardboard panels reinforced with braided glass fiber rods for vehicle side impact protection. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(23), 1387–1401.

- 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.
- Fujikake, T. (1986). A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains. *Journal of Sound and Vibration*, 111(2), 357–360.
- Fuyuki, M., & Matsumoto, Y. (1980). Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(6), 2051–2069.
- 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.
- 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., & Çelebi, E. (2013). Vibration reduction on surrounding buildings induced by high-speed trains. In C. Adam, R. Heuer, W. Lenhardt, & C. Schranz (Eds.), *Proceedings of the Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics (VEESD 2013)*. Vienna, Austria.
- Göktepe, F., Çelebi, E., & Küyük, H. S. (2017). Doğal arazi koşullarında yapı-zemin dinamik etkileşim deneyi. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 303–311.
- Grassie, S. L. (2009). Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 223(6), 581–596.
- Guidelines for the Assessment of Noise from Rail Infrastructure. (2013). *European Environment Agency*.
- Hajek, J. J., Blaney, C. T., & Hein, D. K. (2006). Mitigation of highway traffic-induced vibration. In *Proceedings of the 2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada* (pp. 1–13).
- Hannelius, L. (1974). *Svängningsrörelser i jord genom tågtrafic. Förnimmelser och effekter i byggnader (Oscillatory motions in the ground near train traffic)* (SGI Report No. 56). Statens Geotekniska Institut.
- Hanson, C. C., Towers, D., & Meister, L. (2005). *High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment* (HMMH Report No. 293630). U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration.
- Hanson, C. E., Towers, D. A., & Meister, L. D. (2006). *Transit noise and vibration impact assessment* (No. FTA-VA-90-1003-06). Federal Transit Administration.
- Hao, H., Ang, T. C., & Shen, J. (2001). Building vibration to traffic-induced ground motion. *Building and Environment*, 36(3), 321–336.
- Haralabidis, A. S., Dimakopoulou, K., Velonaki, V., Barbaglia, G., Mussin, M., Giampaolo, M., ... & HYENA Consortium. (2011). Can exposure to noise affect the 24 h blood pressure profile? Results from the HYENA study. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 65(6), 535–541.

- Haupt, W. A. (1978). Surface waves in nonhomogeneous half-space. In B. Prange (Ed.), *Dynamical methods in soil and rock mechanics* (pp. 335–367). A. A. Balkema.
- 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.
- He, B., Xiao, X., Zhou, X., Han, J., & Jin, X. (2015). Characteristics of sound insulation and insertion loss of different deloading sound barriers for high-speed railways. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Uddevalla, Sweden, 9–13 September 2013* (pp. 345–352). Springer Berlin Heidelberg.
- Hemsworth, B. (2008, April). *Environmental noise directive: Development of action plans for railways*. Paper prepared for UIC Noise Expert Network.
- Hemsworth, B., Gautier, P. E., & Jones, R. (2000, August). Silent freight and silent track projects. In *Proceedings of Internoise* (Vol. 200, pp. 714–719).
- Herbut, A. (2016). A study of the reduction of ground vibrations by an active generator. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 328–344.
- Hildebrand, R. (2004). Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(5), 411–424.
- Hohenwarter, D. (1990). Railway noise propagation models. *Journal of Sound and Vibration*, 141(1), 17–41.
- Hohenwarter, D. (1996, August). Barriers for railway noise: Measurements and calculations of the insertion loss. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 1996, No. 7, pp. 803–808). Institute of Noise Control Engineering.
- 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*, 114, 106602.
- İstegün, B. (2024). *Yüksek hızlı trenlerin ürettiği titreşimlerin azaltılması için önerilen bir dalga bariyer modelinin yerinde ölçümlerle etkinliğinin araştırılması* (Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye).
- İstegün, B., Çelebi, E., Kırtel, O., Faizan, A. A., Göktepe, F., Zülfiyar, 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, December). Foundation vibration isolation methods. In *Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics* (pp. 14–16).
- Janssens, M. H. A., & Thompson, D. J. (1996). A calculation model for the noise from steel railway bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 295–305.
- Janssens, M. H. A., Thompson, D. J., & Verheij, J. W. (1997, August). Application of a calculation model for low noise design of steel railway bridges. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 1997, No. 4, pp. 987–990). Institute of Noise Control Engineering.
- Jauhari, N., Hedge, A., & Chakraborty, P. (2023). Full scale field studies for assessing the vibration isolation performance of single and dual trenches. *Transportation Geotechnics*, 39, 100932.
- Jolibois, A. (2013). *A study on the acoustic performance of tramway low-height noise barriers: Gradient-based numerical optimization and experimental approaches* (Doctoral dissertation). Université Paris-Est.
- Jones, C. J. C. (1994, February). Use of numerical models to determine the effectiveness of anti-vibration systems for railways. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 105, No. 1, pp. 43–51). Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- Jones, C. J. C. (2000). Ground vibration from dynamic and quasi-static loads moving along a railway track on layered ground. In *WAVE2000*. Balkema, Rotterdam.
- 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., & Li, H. C. (2011). 3D analyses of open trench barriers filled with water. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 137(11), 1114–1120.
- 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.
- Kang, C. W., & Seo, Y. B. (2018). Sound absorption and sound transmission loss of perforated corrugated board. *Journal of Korea TAPPI*, 50(4), 32–39.
- Kang, C. W., Kim, M. K., & Jang, E. S. (2021). An experimental study on the performance of corrugated cardboard as a sustainable sound-absorbing and insulating material. *Sustainability*, 13(10), 5546.
- Kang, C. W., Kim, M. K., Jang, E. S., Lee, Y. H., & Jang, S. S. (2020). Sound absorption coefficient and sound transmission loss of porous sponge attached corrugated cardboard of noise insulation cover. *Journal of Korea TAPPI*, 52(1), 38–44.
- Karimi, M., & Younesian, D. (2014). Optimized T-shape and Y-shape inclined sound barriers for railway noise mitigation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 33(3), 357–370.
- Kausel, E. (1994). Thin-layer method: Formulation in the time domain. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(6), 927–941.

- Kim, T. M., & Kim, J. T. (2011). Comparison study of sound transmission loss in high-speed train. *International Journal of Railway*, 4(1), 19–27.
- King III, W. F. (1977). On the role of aerodynamically generated sound in determining wayside noise levels from high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 54(3), 361–378.
- King III, W. F., & Bechert, D. (1979). On the sources of wayside noise generated by high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 66(3), 311–332.
- Kitagawa, T., Nagakura, K., Tanaka, S., & Murata, K. (2015). Study on effective sound barriers for high-speed trains. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Uddevalla, Sweden, 9–13 September 2013* (pp. 683–690). Springer Berlin Heidelberg.
- Klein, R., Antes, H., & Le Houédec, D. (1997). Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches. *Computers & Structures*, 64(1–4), 809–817.
- Kouroussis, G., Connolly, D. P., Olivier, B., Laghrouche, O., & Costa, P. A. (2016). Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration. *Science of the Total Environment*, 557–558, 110–122.
- 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*, 482–483, 452–460.
- Koussa, F., Defrance, J., Jean, P., & Blanc-Benon, P. (2013). Acoustic performance of gabions noise barriers: Numerical and experimental approaches. *Applied Acoustics*, 74(1), 189–197.
- Kowalska-Koczwara, A., & Stypula, K. (2016). Assessment of the vibration influence on humans in buildings in the standards of different countries. *Procedia Engineering*, 161, 970–974.
- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2024). *Geotechnical earthquake engineering*. CRC Press.
- Krylov, V. V. (1995). Generation of ground vibrations by superfast trains. *Applied Acoustics*, 44(2), 149–164.
- Krylov, V., & Ferguson, C. (1994). Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains. *Applied Acoustics*, 42(3), 199–213.
- Kurze, U. J. (1996). Tools for measuring, predicting and reducing the environmental impact from railway noise and vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 237–251.
- Kurzweil, L. G. (1977). Prediction and control of noise from railway bridges and tracked transit elevated structures. *Journal of Sound and Vibration*, 51(3), 419–439.
- Lázaro, J., Pereira, M., Costa, P. A., & Godinho, L. (2022). Performance of low-height railway noise barriers with porous materials. *Applied Sciences*, 12(6), 2960.

- Lee, B., Chau, W., Lam, J., & Yeung, M. (2012). Planning and controlling railway noise in a metropolis: Our practical experience. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise, Nagahama, Japan, 18–22 October 2010* (pp. 17–23). Springer Japan.
- Lee, H. P., Lim, K. M., & Kumar, S. (2021). Noise assessment of elevated rapid transit railway lines and acoustic performance comparison of different noise barriers for mitigation of elevated railway tracks noise. *Applied Acoustics*, 183, 108340.
- Li, G. Q., Wang, Z. L., Chen, S., & Xu, Y. L. (2016). Field measurements and analyses of environmental vibrations induced by high-speed Maglev. *Science of the Total Environment*, 568, 1295–1307.
- Li, T., Qin, D., Zhang, W., & Zhang, J. (2020). Study on the aerodynamic noise characteristics of high-speed pantographs with different strip spacings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 202, 104191.
- Li, X., Zhang, X., Zhang, Z., Liu, Q., & Li, Y. (2015). Experimental research on noise emanating from concrete box-girder bridges on intercity railway lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(2), 125–135.
- Li, Z., Ma, M., Liu, K., & Jiang, B. (2023). Performance of rubber-concrete composite periodic barriers applied in attenuating ground vibrations induced by metro trains. *Engineering Structures*, 285, 116027.
- Liang, X. F., Liu, H. F., Dong, T. Y., Yang, Z. G., & Tan, X. M. (2020). Aerodynamic noise characteristics of high-speed train foremost bogie section. *Journal of Central South University*, 27(6), 1802–1813.
- Lichtberger, B. (2005). *Track compendium*. Eurailpress.
- Liu, D., Wang, C., Gonzalez-Libreros, J., Tu, Y., Elfgren, L., & Sas, G. (2023). A review on aerodynamic load and dynamic behavior of railway noise barriers when high-speed trains pass. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 239, 105458.
- 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.
- Lourenço De Sousa, L., Godinho, L., Amado Mendes, P., Montes González, D., & Barrigón Morillas, J. M. (2022, October). Different methods for evaluating the performance of barriers for railway noise mitigation / Diferentes métodos para avaliar o desempenho de barreiras para mitigação de ruído ferroviário. In *53º Congreso Español de Acústica – TecniAcústica 2022 & XII Congreso Ibérico de Acústica, Elche, Spain*.
- Lyratzakis, A., Tsompanakiz, Y., & Psorropoulos, P. N. (2021). Mitigation of vibrations in high-speed railway cuttings using expanded-polystyrene blocks. *Transportation Geotechnics*, 29, 100572.
- 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).

- Madshus, C., Bessason, B., & Hårvik, L. (1996). Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 195–203.
- Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1(3), 157–173.
- Maffei, L., Masullo, M., & Aletta, F. (2012, August). Influence of the design of railway noise barriers on soundscape perception. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2012, No. 10, pp. 1966–1972). Institute of Noise Control Engineering.
- Mahdavisefat, E., Salehzadeh, H., & Heshmati, A. A. (2018). Full-scale experimental study on screening effectiveness of SRM-filled trench barriers. *Geotech*, 68(10), 869–882.
- Makarewicz, R., Jarzęcki, J., Berezowska-Apolinarska, K., & Preis, A. (1989). Rail transportation noise with and without a barrier. *Applied Acoustics*, 26(2), 135–147.
- Maschke, C., Rupp, T., & Hecht, K. (2000). The influence of stressors on biochemical reactions: A review of present scientific findings with noise. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 203, 45–53.
- 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. (1993). Man-made vibrations and solutions.
- Massarsch, K. R. (2004). Mitigation of traffic-induced ground vibrations. In *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Massarsch, K. R. (2005). Vibration isolation using gas-filled cushions. *Soil dynamics symposium in honor of professor Richard D. Woods*, 1–20.
- Mauclair, M. B. (1990, August). Noise generated by high speed trains: New information acquired by SNCF in the field of acoustics, owing to the high-speed test program. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 1990, No. 5, pp. 371–374). Institute of Noise Control Engineering.
- McNeill, R. L., Margason, B. E., & Babcock, F. M. (1965). The role of soil dynamics in the design of stable test pads. In *Proceedings of the Guidance and Control Conference* (pp. 366–375).
- Mellet, C., Létourneaux, F., Poisson, F., & Talotte, C. (2006). High-speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3–5), 535–546.
- 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.
- Morgan, P. A., Hothersall, D. C., & Chandler-Wilde, S. N. (1998). Influence of shape and absorbing surface—A numerical study of railway noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 217(3), 405–417.

- Naghizadehrokhni, 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>
- Nelson, J. T., Saurenman, H. J., & Wilson, I. (1983). *State-of-the-art review: Prediction and control of groundborne noise and vibration from rail transit trains*.
- Neumeuer, H. (1963). Untersuchungen über die Abschirmung eines bestehenden Gebäudes gegen Erschütterungen beim Bau und Betrieb einer U-Bahnstrecke. *Baumaschine und Bautechnik*, 10(1), 23–29.
- Noger, C., Patrat, J. C., Peube, J., & Peube, J. L. (2000). Aeroacoustical study of the TGV pantograph recess. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 563–575.
- Ouyang, M., Chen, S., & Li, Q. (2023). Analysis of unsteady flow field and near-field aerodynamic noise of scale high-speed trains in long tunnel. *Applied Acoustics*, 205, 109261.
- Özgen, Ö. (2010). *Demiryolu gürültüsü ve etkili önlemlerin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, Z. & Arlı, V. (2009). Demiryolu mühendisliği. *ATM Matbaası*. İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, Z., & Arlı, V. (2010). *Demiryolunda gürültü ve titreşim sorunu*. İstanbul Ulaşım AŞ.
- Pan, D., Guo, Y. F., Fu, Y. G., Wang, X. N., & Tang, W. G. (2019). Static cushioning and energy absorption of composite layered structures with paper sandwich core and plastic foam. *Engineering Mechanics*, 36(2), 249–256.
- Pao, Y. H., & 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.
- Peris, E. (2020). Environmental noise in Europe: 2020. *European Environment Agency*.
- Peters, S. (1974). The prediction of railway noise profiles. *Journal of Sound and Vibration*, 32(1), 87–99.
- Pflanz, G., Hashimoto, K., & Chouw, N. (2002). Reduction of structural vibrations induced by a moving load. *Journal of applied mechanics*, 5, 555–563.
- Piechowicz, J. (2011). *Sound wave diffraction at the edge of a sound barrier*. Acta Physica Polonica A, 119(6A), 1040–1045.
- Poisson, F. (2015). Railway noise generated by high-speed trains. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 11th International Workshop on Railway Noise, Uddevalla, Sweden, 9–13 September 2013* (pp. 457–480). Springer Berlin Heidelberg.

- Poisson, F., & Margiocchi, F. (2006). The use of dynamic dampers on the rail to reduce the noise of steel railway bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3–5), 944–952.
- Poisson, F., Gautier, P. E., & Letourneaux, F. (2008, April). Noise sources for high-speed trains: A review of results in the TGV case. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, Munich, Germany, 4–8 September 2007* (pp. 71–77). Springer Berlin Heidelberg.
- Pu, X., & Shi, Z. (2020). Broadband surface wave attenuation in periodic trench barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 468, 115130.
- Pu, X., Meng, Q., & Shi, Z. (2020). Experimental studies on surface-wave isolation by periodic wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, 106000.
- Pu, X., Shi, Z., & Xiang, H. (2018). Feasibility of ambient vibration screening by periodic geofoam-filled trenches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 228–235.
- Ranjbar, M. (2018). Acoustic and sound insulation in rail systems. *Work*, 2(3).
- Rathe, E. J. (1977). Railway noise propagation. *Journal of Sound and Vibration*, 51(3), 371–388.
- Rayleigh, L. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1(1), 4–11.
- Remington, P. J. (1987). Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81(6), 1805–1823.
- 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.
- San Ha, N., & Lu, G. (2020). Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics. *Thin-Walled Structures*, 157, 106995.
- Sánchez-Sesma, F. J., Weaver, R. L., Kawase, H., Matsushima, S., Luzón, F., & Campillo, M. (2011). Energy partitions among elastic waves for dynamic surface loads in a semi-infinite solid. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1704–1709.
- Sarikavak, Y., & Boxall, A. (2019). The impacts of pollution for new high-speed railways: The case of noise in Turkey. *Acoustics Australia*, 47(2), 141–151.
- Segol, G., Lee, P. C., & Abel, J. F. (1978). Amplitude reduction of surface waves by trenches. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 104(3), 621–641.
- Sek, M. A., & Rouillard, V. (2005). Behaviour of multi-layered corrugated paperboard cushioning systems under impact loads. *Applied Mechanics and Materials*, 3, 383–390.
- Selander, J., Nilsson, M., Bluhm, G., Rosenlund, M., Lindqvist, M., Nise, G., & Pershagen, G. (2009). Long-term exposure to road traffic noise and myocardial infarction. *Epidemiology*, 20, 265–271.

- Sheng, T., Bian, X. C., Liu, G. B., Xiao, C., Chen, Y., & Li, Y. (2020). Experimental study on the sandbag isolator of buildings for subway-induced vertical vibration and secondary air-borne noise. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 504–515.
- Sheng, T., Bian, X. C., Xiao, C., Chen, Y., Liu, G. B., & Li, Y. (2021). Experimental study on a geosynthetics isolator for the base vibration isolation of buildings neighboring metro transportation. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4), 1066–1078.
- Sica, G., Peris, E., Woodcock, J. S., Moorhouse, A. T., & Waddington, D. C. (2014). Design of measurement methodology for the evaluation of human exposure to vibration in residential environments. *Science of the Total Environment*, 482, 461–471.
- 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.
- Subaşı, A., Çelebi, E., Navdar, M. B., Kırtel, O., & İstegün, B. (2024). An effective alternative to the open trench method for mitigating ground-borne environmental body waves: Corrugated cardboard boxes reinforced with balsa wood. *Applied Sciences*, 14(22), 10544. <https://doi.org/10.3390/app142210544>.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. (2010). *Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği*. Resmi Gazete, 27601.
- Takemiya, H. (1998). Lineside ground vibrations induced by high-speed train passage. In *Proceedings of the Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment* (pp. 43–49). Taiwan.
- Ten Wolde, T., & van Ruitten, C. J. M. (1983). Sources and mechanisms of wheel/rail noise: State-of-the-art and recent research. *Journal of Sound and Vibration*, 87(2), 147–160.
- Thompson, D. (2008). *Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier.
- Thompson, D. J. (2009). *Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control*. Oxford: Elsevier.
- Thompson, D. J., & Jones, C. J. C. (2000). A review of the modelling of wheel/rail noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 519–536.
- Thompson, D. J., Latorre Iglesias, E., Liu, X., Zhu, J., & Hu, Z. (2015). Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains. *International Journal of Rail Transportation*, 3(3), 119–150.
- Toygar, O. (2023). *Vibration isolation performance of coupled wave barriers* (Doktora tezi). Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi.
- 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.

- Ulgen, D., Ertugrul, O. L., & Ozkan, M. Y. (2016). Measurement of ground borne vibrations for foundation design and vibration isolation of a high-precision instrument. *Measurement*, 93, 385–396.
- URL1. *Noise control: Rail - Lillestrom 123*. Erişim tarihi: 5 Mart 2025, erişim adresi: <https://www.forster.at/en/noise%20control/rail/referenz/lillestroem-123/rel/80>.
- URL2. *Cardboard Boxes, Double Wall Cardboard Boxes*. (2024). Available online: <https://www.springpack.co.uk/381x254x254mm-dw-box-202043.html> (accessed on 20 May 2024).
- URL3. *Perlengkapan Pesta, Bungkus Kemasan, Kardus*. (2024). Available online: <https://www.tokopedia.com/homu88/homu-extra-kardus-packing-kotak-tambahan-untuk-produk-homu/> (accessed on 20 May 2024).
- URL4. *Balsa*. (2024). Available online: <http://www.hazarahsap.com.tr/balsa/index.html> (accessed on 26 May 2024).
- URL5. *Homepage, Art & Collectibles, Dolls & Miniatures, Dioramas*. (2024). Available online: <https://www.etsy.com/no-en/listing/1208893249/3-balsa-tablets-thickness-3mm-width-10cm/> (accessed on 20 May 2024).
- URL6. *Balsa Wood Profile*. (2024). Available online: https://www.mtsmalta.com/onlineshop/index.php?id_product=10188&controler=product&id_lang=1/ (accessed on 22 May 2024).
- URL7. *Adana-Mersin yolculuğu yüzde 30 zamlandı*. (2025). Çukurova Gazetesi. Available online: <https://www.cukurovagazetesi.com/haber/67477/adana-mersin-yolculugu-yuzde-30-zamlandi.html>.
- Verheijen, E., Elbers, F., & Golde, W. (2011). *Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways. Part I: National and European legislation and analysis of different noise limit systems* (First edition). Utrecht.
- Vogiatzis, K., & Kouroussis, G. (2017). Urban rail transit systems. In *Urban Transport Systems* (p. 61).
- Wang, D. (2010). Energy absorption diagrams of multi-layer corrugated boards. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(1), 58–61.
- Wang, Y. H. (2016). Numerical computation and optimization design of pantograph aerodynamic noise. *Journal of Vibroengineering*, 18(2), 1358–1369.
- Wang, Z. W., & Yu-Ping, E. (2011). Energy absorption properties of multi-layered corrugated paperboard in various ambient humidities. *Materials & Design*, 32(6), 3476–3485.
- Woods, R. D. (1968). Screening of surface waves in soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, 94(4), 951–979.
- Woods, R. D., Barnet, N. E., & Sangesser, R. (1974). Holography, a new tool for soil dynamics. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 100(11), 1231–1247.
- World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>.

- Wothge, J., Belke, C., Möhler, U., Guski, R., & Schreckenber, D. (2017). The combined effects of aircraft and road traffic noise and aircraft and railway noise on noise annoyance—An analysis in the context of the joint research initiative NORAH. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8), 871.
- Xia, H., Cao, Y. M., & Zhang, N. (2007). Numerical analysis of vibration effects of metro trains on surrounding environment. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 7(1), 151–166.
- 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., & 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>
- Xia, R. H., Guo, Y. F., Sun, D. Q., & Chen, D. B. (2013). Simulation analysis on vibration mode of X-PLY corrugated paperboard in transportation engineering. *Advanced Materials Research*, 791, 1084–1087.
- Xiao-Ming, T., Zhi-Gang, Y., Xi-Ming, T., Xiao-Long, W., & Jie, Z. (2018). Vortex structures and aeroacoustic performance of the flow field of the pantograph. *Journal of Sound and Vibration*, 432, 17–32.
- Xing, Y., Yang, S., Lu, S., Zhang, P., An, Y., & Zhai, J. (2022). Effect of bonding parameters on compression mechanical properties of bi-directional corrugated honeycomb aluminum. *The Journal of Adhesion*, 98(4), 348–366.
- 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, X. Y., Xiao, Y. G., & Shi, Y. (2013). Shape optimization of high-speed train pantograph insulators for low aerodynamic noise. *Applied Mechanics and Materials*, 249, 646–651.
- 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.
- Zhang, X., & Jonasson, H. (2000). Source modelling of train noise: Literature review and some initial measurements.
- Zhang, X., Liu, R., Cao, Z., Wang, X., & Li, X. (2019). Acoustic performance of a semi-closed noise barrier installed on a high-speed railway bridge: Measurement and analysis considering actual service conditions. *Measurement*, 138, 386–399.
- Zhang, Y. D., Han, L., Li, M., & Zhang, J. Y. (2017). Reduction of aerodynamic noise of high-speed train pantograph. *Journal of Mechanical Engineering*, 53(6), 94–101.

- 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, 101270.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ayşenur SUBAŞI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM

- 2015-2018: Kontrol Mühendisi-KRK Yapı Denetim LTD. ŞTİ.
- 2021-2023: Asistan Öğrenci-Sakarya Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği Bölümü
- 2023-Mart: Kahramanmaraş Depremi Sonrası Hasar Tespit Çalışmaları

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Subaşı, A., Çelebi, E., Navdar, M. B., Kırtel, O., İstegün, B. (2024). An Effective Alternative to the Open Trench Method for Mitigating Ground-Borne Environmental Body Waves: Corrugated Cardboard Boxes Reinforced with Balsa Wood. *Applied Sciences*, 14(22), 10544.

DİĞER ESERLER:

- Çelebi, E., Kırtel, O., İstegün, B., Navdar, M. B., 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, 118207.

- İstegün, B., Çelebi, E., Kırtel, O., Faizan, A. A., Göktepe, F., Zülfikar, 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.
- 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.
- 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.
- Subaşı, A., Çelebi, E., Kırtel O. Vibration Absorbing Box For Reducing Passenger Train-Induced Environmental Ground Motions, *Proceedings Of The 3rd International Civil Engineering & Architecture Conference*, 12–14 October 2023, Trabzon, Türkiye Icearc, Isbn: 978-605-81854-7-0.
- Subaşı, A. ve Çelebi, E., Titreşim Azaltan Karton Bariyerin Tasarım Sürecinde Ön Analizler, *12. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık Ve Tasarım Kongresi*, Yayıncı Sertifika No: 52866, E-ISBN:978-625-6471-17-7, 28 Aralık 2023.
- Subaşı, A., Çelebi, E., İstegün, B., Kırtel O., Göktepe, F., Navdar, M. B., Zülfikar, A. C., Yüksek Hızlı Tren Kaynaklı Çevresel Yer Titreşimlerinin Azaltılması: Açık Hendeklerde Prefabrike Panel Kullanımı., *TMMOB Raylı Sistemler Kongre ve Sergisi*, MMO YAYIN NO: E/MMO/746, Eskişehir - Türkiye 02-04 Kasım 2023, Yayın No: E/MMO/746, E- ISBN : 978-605-01-1586-4.