

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

**YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİNİN ÜRETTİĞİ BİNA
TİTREŞİMLERİNİN SAHA KOŞULLARINDA ÖLÇÜLMESİ VE
ULUSLARARASI STANDARTLARA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sami ATEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

Aralık 2021

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

**YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİNİN ÜRETTİĞİ BİNA
TİTREŞİMLERİNİN SAHA KOŞULLARINDA ÖLÇÜLMESİ VE
ULUSLARARASI STANDARTLARA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sami ATEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 21.12.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Sami ATEŞ

21.12.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Doç. Dr. Fatih GÖKTEPE, Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR, Dr. Öğr. Üyesi Osman KIRTEL ve Arş. Gör. Berna İSTEGÜN'e teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans bursiyeri olarak görev aldığım 217M427 proje nolu TÜBİTAK 1001 projesinin bu çalışmanın desteklenmesinde yaptığı maddi katkılardan dolayı TÜBİTAK'a ve projede birlikte görev yaptığım araştırmacı arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca beni teşvik eden, maddi ve manevi hiçbir şeyi esirgemeyen sevgili anne ve babam Güllü-Halil ATEŞ'e, ablama, abime desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Yüksek Hızlı Tren ve Yüksek Hızlı Demiryollarına Genel Bir Bakış	1
1.2. Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu Trafikinin Durumu	5
1.3. Çalışmanın Motivasyonu	11
1.4. İlgili Çalışmalar	12
1.5. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	25

BÖLÜM 2.

YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİNİN ÜRETTİĞİ BİNA TİTREŞİMLERİNİN SAHA KOŞULLARINDA ÖLÇÜLMESİ VE VERİ ANALİZİ	27
2.1. Test Alanlarının Belirlenmesi	29
2.1.1. Test sahası olarak Sapanca/Kırkpınar ve özellikleri	31
2.1.2. Test sahası olarak Gebze/GTÜ Kampüsü ve özellikleri	34
2.1.3. Test sahası olarak Pamukova/Yenice ve özellikleri	36

2.2. İvmeölçerlerin Teknik Özellikleri	38
2.3. Saha Testleri ve Veri Analizinin Yapılması	39

BÖLÜM 3.

ZEMİN TİTREŞİMLERİNİN İVME VERİLERİNDEN ELDE EDİLEN TEPKİ SPEKTRUMLARI İLE BİNA TİTREŞİM SEVİYELERİNİN ANALİZİ	42
3.1. Ölçüm Noktalarındaki Titreşim Seviyelerinin Karşılaştırmalı Analizi	42
3.1.1. Sapanca/Kırkpınar test alanında yapılan analizler	42
3.1.1.1. Sapanca/Kırkpınar test alanı doğal zemin bölümü analizleri	43
3.1.1.2. Sapanca/Kırkpınar test alanı hendekli zemin bölümü analizleri	46
3.1.1.3. Sapanca/Kırkpınar alanı doğal zemin ve hendekli zemin bölümü titreşim seviyelerinin karşılaştırmalı analizi	50
3.1.1.4. Yapı varlığının titreşim seviyesine etkisinin yapı-zemin etkileşimi açısından incelenmesi	59
3.1.2. Gebze/GTÜ Kampüs test alanında yapılan analizler	63
3.1.3. Pamukova/Yenice test alanında yapılan analizler	67
3.2. Farklı Test Sahalarındaki Titreşim Seviyelerinin Karşılaştırmalı Analizi	70

BÖLÜM 4.

DÜNYA STANDARTLARINA GÖRE TİTREŞİM VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	80
4.1. Amerikan Yönetmeliği Uygulama Adımları (FTA 2006-Federal Transit Administration Report)	81
4.1.1. FTA'da insan sağlığı ve konforu bakımından değerlendirme	82
4.1.2. FTA'da yapısal hasar bakımından değerlendirme	82

4.2. Alman Yönetmelikleri Uygulama Adımları (DIN 4150-2/3)	83
4.2.1. DIN 4150-2’de insan sağlığı ve konforu bakımından değerlendirme	84
4.2.2. DIN 4150-3’te yapısal hasar bakımından değerlendirme	84
4.3. Sapanca/Kırkpınar Test Sahasında Yapılan Titreşim Değerlendirmeleri	85
4.3.1. Bina içi titreşim değerlendirmeleri	85
4.3.1.1. Amerikan yönetmeliği (FTA) titreşim değerlendirmeleri	85
4.3.1.2. Alman yönetmeliği (DIN 4150-2/3) titreşim değerlendirmeleri	87
4.3.2. Doğal zemin bölümü titreşim değerlendirmeleri	89
4.3.2.1. Amerikan yönetmeliği (FTA) titreşim değerlendirmeleri	89
4.3.2.2. Alman yönetmeliği (DIN 4150-2/3) titreşim değerlendirmeleri	90
4.4. Pamukova/Yenice Test Sahasında Yapılan Titreşim Değerlendirmeleri	92
4.4.1. Amerikan yönetmeliği (FTA) titreşim değerlendirmeleri	92
4.4.2. Alman yönetmeliği (DIN 4150-2/3) titreşim değerlendirmeleri	94
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	96
 KAYNAKLAR	
ÖZGEÇMİŞ	101
	108

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

DIN 4150-2	: Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings. Germany.
DIN 4150-3	: Structural vibration - Effects of vibration on structures. Germany.
FTA	: Federal Transit Administration Report, High-speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment. U.S.A. 2006
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
Hz	: Hertz
kN	: kiloNewton
km/sa	: kilometre/saat
kW	: kiloWatt
L	: İvmeölçerlerin YHT hattına olan mesafesi
L_v	: FTA’da Tanımlanan Hız Seviyesi
PGA	: Pik İvme Genlik (Maksimum Yer İvmesi)
PPV	: Pik Partikül Hızı (Maksimum Partikül Hızı)
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
V	: Hız
VdB	: Desibel Cinsinden Titreşim Birimi (L_v birimi)
V_{ref}	: FTA’da Titreşim Parametresi İçin Alınan Referans Değer
V_w	: Maksimum RMS Genliği
YHD	: Yüksek Hızlı Demiryolları
YHT	: Yüksek Hızlı Tren

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yüksek hızlı tren, yüksek hızlı demiryolu ve sistem altyapısı	1
Şekil 1.2. Japonya'daki mevcut (a), yapılması planlanan ve devam eden (b) Shinkansen hatları	2
Şekil 1.3. İspanya'da YHD'lerin durumu	4
Şekil 1.4. Türkiye'de yüksek hızlı demiryollarının durumu	6
Şekil 1.5. HT65000 kodlu YHT seti	7
Şekil 1.6. HT80000 kodlu YHT seti	8
Şekil 1.7. Yıllara göre YHT'yi kullanan yolcuların dağılımı	8
Şekil 1.8. Taşımacılıkta yıllara göre YHT kullanım payı	10
Şekil 1.9. İvmeölçer yerleşim planı	21
Şekil 1.10. Dinamik yükün zamana bağlı değişimi	23
Şekil 1.11. Sahadaki ivmeölçerlerin oluşturulan modelde temsil edildiği noktalar	24
Şekil 2.1. YHT titreşim değerlendirmeleri işlem adımları	28
Şekil 2.2. Test sahalarının konumu	29
Şekil 2.3. Sismik Kırılma ve MASW arazi deneylerinin yapılışı	30
Şekil 2.4. YHT titreşimleri yayılma doğrultuları ve hatların isimlendirilmesi	31
Şekil 2.5. Sapanca/Kırkpınar test alanı uydu (a) ve saha (b) görüntüsü	31
Şekil 2.6. Sapanca/Kırkpınar test alanı ivmeölçer yerleşim planı	32
Şekil 2.7. Sapanca/Kırkpınar test alanında bulunan hendek	33
Şekil 2.8. Sapanca/Kırkpınar test sahasının yandan görünümü	33
Şekil 2.9. Gebze/GTÜ Kampüs test alanı uydu (a) ve saha görüntüsü (b), ivmeölçer yerleşim planı (c)	34
Şekil 2.10. Gebze/GTÜ Kampüs test sahasının yandan görünümü	35
Şekil 2.11. Pamukova/Yenice test alanı uydu (a) ve saha görüntüsü (b), ivmeölçer yerleşim planı (c)	36
Şekil 2.12. Pamukova/Yenice test sahasının yandan görünümü	37

Şekil 2.13. Saha ölçümlerinde kullanılan deney seti	38
Şekil 2.14. Örnek ivme kaydı	40
Şekil 2.15. İvme verisinin sıfır çizgisine hizalanması ve filtrelenmesi	41
Şekil 3.1. Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin ivmeölçer saha konumları (a), mesafe ve isimleri (b)	43
Şekil 3.2. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	44
Şekil 3.3. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	44
Şekil 3.4. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	45
Şekil 3.5. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	45
Şekil 3.6. Sapanca/Kırkpınar test sahasındaki hendek (a) ivmeölçer saha konumları (b), mesafe ve isimleri (c)	46
Şekil 3.7. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	47
Şekil 3.8. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	48
Şekil 3.9. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	48
Şekil 3.10. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	49
Şekil 3.11. Sapanca/Kırkpınar test sahasında bulunan hendeğin konumu	50
Şekil 3.12. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=12 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	51

Şekil 3.13. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=19 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	52
Şekil 3.14. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=26 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	52
Şekil 3.15. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=12 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	53
Şekil 3.16. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=19 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	54
Şekil 3.17. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=26 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	54
Şekil 3.18. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=16.5 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	55
Şekil 3.19. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=23.5 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	56
Şekil 3.20. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=30.5 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	56
Şekil 3.21. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=16.5 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	57
Şekil 3.22. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=23.5 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	58

Şekil 3.23. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için $L=30.5$ m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	58
Şekil 3.24. Yapı zemin kinematik etkileşiminin incelenmesi için verileri karşılaştırılan ivmeölçerler	60
Şekil 3.25. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	61
Şekil 3.26. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	61
Şekil 3.27. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	62
Şekil 3.28. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	62
Şekil 3.29. Gebze/GTÜ Kampüs test sahasında ivmeölçer saha konumları (a), mesafe ve isimleri (b)	63
Şekil 3.30. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	64
Şekil 3.31. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	65
Şekil 3.32. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	65
Şekil 3.33. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	66
Şekil 3.34. Pamukova/Yenice test sahasında ivmeölçer saha konumları (a), mesafe ve isimleri(b)	67
Şekil 3.35. Pamukova/Yenice mevkinde 1. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	68

Şekil 3.36. Pamukova/Yenice mevkinde 1. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	68
Şekil 3.37. Pamukova/Yenice mevkinde 2. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	69
Şekil 3.38. Pamukova/Yenice mevkinde 2. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	69
Şekil 3.39. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	71
Şekil 3.40. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=12 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	71
Şekil 3.41. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=19 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	72
Şekil 3.42. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=26 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	72
Şekil 3.43. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	73
Şekil 3.44. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=12 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	73
Şekil 3.45. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=19 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	74
Şekil 3.46. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=26 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	74
Şekil 3.47. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=9.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	75
Şekil 3.48. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=16.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	75
Şekil 3.49. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=23.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	76
Şekil 3.50. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=30.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	76
Şekil 3.51. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=9.5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	77

Şekil 3.52. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için $L=16.5$ m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	77
Şekil 3.53. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için $L=23.5$ m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	78
Şekil 3.54. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için $L=30.5$ m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması	78
Şekil 4.1. RMS değerlerinin grafiksel gösterimi ve hız zaman grafiğiyle karşılaştırılması (BH153)	85
Şekil 4.2. BH153 ivmeölçer verisinden oluşturulan Fourier genlik spektrumları ...	88
Şekil 4.3. RMS değerlerinin grafiksel gösterimi ve hız zaman grafiğiyle karşılaştırılması (SZ171)	89
Şekil 4.4. SZ171 ivmeölçer verisinden oluşturulan Fourier genlik spektrumları	91
Şekil 4.5. RMS değerlerinin grafiksel gösterimi ve hız zaman grafiğiyle karşılaştırılması (P153)	92
Şekil 4.6. P153 ivmeölçer verisinden oluşturulan Fourier genlik spektrumları	94

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Türkiye’de işletimde olan YHT hatlarının uzunlukları	6
Tablo 1.2. Türkiye’de yapımı devam eden YHT hatlarının uzunlukları	7
Tablo 1.3. Güzergâh ve yıllara göre YHT’yi kullanan yolcuların dağılımı	9
Tablo 1.4. 2019 yılında güzergâhlara göre düzenlenen YHT seferleri	9
Tablo 1.5. Yıllara göre ana hat ve YHD’de km başına düşen yolcu sayıları	10
Tablo 2.1. Test sahalarının seçiminde etkili olan parametreler	30
Tablo 2.2. Deney seti teknik ve donatımsal özellikleri	39
Tablo 4.1. Dünyada kullanılan bazı yönetmeliklerin uygulama esasları	80
Tablo 4.2. İnsan algısı bakımından FTA’daki eşik titreşim hız seviyeleri	82
Tablo 4.3. Yapısal hasar bakımından FTA’daki eşik titreşim hız seviyeleri	83
Tablo 4.4. İnsan algısı bakımından DIN 4150-2’deki eşik titreşim hız seviyeleri	84
Tablo 4.5. Yapısal hasar bakımından DIN 4150-3’teki eşik titreşim hız seviyeleri	84
Tablo 4.6. FTA’da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (BH153)	86
Tablo 4.7. DIN 4150-2/3’te tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (BH153)	87
Tablo 4.8. FTA’da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (SZ171)	90
Tablo 4.9. DIN 4150-2/3’te tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (SZ171)	90
Tablo 4.10. FTA’da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (P153)	93
Tablo 4.11. DIN 4150-2/3’te tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (P153)	94

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yüksek hızlı tren, titreşim seviyesi, yapısal tepki, serbest zemin titreşimi, bina titreşimi

Yüksek hızlı trenlerin (YHT) tekrarlı geçişleri, özellikle rijitliği düşük zemin koşullarında -alüvyon dolgu zeminler- farklı frekans içeriklerine sahip çevresel titreşimler meydana getirmektedir. Çevresel titreşimlerin oluşum mekanizmaları, zemindeki dalga yayılım özellikleri, tren hattına yakın binalarda oluşturduğu problemler bu çalışmanın araştırma konusudur.

Titreşimlerin ivme kayıtlarının alınması için zemin rijitliği düşük, YHT hattına yakın üç test alanı belirlenmiştir. İvme verileri tren hattına dik doğrultuda belirli aralıklarla konumlandırılan hassas ivmeölçerlerle kaydedilmiştir. Deneysel ölçümlerle kaydedilen ivme verilerinden ivme tepki spektrumları oluşturularak bina titreşim seviyeleri belirlenmiştir. İvme tepki spektrum grafiklerinin karşılaştırmalı analizleriyle titreşimlerin oluşum mekanizmaları ve dalga yayılım özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca bu analizlerle tren hattına dik uzaklığın, hendek tipi titreşim bariyerinin, yapı-zemin etkileşimi açısından kinematik etkileşimin, farklı tren geçiş hızlarının, farklı hafriyat (hemzemin-dolgu) profillerinin çevresel titreşimler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Titreşim seviyelerini Amerika (FTA) ve Almanya'da (DIN 4150-2/3) kullanılan yönetmeliklerle değerlendirmek için hız zaman ve Fourier genlik spektrum grafikleri oluşturulmuştur. Tren hatlarına yakın alanlarda meydana gelen çevresel titreşimler, titreşimleri insan sağlığı ve konforu ile yapısal hasar bakımından ele alan yönetmeliklerle (FTA, DIN 4150-2/3) değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak titreşim seviyesi tren hattından uzaklaştıkça genel olarak azalım göstermiştir. Yerel zemin koşullarında bulunan farklılıkların titreşim düzeyini büyük ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. FTA ve DIN 4150-2/3'e göre yapılan değerlendirmeler titreşim seviyesinin olumsuz etkiler oluşturabileceğini ortaya koymuştur. FTA'nın DIN 4150-2/3'e göre daha sınırlayıcı ve hassas bir değerlendirme yaptığı görülmüştür.

MEASUREMENT OF BUILDING VIBRATIONS INDUCED BY HIGH-SPEED RAILWAY TRAFFIC UNDER FIELD CONDITIONS AND EVALUATION ACCORDING TO INTERNATIONAL STANDARDS

SUMMARY

Keywords: High-speed train, vibration level, structural response, free-field ground vibration, building vibration

The repeated passages of high-speed trains (HSTs) cause environmental vibrations with different frequency contents, especially in low-rigidity soil conditions (alluvial soils). The formation mechanisms of environmental vibrations, wave propagation properties on the ground, and the problems they create in buildings close to the train line are the research subjects of this study.

In order to examine the acceleration records of the train-induced vibrations, three test areas close to the HST line with low soil stiffness were determined. Acceleration data were recorded with precision accelerometers placed at regular intervals in the perpendicular direction to the track line. In this study, building vibration levels were determined by generating response acceleration spectra using experimental results. The formation mechanisms of vibrations and wave propagation properties were investigated by comparative analysis of the response acceleration spectrum graphs. Furthermore, the effects of perpendicular distance to the track line, trench type of vibration barrier, kinematic interaction considering structure-soil interaction, train passages with different speeds, and effects of different embankment profiles on environmental vibrations were investigated in the present study.

Time-velocity and Fourier Amplitude spectrum graphs were created to evaluate the vibration levels with the international standards including USA (FTA 2012) and Germany (DIN 4150-2/3). Train-induced environmental ground-borne vibrations close to train lines were evaluated with regulations in terms of human perception and building damage.

As a result, the vibration level generally decreased with distance from the track line. From the results it is seen that, the differences in local ground conditions greatly affect the vibration level. Evaluations according to FTA and DIN 4150-2/3 norms revealed the negative effects of the train-induced vibration level. It is observed that FTA makes a more restrictive and sensitive assessment compared to DIN 4150-2/3.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Yüksek Hızlı Tren ve Yüksek Hızlı Demiryollarına Genel Bir Bakış

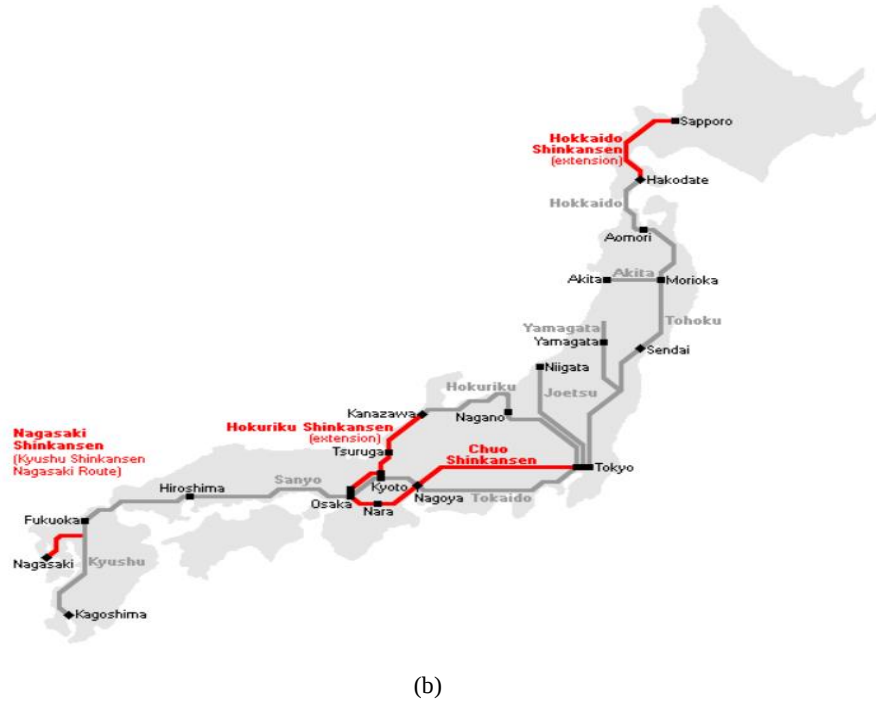
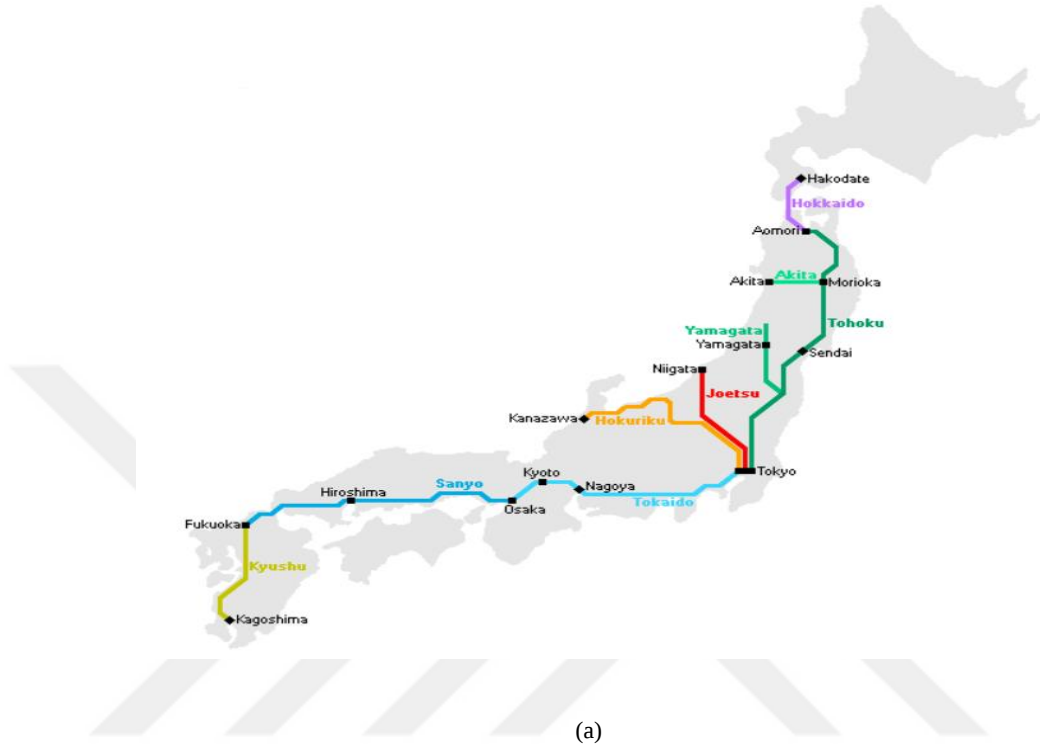
Yüksek hızlı tren kavramı genellikle saatte 200 kilometrenin üzerinde hız yapabilen yolcu trenleri için kullanılmaktadır. Çelik tekerleklerle sahip -yüksek hıza dayanabilen yeni bir alt yapısı olan, çelik ray teknolojisine bağlı olarak geliştirilen- yüksek hız trenleri saatte 300 kilometre hıza ulaşabilmektedir [1]. Örneğin Şekil 1.1.'de YHT, YHD ve sistem altyapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Yüksek hızlı tren, yüksek hızlı demiryolu ve sistem altyapısı [2]

Japonya'da saatte 210 km azami hız ile ilk seferini 1964 yılında yapan YHT, başkent Tokyo'dan Osaka'ya ulaşmıştır. Yapıldığı dönemde 553 kilometrelik yolu 2,5 saatte alarak hız rekoru kırmıştır. Yarım asırdan biraz fazla olan tarihsel sürecinde hiç kaza yapmayan YHT yıllık ortalama 324 milyon kişi tarafından kullanılmaktadır. Bu kullanım miktarıyla birlikte güvenli olması sebebiyle YHT'ye olan talep daha da artmaktadır [1]. Aşağıda Şekil 1.2. (a)'da Japonya'da kullanımda olan, Şekil 1.2. (b)'

de ise artan talebi karşılamak üzere yapımı devam eden ve yapılması planlanan YHD gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Japonya'daki mevcut (a), yapılması planlanan ve devam eden (b) Shinkansen hatları [3]

Çin YHT teknolojisini diğer ülkelere göre daha sonra kullanmaya başlasa da sonradan yaptığı atılımlarla dünyadaki en büyük YHD ağına sahip olmuştur. 2004 yılında hizmete sunulan Şangay Maglev Sistemi, şehir merkezi ile 30 km mesafedeki havaalanını birbirine bağlamakta ve hat üzerindeki trenlerin servis hızı saatte 431 km'ye ulaşmaktadır. Bu servis hızı ile alanında dünyada tektir [4].

Fransa'da ilk YHT seferi 1981 yılında Paris ve Lyon şehirleri arasında yapılmıştır. YHT'nin merkezi Paris olmak üzere günümüzde çeşitli şehirlere ve komşu ülkelere düzenli seferler yapılmaktadır. Fransa'da YHT hızları hatlara göre değişiklik göstermektedir. YHD toplam uzunluğu 1872 kilometredir.

14 Kasım 1994'te açılan Manş Tüneli Londra, Paris ve Brüksel Eurotunnel kapsamında birbirine bağlanmıştır. Eurotunnel'de Eurostar trenleri kullanılmaktadır. Bu hattı EPS (İngiltere Demiryolları), SNCF (Fransız Ulusal Demiryolları), SNCB (Belçika Ulusal Demiryolları) işletmektedir. İngiltere'de kullanılan 400 metre uzunluğa sahip, 800 yolcu kapasiteli Eurostar trenleri saatte 300 kilometre hıza ulaşabilmektedir.

Almanya'da YHD'ler 1980'li yıllarda hizmete açılmıştır. Almanya, Frankfurt-Köln ve Münih-Nurember arasında altyapısı saatteki hızı 290 kilometreye izin veren iki hatta sahiptir. Ülkede çoğunlukla saatte 194 kilometre dolaylarındaki işletme hızına sahip YHT'ler kullanılmaktadır.

İtalya'da, Roma-Floransa arasındaki 262 kilometrelik hat üzerindeki YHT'ler maksimum saatte 250 kilometrelik hızla çalıştırılmaktadır. İtalya'da 600 kilometrelik YHD inşaat halindedir ve bu hatlarda planlanan YHT hızının saatte 250 kilometre olacağı öngörülmektedir.

İspanya'da ilk YHD 1992 yılında başkent Madrid ile Sevilla arasında kullanıma açılan 471 km'lik hattır. İspanya devlet demir yolları RENFE tarafından işletilen YHT'ler TGV ve AVE bazlıdır. Bu trenlerin yanısıra yerel olarak geliştirilmiş Talgo trenleri İspanya demiryollarında kullanılmaktadır. Talgo trenlerinin en önemli özelliği hem YHD'lerde hem de klasik tren hatlarında kullanılabilmeleridir. Talgo trenleri

maksimum 220 km/sa'lik bir hıza ulaşabilirken, AVE'ler saatte 300 km yol alabilmektedir [4]. İspanya'da YHD'lerin durumu Şekil 1.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. İspanya'da YHD'lerin durumu [5]

Tren teknolojisinin gelişmesiyle birlikte tren hızları artmış ve YHT'ler ortaya çıkmıştır. Tren hızının artması trenlerin oluşturduğu titreşim büyüklüğünü de artırmıştır. Hızlı ve güvenli olması sebebiyle YHT'lere olan talep zamanla artmış ve YHD ağları büyük bir yayılma alanı bulmuştur.

Gelişen YHD ağları gerek şehir merkezlerinde -şehir merkezlerinde daha çok- gerekse kırsal alanda birçok yapının yakınından geçmektedir. YHT'lerin hızlı olması ve YHD'de otomasyon sistemlerinin kullanılması seferlerin daha düzenli yapılmasını

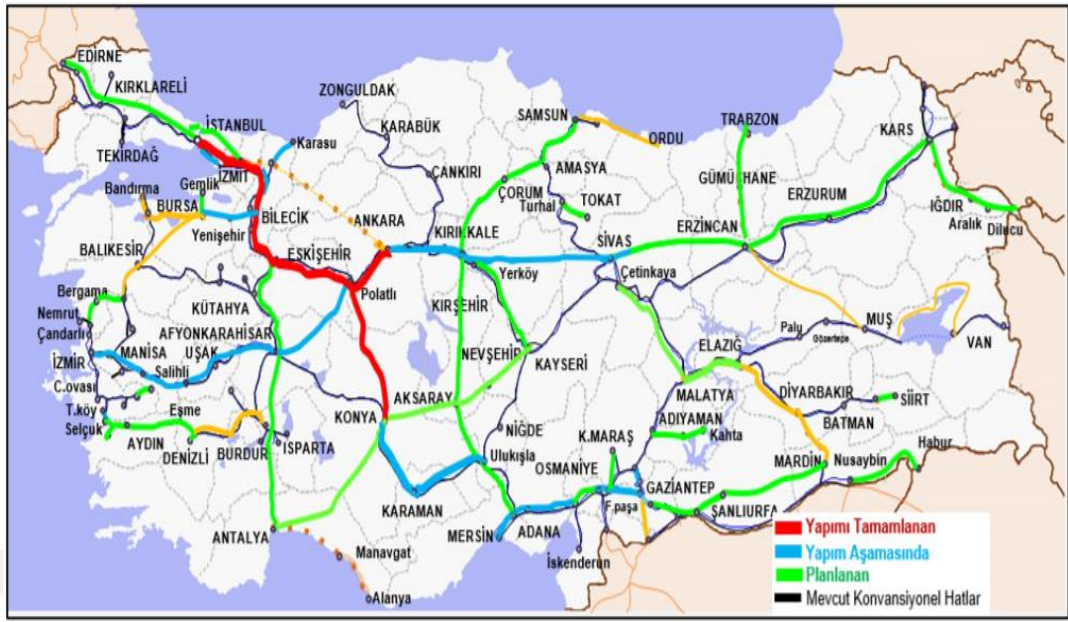
sağlayarak, sefer sayılarını artırmıştır, bu durum YHT'lerin ürettiği titreşim sayısını da önemli ölçüde çoğaltmaktadır.

YHD çevresindeki artan titreşim, çevre alanlarda bulunan yapılar ve bu yapıları kullanan insanlarda çeşitli etkiler oluşturmaktadır. Bu etkilerin araştırılması birçok çalışmanın yapılmasını gerekli hale getirmiştir. YHT titreşimleri böylece inşaat mühendisliğinde yapı bilim dalının önemli çalışma alanlarından biri haline gelmiştir.

1.2. Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu Trafiğinin Durumu

Türkiye’de demiryolu yapımı çok daha eskiye dayansa da YHT hatlarının kullanımı yakın geçmişte başlamıştır. Türkiye’deki ilk YHT hattı 13 Mart 2009 tarihinde kullanıma açılan Ankara-Eskişehir arasındaki hattır. Hattın kullanılmaya başlanmasıyla birlikte 3 saatlik mesafe 1 saat 25 dakikaya düşmüştür. Bir sonraki gelişme ise 17 Aralık 2010 (Bu tarih atıf yapılan kaynak [6]’da bu şekilde verilmiştir ancak TCDD resmî sitesi olan kaynak [7]’de 23 Ağustos 2011 olarak belirtilmiştir.) tarihinde Ankara-Konya hattının açılmasıyla gerçekleşmiştir. YHT ile Ankara-Konya arası mesafe 1 saat 35 dakika sürmektedir. 2014 yılında Eskişehir-İstanbul arasındaki hat tamamlanarak kullanıma açılmış böylece Ankara-Eskişehir-İstanbul birbirine bağlanmıştır. Bu hat ile Ankara-İstanbul arasındaki seyahat süresi 3 saat 45 dakikadır. Türkiye’de mevcut kullanılan YHT hatları Ankara-Eskişehir-İstanbul ve Ankara-Konya hatlarıdır. Önümüzdeki yıllarda yapılmak istenen hatlar Ankara-Afyon-Uşak-İzmir hattı, Ankara-Sivas hattı, Osmaneli-Bursa hattı ve İstanbul-Edirne hatlarıdır. 2011 yılında Mevlâna Kalkınma Ajansı’nın hazırladığı rapora göre; Avrupa-İran, Avrupa-Ortadoğu arasında kurulmak istenen İpek Yolu Yüksek Hızlı Tren projesi için, Türkiye’deki Ankara-Tiflis bağlantısı çok önemlidir [6].

Gelişen YHT teknolojileriyle birlikte demiryolu ulamışında tren hızları artarak hizmet standartları yükselmiştir. Türkiye son yıllarda demiryolu yapımına önem vermiş ve yeni yapılan demir yollarının hizmet hızları teknolojiye paralel olarak artmıştır. Aşağıda Şekil 1.4.’te Türkiye’de YHD’nin durumu gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Türkiye’de yüksek hızlı demiryollarının durumu [8]

TCDD, 2019 yılı sonu itibariyle 11.590 km konvansiyonel hat ve 1.213 km YHT hattı olmak üzere toplam 12.803 km demiryolu ağı ile tren işletmeciliği hizmeti vermektedir [9]. Türkiye’de mevcut YHT hat uzunlarının güzergahlara göre dağılımı Tablo 1.1.’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Türkiye’de işletimde olan YHT hatlarının uzunlukları [10]

Hat Kesimi	1. Hat	2. Hat	Toplam Anahat	İstasyon Yolu	Toplam
Sincan-Eskişehir	221	221	442	3	445
Eskişehir-Pendik	155	151	306	13	319
Polatlı-Konya	212	213	425	13	438
Eskişehir-Konya müselles dahil	6	5	11	-	11
Toplam	594	590	1 184	29	1 213

Türkiye’de yapımı devam eden YHT hatları ile YHD ağı giderek büyümektedir. Tablo 1.2.’de yapımı devam eden YHT hatlarının güzergahlara göre dağılımı gösterilmiştir.

Tablo 1.2. Türkiye’de yapımı devam eden YHT hatlarının uzunlukları [2]

2019

Hat Adı	Güzergâh Uzunluğu (km)	Toplam Hat Uzunluk (km)	İşin Niteliği	Fiziki İlerleme (%)
Ankara-Sivas	393	786	Altyapı+Üstyapı +EST Yapımı	97
Ankara-İzmir (Polatlı-İzmir)	508	1 035	Kayaş-Yerköy Yerköy-Sivas	24
Menemen-Manisa Dahil			Altyapı Yapımı	50
Ankara-İstanbul Doğançay	14	28	Altyapı Yapımı	37
Ripajı 1				100
Ankara-İstanbul Doğançay	12	24	Altyapı+Üstyapı +EST Yapımı	7
Ripajı 2				
Ankara-İstanbul T26 Tüneli	8	16	Altyapı Yapımı	35
TOPLAM	935	1 889		

Türkiye’de YHD üzerinde iki farklı YHT seti kullanılmaktadır. Bunlardan ilki İspanya’da bulunan CAF firmasından temin edilen HT65000 kodlu tren setidir. Sonraki süreçte Siemens AG tarafından üretilen Siemens Velaro marka HT80000 kodlu tren seti alınmıştır. Türkiye’de 12 adet HT65000, 7 adet HT80000 olmak üzere toplam 19 adet YHT seti bulunmaktadır.

HT65000 tren seti 6 vagonlardan oluşmakta, saatte 250 km hız ile hizmet verebilmektedir. Azami gücü 4800 kW olan trenin uzunluğu 158.92 metredir. Tek seferde toplam 419 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir [11]. HT65000 tren seti Şekil 1.5.’te gösterilmiştir.



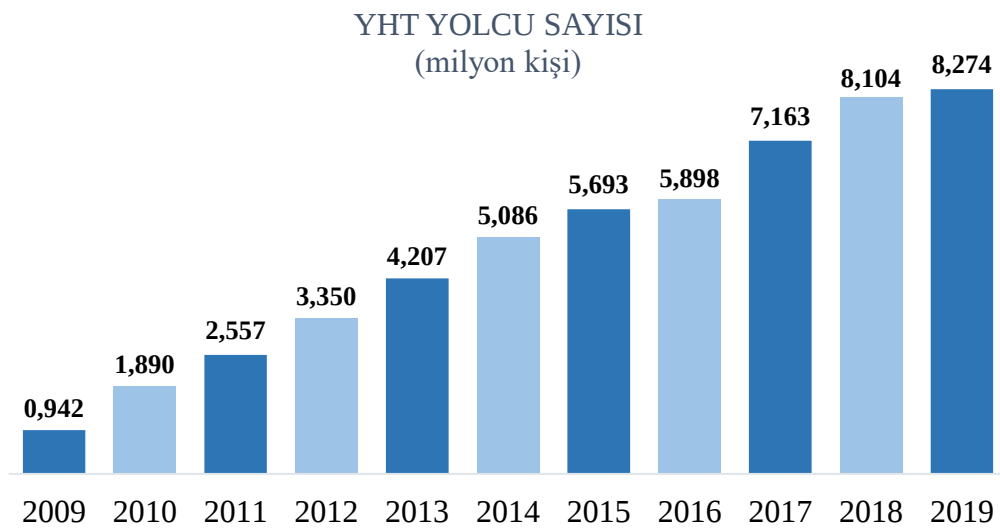
Şekil 1.5. HT65000 kodlu YHT seti [12]

HT80000 tren seti 8 vagonlardan oluşmakta ve saatte 300 km hız ile hizmet verebilmektedir. Azami gücü 8000 kW olan trenin uzunluğu 200 metredir. Üreticinin veri kitapçığında trenin oturma yeri sayısının 500'den fazla olduğu belirtilmiştir [13]. Şekil 1.6.'da HT80000 tren seti gösterilmiştir.



Şekil 1.6. HT80000 kodlu YHT seti [10]

YHT kullanımı TCDD verilerine göre her yıl artış göstermiştir. Bu durum YHD yatırımlarını ve yapılan sefer sayılarını artırarak YHT'nin çevresel etkilerini daha da önemli hale getirmektedir. Aşağıda Şekil 1.7.'de yıllara göre YHT'yi kullanan yolcu sayısı gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Yıllara göre YHT'yi kullanan yolcuların dağılımı [9]

Güzergâh ve yıllara göre YHT kullanımı (bin kişi) Tablo 1.3.'te gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Güzergâh ve yıllara göre YHT'yi kullanan yolcuların dağılımı [9]

YHT GÜZERGÂHI	2009-2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	TOPLAM
Ankara-Eskişehir	9 224	1 924	1 280	1 237	1 339	1 426	1 509	17 940
Ankara-Konya	3 523	1 890	1 799	1 775	2 047	2 243	2 099	15 374
Ankara-İstanbul	-	992	1 956	2 203	2 873	3 269	3 418	14 710
Konya-Eskişehir/ İstanbul*	198	279	659	684	905	1 167	1 248	5 140
TOPLAM	12 946	5 086	5 693	5 898	7 163	8 104	8 274	53 164

(*) 2013 ve 2014 yıllarında Konya-Eskişehir olarak işletilen YHT yolcu trenleri, Eskişehir-İstanbul hattının açılması ile Konya-İstanbul olarak işletilmeye devam edilmiştir.

TCDD iklim şartları ve yolcu taleplerini dikkate alarak düzenleyeceği seferleri belirlemektedir. 2019 yılında yaz tarifesinde toplam 48 sefer, kış tarifesinde ise 44 YHT seferi düzenlenmiştir [9]. Tablo 1.4.'te sefer sayılarının güzergahlara göre dağılımı gösterilmiştir.

Tablo 1.4. 2019 yılında güzergâhlara göre düzenlenen YHT seferleri [9]

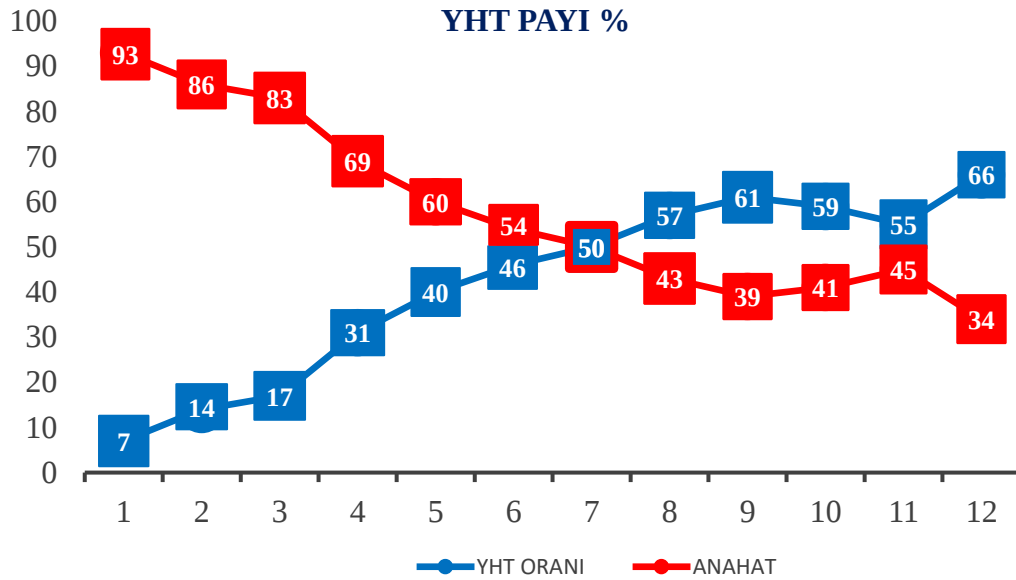
YHT HAT KESİMİ	KIŞ TARİFESİ	YAZ TARİFESİ
Ankara-Eskişehir	10	12
Ankara-Konya	14	14
Ankara-İstanbul (Pendik)	14	-
Konya-İstanbul (Pendik)	6	-
Ankara-İstanbul (Söğütlüçeşme)	-	14
Ankara-İstanbul (Halkalı)	-	2
Konya-İstanbul (Söğütlüçeşme)	-	4
Konya-İstanbul (Halkalı)	-	2
TOPLAM	44	48

YHT kullanımı son yıllarda diğer trenlerin kullanımının da önüne geçmiştir. Ana hat ve YHD'de yıllara göre km başına düşen yolcu sayıları Tablo 1.5.'te gösterilmiştir.

Tablo 1.5. Yıllara göre ana hat ve YHT'de km başına düşen yolcu sayıları [10]

	Yolcu Km (Milyon)									
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
ANAHAT	2 035	1 790	1 833	1 812	1 397	1 426	1 762	2 163	495	
YHT	914	1 186	1 555	1 847	1 871	2 218	2 551	2 678	941	
TOPLAM	2 949	2 976	3 388	3 659	3 268	3 644	4 313	4 841	1 436	
Uluslararası taşımacılık dahil edilmemiştir.										

Taşımacılıkta YHT kullanım payının yıllara göre yüzdelik değişimi ise Şekil 1.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Taşımacılıkta yıllara göre YHT kullanım payı [10]

Yakın tarihte gerçekleşen YHT teknolojisindeki gelişim ve YHD'nin hızla yaygınlaşması, bu teknolojinin çevresel etkilerinin araştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Hem dünyada hem de Türkiye'de çok yeni bir araştırma alanı olarak güncelliğini korumaktadır. Dünyada Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya gibi bazı ülkeler YHT titreşimlerine yönelik ulusal normlar oluşturmuşlardır. Türkiye'de YHT titreşimlerinin standartlarını belirleyen ulusal bir norm henüz bulunmamaktadır.

1.3. Çalışmanın Motivasyonu

Son yıllarda insanların yaşam standartlarının teknolojik ve ekonomik gelişmelere bağlı olarak yükselmesiyle kent gibi yoğun yerleşim bölgelerinde yaşayan insanların, daha güvenli ve kaliteli yaşama talepleri, çevresel faktörler tarafından oluşturulan problemlere gösterdiği hassasiyetler büyük bir hızla artmaktadır. Deprem gibi doğal yer hareketlerinin yanı sıra yüksek frekanslı yapay titreşim kaynaklarının (masif inşaat aktiviteleri, ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik akış yükleri, patlamalar vb.) ürettiği çevresel titreşim problemlerine mühendislik çözümleri sunmak önem kazanmıştır [14-15-16]. Bir çevresel titreşim problemi olarak mevcut, inşaatı devam eden ve geçirilmesi planlanan YHT hatları için, kapsamlı saha araştırmalarının gerekliliği güncelliğini koruyan bir konudur [17].

Yoğun yerleşim bölgelerinde yetersiz inşaat alanı YHT hatlarının, mevcut yapıların yakınından geçirilmesini zorunlu kılmıştır. Ayrıca kurulması planlanan pek çok yapının -özellikle ticari işletmelerin lojistik vb. faaliyetleri sebebiyle- ulaşım hizmetlerine yakın inşa edilmek istenmesi, bilinçli bir tercih olmaktadır. Bu durumların her ikisine sahip olan dünyada ve Türkiye’de yapımı devam eden ve planlanan YHT hatları ile, çevresel titreşim probleminin boyutu hızla artmakta ve çözüm ihtiyacı büyümektedir.

Yüksek işletme hızlarına sahip YHT’ler, tekrarlı geçişlerle yüksek frekanslı dinamik yükler oluştururlar. Titreşen YHD üst yapısı, titreşim enerjisini çevresindeki zemin ortamına aktarır. İletilen titreşim enerjisi zeminin dalga yayılımı özelliklerine göre biçimlenen kuvvetli yer hareketlerini meydana getirerek demiryolu ağına yakın bölgelerde bulunan yapıları ve canlıları etkiler. Bu yer hareketleri binalara ve temellerine zarar verebileceği gibi bu binaları kullanan insanlara da konfor bozucu titreşimleriyle rahatsızlık verebilir [17]. Böylece YHD hatlarının yakın çevresini, titreşimlerin ürettiği kuvvetli yer hareketlerinden koruma ihtiyacı ve titreşim enerjisini azaltmak için arazide optimum yalıtım araçlarının bulunması, zemine bağlı dalga yayılımı probleminin iyi anlaşılmasını gerektirir [18].

Gelişen YHD ağının sosyal ve ekonomik faydalarının yanında getirdiği genellikle uzun süreçte belirti veren zaman zaman göz ardı edilebilen zararlı etkilerinin azaltılması gereklidir. Bu etkilerin azaltılması için YHT'lerin yüksek hızda tekrarlı geçişlerinin matematik ve bilgisayar modellerinin oluşturulduğu birçok araştırma yapılmaktadır. Saha koşullarında değişen çok sayıda parametrenin modellere aktarılmasındaki güçlük ve modellerde yapılan idealleştirmeler çalışmaları gerçeklikten uzaklaştırmaktadır. Bu durum saha koşullarını dikkate alan deneysel çalışmaların önemini artırmaktadır.

YHD ağı yakın çevresinde pek çok farklı işlevsel özelliğe sahip yapı bulunabilir. Gelişmiş hassas üretim tesisleri, tıbbi laboratuvarlar, nükleer santraller, birçok kimyasal madde üretim tesisi vb. yapılar hassas teçhizatlar kullanılmasını gerektirir. Bu tür ekipmanlar YHT'lerin yüksek hızlı tekrarlı geçişleri nedeniyle hasar alabilir veya çalışmaları etkilenebilir. Tıbbi görüntüleme cihazları gibi titreşime duyarlı donanımların çoğu, 8-100 Hz arasındaki titreşim frekansları için tanımlanmış hassasiyetlere sahiptir. Ayrıca 8-80 Hz arasındaki frekansa sahip titreşimlerle, insan sağlığı ve konforu tehlikeye girer [19]. YHD ağına yakın bölgelerde YHT geçişleri ile oluşan titreşimlerin yapı işlevlerini etkilemeyecek seviyeye indirgenmesi gereklidir. Yapıların fonksiyonlarına göre bu seviyeleri belirten yönetmelikler oluşturulmalıdır.

1.4. İlgili Çalışmalar

YHT kaynaklı titreşimler ve buna bağlı zararlı etkiler son yıllarda daha da belirgin hale gelmiştir. Dünya nüfusunun hayat standartlarının yükselmesi, ekonomik, hızlı, güvenli ve konforlu seyahat ihtiyacını artırmış, bu durum YHD ağının genişlemesine mevcut hatların YHT'ler tarafından kullanılmak üzere iyileştirilmesine sebep olmuştur. YHT'lerin tekrarlı geçişleri ile artan titreşimler yapı güvenliğini, insan sağlık ve konforunu tehdit ederek önemli bir çevre sorununa dönüşmüştür [20]. YHD taşımacılığının yoğun yerleşim bölgelerinde ürettiği çevresel titreşimlerin etkileri, trafik sistemi tasarımcılarının, ulaşım sistemi planlayıcılarının ve çevre sorunları ile ilgili araştırmacı mühendislerin ilgisini çekerek pek çok araştırma yapılmış, elde edilen önemli sonuçlar yayınlanmıştır.

Adolfsson ve ark. [21] tarafından İsveç'in batı sahil hattında Malmö-Göteborg arasında hizmet veren X2000 tipi trenlerin 200 km/sa'ti aşan hızlarda ürettiği çevresel titreşimler kayıt altına alınmış, titreşim etkilerini kapsayan çevresel değerlendirme sonuçları yeni ulaşım sistemlerinin tasarımı ve planlanmasında kullanılmak üzere yayınlanmıştır.

Sanayei ve ark. [22] tren ve metroların ürettiği çevresel titreşimlerin zararlı etkilerinin azaltılması amacıyla; tasarım aşamasında titreşim azaltma sistemlerinin dahil edilmesi ve hizmet verilebilirlik sınırlarını karşılamak için, bir yapının inşasından önce titreşim özelliklerinin anlaşılmasını ve karakterizasyonunun bilinmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında bina temel seviyesinde ve açık alanlarda titreşim kayıtları olarak açık alan ve bina içi titreşim kayıtlarını karşılaştırmışlardır. Bu bağlamda Boston bölgesinde üçü tren üçü metro olmak üzere altı çalışma sahası seçilmiş yer kaynaklı titreşimlerin araştırılması gerçekleştirilmiştir. Trenlerin sebep olduğu açık alan titreşim seviyelerinin muhafazakâr bir şekilde binaların tasarımında kullanılabileceği bulunmuştur. Ancak gözlemlerdeki tutarsızlık sebebiyle, metro kaynaklı bina titreşimleri için benzer bir sonuca ulaşılamamıştır.

Connolly ve ark. [23] çalışmalarında, 5.5 m yüksekliğinde bir dolgu, bir hemzemin kesim ve 7.2 m derinliğinde bir kesmeden oluşan üç farklı sahanın titreşim yayılım özelliklerini araştırmak için Belçika yüksek hızlı demiryolu ağı üzerinde tren hattından 100 metreye kadar üç yönlü deneysel ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Yaygın kanı olan teorinin aksine, dikey titreşimlerin her zaman en baskın olmadığı ve özellikle daha uzak mesafelerde yatay titreşimlerin de dikkate alınması gerektiği ve dolgu-toprak işleri profilinin en düşük ve kesmenin en yüksek titreşim seviyelerini ürettiği bulunmuştur.

Feng ve ark. [24] YHT'lerin hızla büyümesi ve uygulanmasının Çin'deki yolculara büyük kolaylıklar sağladığını bunun yanısıra neden olduğu titreşimlerin, hat çevresinde olumsuz etkilerinin olabileceğini, bunun da araştırmacıların ve hükümetlerin endişelerini artırdığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada Pekin-Şangay YHD'sinde dolgu, menfez, viyadük ve serbest geçiş bölgelerinde YHT tarafından

Üretilen zemin titreşimleri yerinde kaydedilmiştir. Saatteki hızı 250-350 km olan YHT'lerin ürettiği serbest zemin titreşimleri  yönlü (x, y, z) llmştır. Ölçülen ivme verilerinden serbest zemine ait diğer tepki değerlendirme parametreleri elde edilmiştir. Tren hattına olan uzaklığa göre titreşim genlikleri ve titreşim seviyeleri incelenmiştir. Hatta yakın alanlarda tipik olarak düşey ivme genliklerinin büyük olduğu gözlemlenirken, hattan uzak bölgelerde enine ivme tepkisinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bir menfezli veya viyadkl durumda ise, yakın alanda hatta paralel doğrultudaki titreşim genlikleri büyük olmaktadır. Son olarak bu çalışmanın titreşim tahminlerinin doğrulanması için değerli olduğu belirtilmiştir.

Zhang ve ark. [25] yaptığı çalışmada, Çin'in şangay kentinin kuzeybatısında Pekin-şanghay Demiryolu altında bulunan 11 nolu metro hattından geçen trenlerin sebep olduğu titreşimlerin saha ölçümleri sunulmaktadır. Yüzey ve metro trenlerinin ayrı ve eř zamanlı geçişleri için yüzey zemin ve tünel ivmeleri ölçülmüş ve sonuçlar eř zamanlı çalışma tarafından indüklenen titreşimin önemli frekans bileşenlerinin, ayrı işlem tarafından indklenenleri kapsayacak şekilde yeniden dağıtıldığı gösterilmiştir. Yapılan deneysel testten ölçülen verilerin, benzer dolgu tünel sistemlerinin tren kaynaklı titreşimini tahmin etmek için gelecekteki sayısal modelleri doğrulamak amacıyla da kullanılabileceği belirtilmiştir.

Crispino ve D'apuzzo [26] karayolu trafiğinin meydana getirdiği titreşim seviyesini, İtalya'nın Napoli kentinde bulunan tarihi yapılarda ölçerek maksimum partikül hızını BS 6472'de -İngiliz titreşim standardı- belirtilen kriterlere göre karşılaştırmışlardır. Elde edilen bulgular, kültürel miras koruması altında bulunan bu yapılarda ölçülen titreşim düzeyinin, standartta verilen algılama eşik değerinin aşıldığını göstermektedir. Ölçülen titreşim seviyesi, hassas tarihi yapılar üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturabileceğini ortaya koymaktadır.

Xia ve ark. [27] Çin'in kuzeydoğusunda bulunan Shenyang-Harbin tren hattında çalışan yk ve yolcu trenlerinin 20-80 km/sa arasında değişen geçiş hızlarında oluşturdukları titreşimleri, ana istasyona 12 metre uzaklıktaki 2-3 katlı betonarme binalarda, bir köprü ayağı (Daqinghe köprüsü) zerinde ve yakın çevresindeki zemin

yüzeyinde köprüden 20 metre aralıklarla 3 ölçüm noktası için kaydetmişlerdir. Kayıtlar incelendiğinde, tren hızının ve yükünün artmasıyla birlikte bina katlarında titreşim seviyesinin arttığı, demiryolundan uzaklaştıkça serbest zeminde etkisinin hızlı bir şekilde azaldığı saptanmıştır. Ayrıca kayıtlar, Çin ulusal standartlarında verilen titreşim sınır değerleriyle karşılaştırılarak titreşim seviyesinin standartta verilen toleransı büyük ölçüde aştığı belirlenmiştir. Xia ve ark. [28] başka bir çalışma kapsamında, demiryolu trafik akışı yoğun olan Çin'deki Beijing-Guangzhou uydu kent bölgesinde arazi deneyleri yapmışlardır. Bu çalışmada ağır yük ve hafif yolcu trenlerinin 40-115 km/sa değişen hizmet hızlarında oluşturdukları titreşim seviyesi demiryolu hattına 14 m uzaklıktaki 6 katlı yığma bir yapıda kayıt altına alınmıştır. Bina titreşimleri Amerikan FTA (2005) standardında belirlenen kriterlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Connolly ve ark. [29] demiryolu zemin titreşimlerinin neden olduğu problemler hakkında genel bir inceleme ve değerlendirme yapmışlardır. Demiryolu hatlarından kaynaklanan gürültü ve titreşimin insanlarda sıkıntı ve rahatsızlığa yol açabileceğini, demiryolu yakınındaki gayrimenkullerin mülk değerlerinin olumsuz yönde etkileyebileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışma dünyanın 9 ülkesinde 1604 demiryolu hattı için gerçekleştirilen ticari titreşim değerlendirmelerini konu edinen, zemin kaynaklı teknik titreşim ve gürültü raporlarını analiz etmektedir. Değerlendirmede hafif raylı sistem, tramvay hatları, yer altı/tünelli hatlar, yük trenleri, konvansiyonel hatlar ve YHT gibi çok çeşitli demiryolu projeleri düşünülmüştür. Mevcut alanda çalışma yapacak kişileri bilgilendirmek amacıyla, tahmin endüstrisindeki eğilimler ve zemin kaynaklı titreşim problemlerindeki artış belgelendirilmek istenmiştir. Önce raporlar kronolojik olarak analiz edilmiş, demiryolu titreşimlerinin büyüyen küresel bir endişe olduğu ve bu nedenle değerlendirmelerin yaygın hale geldiği belirtilmiştir. Sonra uluslararası değerlendirme ölçütleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve hız desibelinin (VdB), titreşim doz değerinin (VDV) ve en yüksek parçacık hızının (PPV) en yaygın kullanılan değerlendirme metotları olduğu belirlenmiştir. Ayrıca titreşim seviyelerini tahmin etmek için, frekans transfer fonksiyonlarının fiziksel ölçümünün sayısal modellere tercih edildiği tespit edilmiştir. Raporların analizinden elde edilen sonuçlar, yapılan değerlendirmelerin %44'ünde zemin titreşim sınırının, %31'inde de

zemin kaynaklı gürültü eşik değerinin aşıldığını göstermiştir. Projelerin yaklaşık %50'sinde titreşim azaltma önlemlerinin gerekli olduğu belirlenmiş, bu da titreşim ve gürültünün yaygın bir problem olduğunu ortaya koymuştur. Son olarak bu sorunları çözmek için kullanılan en yaygın titreşim ve gürültü azaltma stratejileri arasında, demiryolu hattından uzak alanda yapıların inşa edilmesi gibi pasif bir çözümün uygulanmasından ziyade, aktif azaltma yöntemlerinin tercih edildiği saptanmıştır.

Işık [30] karayolu trafiği, raylı sistemler, rüzgâr, mekanik ekipman gibi titreşim kaynaklarının oluşturduğu titreşimlerin, insan sağlığı ve konforu bakımından etkilerini araştırmıştır. Bu amaç için farklı işlevi ve taşıyıcı sistemi olan on farklı yapı seçilmiş, her bir yapı için değerlendirilen her yönetmelik başına yirmişer dakikalık üç ölçüm alınmıştır. Yapıların genel özellikleri açıklanmış, taşıyıcı sistem farklılıkları ile kat sayıları karşılaştırılmış ve ölçülen titreşim kayıtları analiz edilerek bunlar arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Titreşimlerin insanlarda oluşturabileceği sağlık ve konfor bozucu etkileri açıklandıktan sonra yapılardan aldığı titreşim kayıtlarından elde ettiği analiz sonuçlarını, Avrupa'daki bazı ülkelerde ve Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan konfor konulu yönetmeliklerde verilen sınır değerleri karşılaştırarak, ele aldığı titreşimlerin yönetmeliklerin çoğunluğunda verilen sınır değerleri aştığını belirlemiş, insanlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini göstermiştir.

Tao ve ark. [31] Çin'in Shenzhen kentindeki Qianhai metro deposunun yakınında bulunan ray üstü binalarda trenlerin neden olduğu titreşim ve gürültü etkilerini araştırmak için biri 28 katlı konut diğeri 4 katlı çelik çerçeveli bir ofis olmak üzere iki binada ölçümler yapmıştır. Ölçülen titreşim ve gürültü seviyeleri FTA ile Çin ulusal standartında belirtilen eşik değerler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre gürültü seviyesi hem FTA (2006) hem de Çin standartının eşik değerlerinin altındayken, zemin titreşim seviyeleri FTA sınır değerlerini aşmamış Çin standartının eşik değerlerinin üzerine çıkmıştır.

Yang ve Hung [32] tren titreşimlerinin azaltılması veya önlenmesi amacıyla içi boş, içi dolu hendek tipi dalga bariyeri ve elastik yapay kaya önerisinde bulunmuşlar, bu amaç için iki boyutlu bir model oluşturmuşlardır. Bu modelde yarı sonsuz zemin sonlu

elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, sonsuz zeminin ayrıklaştırılmasında özel sınır koşulları oluşturularak zeminin geometrik sönümü hesaplarda dikkate alınmıştır. Dalga bariyerlerinin geometrik özellikleri, farklı yoğunluğu ve sönümü olan malzemeler ile dolu olması durumlarının titreşimlerin engellenmesindeki etkinliği araştırılmıştır. Yüksek frekans içeriğine sahip titreşimlerin seviyesinin azaltılmasında, zemin koşulları da dikkate alınarak çalışmada incelenen üç tip dalga bariyerinin titreşim düzeyinin azaltılmasında, etkin bir biçimde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Adam ve Van Estorff [33] trafik aktiviteleri, tren ve ağır makine hareketlerinin zeminlerde oluşturduğu titreşimleri azaltmak için içi boş ve dolu dalga bariyerleri kullanmışlardır. Bunun için kullanılan matematik modelde yük kaynağı, dalga bariyeri ve yapı sonlu elemanlar yöntemiyle, yarı sonsuz zemin bölgesi ise sınır elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Dalga bariyerinin malzeme özellikleri ve geometrik boyutları değiştirilerek yalıtım için optimum bariyer özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Ulgen ve Toygar [34] titreşim kontrol ve izolasyonu üzerine açık, su dolgulu ve geofoam dolgulu hendeklerin etkinliğini araştırmak için bir dizi tam ölçekli arazi deneyi gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma ile zemin etkisiyle titreşim seviyesindeki azalma, frekans, mesafe ve tabakalaşmanın karmaşık davranışı, zemin profilindeki geometrik düzensizliklerin etkileri incelenmiştir. Deneysel testlerin sonuçları ayrıca literatürdeki mevcut deneysel ve sayısal bulgularla karşılaştırılmıştır. Arazi deneylerinden ulaşılan sonuçlar geofoam dolgulu hendeklerin, zeminlerde titreşimlerin aktarımını azaltmak için kullanılabileceğini göstermiştir.

Noori ve ark. [35] çift katlı dairesel bir demiryolu tüneli çerçevesinde trenlerin ürettiği titreşimlerin azaltılması için dinamik titreşim soğurucularının (DVA) verimliliğini araştırmışlardır. Gao, G ve ark. [36] demiryollarındaki farklı hafriyat profillerinin tren kaynaklı titreşimlerin yalıtımındaki etkisini incelemişler, demiryolundaki dolgu ve yarmaların dikey titreşim seviyesini önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Lyratzakis ve ark. [37] dört farklı zemin türü için üç boyutlu bir model hazırlayarak genişletilmiş polistiren (EPS) blokların, farklı zemin altı ve demiryolu dolgu

malzemelerinin demiryolu çevresinde oluşan zemin titreşimlerini azaltmadaki etkinliğini incelemişlerdir. Bunlara benzer teorik ve deneysel çalışmalar devam etmektedir.

Titreşim seviyesinin mesafeye bağlı azalım ilişkisini analitik olarak belirleme ihtiyacı geçmişten günümüze var olmuştur. Bu amaçla Yang [38] tren, otomobil vb. araçların, makine titreşimleri veya kazık çakma uygulamalarının zeminde meydana getirdiği titreşimlerin, -farklı zemin türlerinde mesafeye bağlı olarak saha ölçümleriyle aldığı titreşim dalgası ivme genlik değerlerini, analitik olarak hesapladığı ivme genlik değerleriyle karşılaştırmıştır. Analitik hesaplamada malzeme ve geometrik sönümleme katsayılarının kullanıldığı Bornitz formülasyonu ile tahmin edilebilirliği doğrulamak istemiştir, bunun için pratik kullanılabilir katsayılar elde etmiştir. Titreşim kaynağından belirli uzaklıktaki noktalardan sismik ölçümlerle alınan ivme genlik değerleriyle, analitik olarak hesaplanan ivme genlik değerleri arasında çok büyük farklar olmasa da Bornitz formülünü tahmin gerektiren durumlarda kullanılabileceğini, esas alınması gereken değerlerin sahadan alınan ölçüm sonuçları olduğunu ifade etmiştir.

Ju ve Lin [39] YHT titreşimlerini simüle etmek için köprü üst yapılarını, köprü temellerini, hareketli trenleri ve zeminleri içeren bir model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, elde edilen analiz sonuçları ve saha deneylerinin titreşim verileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, tahmin edilen sayısal ve ölçülen deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu göstermiştir. Böylece önerilen modelin köprüler üzerinde hareket eden YHT'lerin titreşimlerini tahmin etmek için kullanılabileceği belirtilmiştir. Araştırmaya kapsamında bazı teorik denklemler türetilmiş ve bu denklemlerle yapılan parametrik çalışma, tren-köprü etkileşiminin simülasyonunda köprü modelinin tren modelinden daha önemli olduğunu göstermiştir, bu durum saha deneyleriyle de doğrulanmıştır.

Bian ve ark. [40] yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki düzensizliklerin hat ve çevre zemininde meydana gelen titreşim seviyesini artırdığını ifade etmişlerdir. Düzensiz hatlarda çalışan YHT'lerin oluşturduğu titreşimlerin yayılışını daha iyi anlamak için,

2.5 boyutlu (2.5D) ince tabakalı olarak simüle edilen zemine bağlantılı araç, yol, temel modeli oluşturulmuştur. Pekin-Şangay yüksek hızlı demiryolunun saha ölçümleriyle karşılaştırıldığında, sayısal modelin titreşim etkisini analiz etmede güvenilirliği doğrulanmıştır. Daha sonra dört tipik dalga boyu kullanılarak hat düzensizliklerinin yol ve çevre zemindeki titreşim düzeyine olan etkisi araştırılmıştır. Kısa dalga boyuna sahip titreşimler daha uzun dalga boyundaki titreşimler ile karşılaştırıldığında, daha yüksek titreşim frekanslarının yol ve zemin üzerinde daha fazla titreşim tepkileri uyandırdığı tespit edilmiştir ancak düşük frekanslı titreşimler yüksek frekanslı titreşimlere göre çok daha uzun mesafelere yayılabilmektedir. Balastsız döşeme-sisteminin kritik hızı, döşeme altı yumuşak zemin katmanının Rayleigh dalga hızından daha büyüktür. Trenin hızı kritik hızdan düşük olduğunda, yol düzensizliği, hat üzerindeki ve çevre zemindeki titreşimleri büyük ölçüde etkilemektedir. Trenin hızı bu kritik hızı aştığında zemin titreşimlerinin trenin tekerlek ağırlığına göre belirlendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kouroussis ve ark. [41] YHT kaynaklı titreşimlerin oluşum ve yayılmasının demiryolu hattı destek koşullarından etkilendiğini belirtmişlerdir. Araştırma kapsamında YHT titreşimleri üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma sunulmuştur. İlk olarak Belçika demiryolu ağı üzerinde üç farklı test alanı belirlenmiş ve deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her sahanın koşullarını dikkate alan sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Deney sonuçları ile sonlu eleman analizleri karşılaştırıldığında demiryolu hafriyat profillerinden hemzemin ve dolgu profilleri için korelasyon görölse de yarma profili için korelasyonun daha zor olduğu tespit edilmiştir. Buna rağmen toprak işleri profilinin zemin titreşimleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla her bir saha analiz edilmiştir. Farklı hafriyat profillerinin çok farklı zemin titreşim özellikleri oluşturduğu saptanmış ve bu sebeple, titreşim değerlendirmeleri yapılırken hafriyat profillerinin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Sole ve Huguenet [42] demiryolu trafiğinin ürettiği bina titreşimlerinin tahmininde halihazırda kullanılan ve iyi sonuçlar veren bazı deneysel ve hibrit modeller ile yapılan tahminlerin sonuçlarına olumsuz etkileyen nedenleri ortaya koymaya çalışmışlardır.

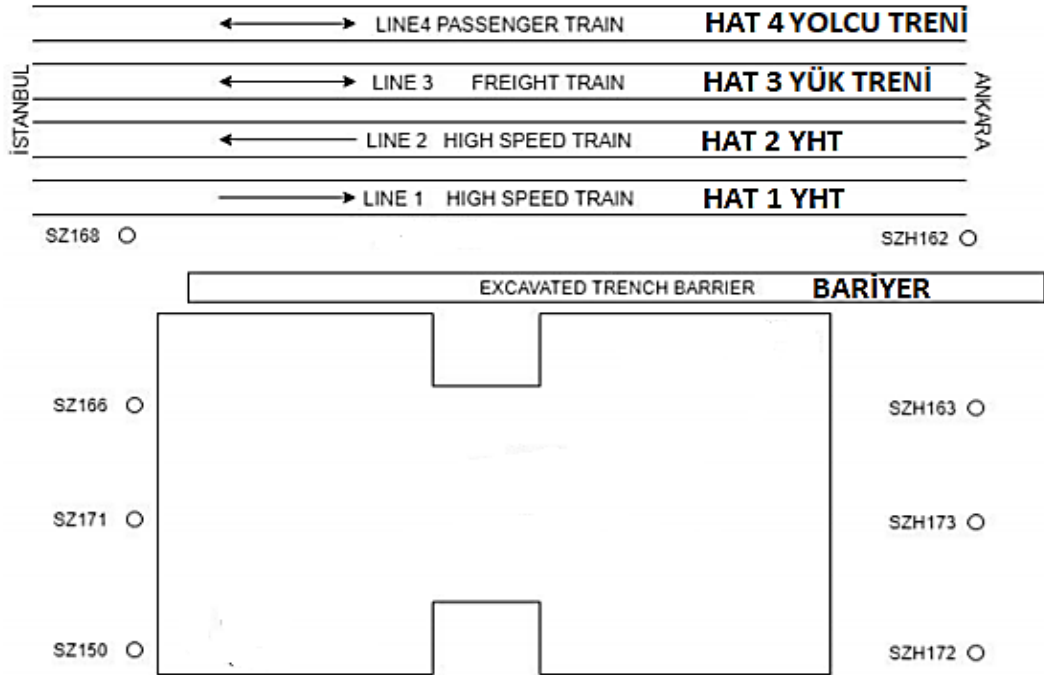
Olumsuz etkilerin nedenlerinin farkında olunarak yapılan değerlendirmelerin ileride yapılacak tahminlerin daha doğru bir şekilde yapılmasında etkili olacağını savunmuşlardır. Bu tahminler hem demiryolu titreşimine maruz kalan mevcut yapıların tolere edilebilir titreşim seviyesine indirilmesi için gereken titreşim azaltma önlemlerini hem de yeni yapılacak olan demiryolu tasarımları ve yeni yapılacak demiryolunun oluşturacağı titreşimlerin azaltılması çalışmalarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Kullanılacak tahmin yöntemlerinin doğru sonuçlar vermesinin önemi, yapılacak tasarımların optimum boyutlarda olmasını sağlamasıdır. İhtiyatlı olmayan ampirik tahmin yöntemlerinin, büyük boyutlarda yapılan tasarımlarla ekonomik olmaması veya yapılan tasarımın işlevsel özelliğini yerine getirememesi sonucunu ortaya çıkarabileceğinden söz etmişlerdir.

Galvin ve Dominguez [43] çalışmalarını iki temel amaca odaklamışlardır. Bunlardan birincisi Aralık 2007’de açılan Cordoba-Malaga (İspanya) arasındaki yüksek hızlı tren hattının sertifikasyon çalışmaları esnasında deneysel olarak elde edilen zemin ve yapısal titreşim verilerini ölçmek ve analizini yapmaktır. İkincisi bilgisayarda oluşturulan modeller kullanılarak iki farklı sayısal yöntemin sonuçlarını karşılaştırarak nümerik yöntemlerin geçerliliklerini test etmektir. Model yerel zemin koşullarını, alt geçitler gibi süreksizlikleri, demiryolu hattı yakınındaki yapıları temsil edebilir. Oluşturulan model ile tren hattına yakın yapılardaki titreşim genliklerinin, -dinamik yapı zemin etkileşimi ve yerel zemin özelliklerini de dikkate alarak- titizlikle hesaplanabileceğini öne sürmüşlerdir. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçları, deneysel olarak ölçülen verilerle karşılaştırmışlardır. Modelden elde edilen sonuçlar serbest zeminde ve tren hattına yakın yapılarda yüksek hızlı trenler tarafından üretilen titreşimlerin genliğini tahmin etmede kullanılabileceğini göstermiştir böylece nümerik yöntemlerin geçerli olabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Li ve ark. [44] zayıf zemin koşullarında sıkça kullanılan kazık takviyeli zemin iyileştirmelerinin YHT titreşimlerine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla tren-ray-zemin etkileşimlerini dikkate alan sonlu eleman teorisine uygun bir model geliştirilmiştir. Tren-ray-zemin etkileşimlerinin, modelden elde edilen analiz sonuçları ile saha testi sonuçları karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Özellikle trenlerin kritik

hızlardaki hareketlerinin incelendiği çalışmada, kazıkların zeminlerdeki dalga yayılımları üzerindeki etkileri vurgulanmıştır.

Yürütücülüğünü Sakarya Üniversitesi'nden Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'nin yaptığı 217M427 nolu Tübitak 1001 Projesi kapsamında 9 kişilik bir ekip çalışmalarını sürdürmektedir. YHT'nin oluşturduğu çevresel titreşimlerin belirlenmesi, yapısal titreşimlerin azaltılması gibi konuların araştırıldığı projede, gerçekleştirilen bir dizi deneysel ve analitik çalışmanın sonuçları çeşitli konferanslarda yayınlanmıştır [45, 46, 47, 48, 49]. Şekil 1.9.'da gösterilen şekilde sahaya yerleştirilen ivme ölçerlerle titreşim kayıtları alınmıştır. Binanın iki yanında bulunan tren hatlarına dik olarak yerleştirilen ivmeölçerler arasındaki mesafe eşit ve 7 metredir. Şekil 1.9.'da gösterilen test alanında YHT hızı saatte 250 kilometre, zemin alüvyal dolgu zemin ve kayma dalgası hızı 200 m/s'den küçüktür. Araştırma sahasında 4 tren hattı bulunmakta, 1 ve 2 numaralı hatlardan YHT, 3 numaralı hattan yük treni, 4 numaralı hattan banliyö treni geçmektedir. YHT'ler sefer durumuna göre belli aralıklarla geçiş yaparak titreşim oluşturmakta; oluşan titreşimler YHD'lerin çevre alanına, bu alanda bulunan yapı ve insanlara etki etmektedir.



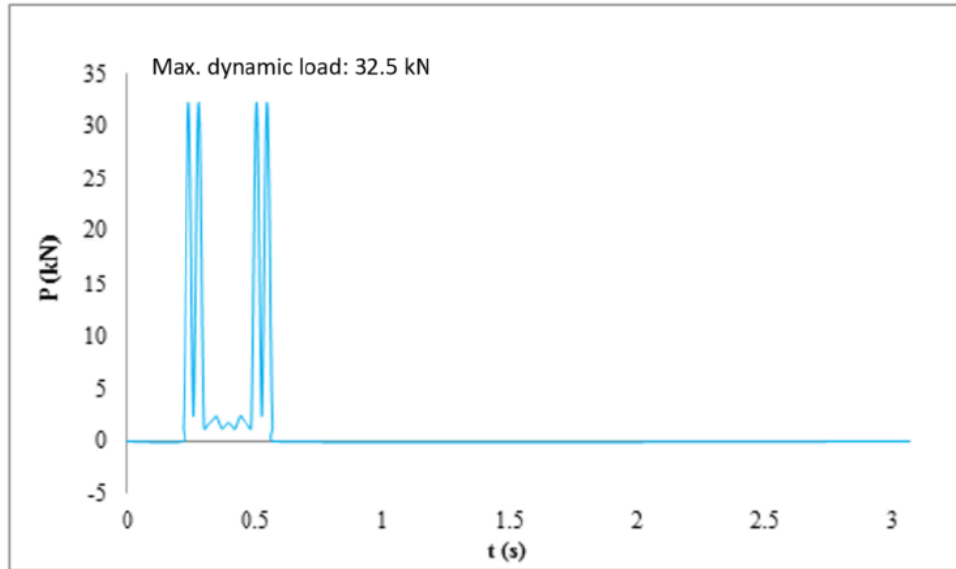
Tekergül ve ark. [45] Şekil 1.9.'da gösterilen çalışma alanında titreşim verilerini almak için bir dizi saha testi gerçekleştirmişlerdir. Hatlardan geçen YHT ve diğer trenlerin neden olduğu titreşimi azaltmak için hat boyunca bir hendek bariyeri kullanılmıştır. YHT, yük ve yolcu treni geçişleri için binanın sol tarafındaki serbest zemin ölçümleri ile sağ tarafında bulunan bariyerli durumun ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilmesi amacıyla cihazdan alınan ivme verisi önce sıfır çizgisine hizalanmıştır, sonra frekans aralığı 10-100 Hz olan titreşim için 4. derece Butterworth filtresi kullanılmıştır, bu işlemlerin uygulandığı veriden ivme zaman grafikleri ve frekans içerikleri elde edilmiştir. Sonuç olarak hendek bariyerin titreşim seviyesini önemli ölçüde azalttığı ve bariyerin frekans içerikleri üzerinde önemli bir etkide bulunmadığı gözlenmiştir.

Şahin ve ark. [46] yaptıkları çalışmada, Şekil 1.9.'da gösterilen demiryolu hatlarından geçen trenlerin oluşturduğu titreşimlerin oluşum mekanizmaları ve dalga yayılım özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Titreşim enerjisinin sahadaki alüvyal zemin ortamında soğurulmasını geometrik sönüme ve dalga türüne bağlı olarak açıklayan analitik çözümlerle, deneysel ölçüm sonuçlarını ardışık gözlem noktalarında karşılaştırmışlardır. Dalga yayılımının azalım ilişkisini açıklamak için, analitik çözümde Bornitz bağıntısı kullanılmıştır. Bu bağıntı azalım ilişkisini geometrik (radyasyon) sönümleme ve malzeme sönümlemesi olmak üzere iki parametreye bağlı olarak hesaplamaktadır. Araştırma sonuçlarına göre, titreşim enerjisinin analitik çözümünde azalım ilişkileri tüm trenler için orantılı olarak elde edilmiştir. Deneysel bulgular ise bu azalım ilişkisinin orantılı olmadığını göstermiştir. Deneysel bulgulara görülen, dinamik yük kaynağından yayılan titreşim enerjisinin mesafe arttıkça bazı noktalarda azalım göstermemesinin nedeni olarak, dalgaların jeolojik zemin ortamında yansımış veya kırılmış olabileceği düşünülmüştür.

Ates ve ark. [47] YHT titreşimleri üzerine yaptıkları araştırmada, hızlı tren geçişi sırasında tren hattına paralel ve dik yönde yayılan titreşim etkilerinin farklı olduğunu belirlemiş ve bu nedenle her yönde titreşim ölçümlerinin yapılması gerektiği sonucuna varmıştır. FTA, DIN 4150-2 ve DIN 4150-3'e göre yaptıkları değerlendirmelerde

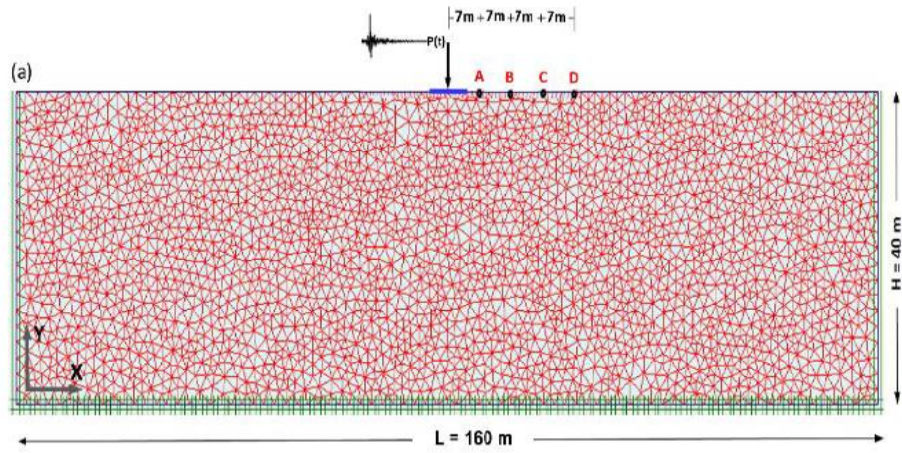
titreşimlerin hem insan sağlığı ve konforu açısından hem de yapısal etki bakımından istenilmeyen düzeyde olabileceğini göstermişlerdir.

Faizan ve ark. [48] bu çalışmada, farklı zemin sınıflarının titreşim seviyeleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Gevşek kum (ZE), orta-sıkı kum (ZD), sıkı kum (ZC), kaya zemin (ZA) olmak üzere TBDY’de belirlenen dört farklı zemin sınıfı ele alınmıştır, modelin oluşturulmasında iki boyutlu hesap yapan PLAXIS 2D yazılımı kullanılmıştır. Yük kaynağının oluşturduğu titreşim etkisini tanımlamak için Şekil 1.10.’da gösterilen maksimum büyüklüğü 32.5 kN olan dinamik bir yük kullanılmıştır.



Şekil 1.10. Dinamik yükün zamana bağlı değişimi [48]

ZE zemin sınıfına sahip Şekil 1.9.’da gösterilen çalışma alanından alınan ivme verileriyle, bilgisayar programında oluşturan ZE zemin modeli karşılaştırılarak modelin doğruluğu kontrol edilmiştir. Bu model doğrulandıktan sonra ilgili parametreler değiştirilerek diğer üç zemin sınıfının modeli oluşturulmuştur. Şekil 1.11.’de gösterilen modelde harflerle sembolize edilen noktalar, sahadaki ivmeölçerlerin konumları dikkate alınarak modeldeki dinamik yük kaynağına göre belirlenmiştir.



Şekil 1.11. Sahadaki ivmeölçerlerin oluşturulan modelde temsil edildiği noktalar [48]

Şekil 1.10.'da gösterilen, Şekil 1.11.'de $P(t)$ olarak sembolize edilen YHT dinamik yükü oluşturulan dört farklı zemin modeline uygulanmış ve her zemin modeli için A, B, C, D noktalarındaki ivme zaman grafikleri elde edilmiştir. Her zemin sınıfı kendi içinde olmak üzere, noktaların yük kaynağına olan mesafesi dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda titreşim seviyesi ve en yüksek ivme değerleri mesafe arttıkça azalmaktadır. Zemin sınıfına göre titreşim seviyeleri büyük bir farklılık göstermektedir. Zemin sınıfının rijitliği azaldıkça titreşim seviyesi ve en yüksek ivme değerleri artmaktadır.

Faizan ve ark. [49] yaptıkları çalışmada, farklı zemin sınıflarına ait bilgisayar modelleri oluşturmuşlardır. Bu modelden bir tanesini saha ölçüm sonuçları ile doğrulamışlar, diğerlerinin sadece zemin parametrelerini değiştirerek, belirledikleri YHT dinamik yük fonksiyonu ile zeminlere ait ivme zaman grafiklerini elde etmişlerdir. Çalışma iki boyutlu olarak düşünülmüş, ivme değerleri YHT hattına dik ve zemin derinliğinde -düşey doğrultu- yayılan dalgalar için iki farklı doğrultuda bulunmuştur. Elde edilen ivme değerlerinden Alman titreşim yönetmeliğine göre değerlendirme yapabilmek için hız spektrumları, frekans içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hız spektrum eğrilerine bakıldığında, zemin rijitliği azaldıkça titreşim düzeyi artmıştır. Yönetmeliğe göre zemin rijitliği azaldıkça hem yapısal hasar bakımından hem de insan tepkisi bakımından istenilmeyen sonuçların arttığı görülmüştür.

1.5. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Dünyada ve Türkiye’de yüksek seyahat hızlarına sahip YHT’lerin tekrarlı geçişlerle ürettiği titreşimler, -özellikle yoğun yerleşim bölgelerinde- YHD ağlarına yakın alanlarda çevresel titreşim problemlerine sebep olmaktadır. Bu problemlere mühendislik çözümleri getirilmediği takdirde sorunun giderek büyümesi ve şikayetlerin artması kaçınılmazdır. Söz konusu alanlarda günlük hayatı etkilemeyen basit ve kolay uygulanabilir çözümler sayesinde YHT titreşimlerinin zararlı etkilerinin azaltılması mümkündür. Bu doğrultuda, YHT titreşimlerini etkileyen parametrelerin araştırılması, zemine bağlı dalga yayılımı probleminin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Bu çalışma ile, yüksek hızlı demiryolu trafiğinin oluşturduğu titreşimlerin, çalışma sahası olarak belirlenmiş test alanlarındaki mevcut seviyesini ölçmek, saha koşullarında değişen (özellikle zayıf zemine sahip bölgeler) parametrelerin titreşim seviyesine etkilerini açıklamak amaçlanmıştır. Ayrıca yapılarda ve insanlarda olumsuz etkiler oluşturabilecek titreşim düzeyinin sınırlarını belirleyen -Türkiye koşullarını dikkate alan- bir yönetmeliğin, hazırlanabilmesine olanak sağlayacak faaliyetlerin bilimsel altyapısına katkıda bulunmak istenmiştir. Titreşim düzeyini etkileyen değişkenlerin özelliklerini belirlemek amacıyla üç farklı özellikte test sahası belirlenmiş ve bu test alanlarında deneysel saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Belirlenen çalışma sahalarından elde edilen titreşim verileri Amerikan (FTA 2006) ve Alman (DIN 4150-2/3) yönetmeliklerine göre değerlendirilerek yönetmeliklerin hassasiyetleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca test alanlarındaki farklı titreşim düzeyleri yönetmeliklere göre değerlendirilmiş ve yönetmeliklerin değişen titreşim seviyesini değerlendirmedeki etkinlikleri incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde YHD ve YHT’lerin dünyadaki ve Türkiye’deki mevcut durumları ile planlanan projeleri hakkında genel bilgiler verilmiş, YHT’lerin artan yüksek seyahat hızı, yolcu taşıma kapasiteleri, sefer sayıları ile ürettiği titreşimlerin genlik büyüklükleri ve sayısının giderek arttığı ve endişe oluşturduğu ifade edilmiş, çevresel titreşim problemlerinin çözümünde mühendislik araştırmalarının

gerekliliklerine değinilmiştir. Konuyla ilgili yapılan bazı araştırmalar özetlenerek çalışmanın amaç ve kapsamı belirtilmiştir.

İkinci bölümde test sahalarının seçiminde etkili olan parametreler ve test sahalarının özellikleri açıklanmış, deneysel saha ölçümlerinde kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri belirtilmiştir. Deneysel saha ölçümleri ve ölçüm verilerinin analizleri detaylarıyla açıklanmış, çeşitli görsellerle desteklenerek sunulmuştur.

Üçüncü bölümde bina titreşim seviyeleri, tepki spektrumları ile gösterilmiştir. Tepki spektrumları, deneysel ölçülen serbest zemin titreşim ivme verilerinden elde edilmiştir. Belirlenen çalışma sahalarının farklı parametrelerinin -tren hızı, hafriyat profili, hendek varlığı- titreşim seviyelerine etkileri birbiri ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Karşılaştırmalar titreşim dalgalarının tren hattına dik ve paralel yayılım doğrultuları için yapılmıştır. Ayrıca tren hattına dik doğrultuda mesafenin titreşim seviyesine etkileri araştırılmış, yapı zemin etkileşim probleminde kinematik etkileşimin etkisi deneysel olarak ölçülmüş ve değerlendirilmiştir.

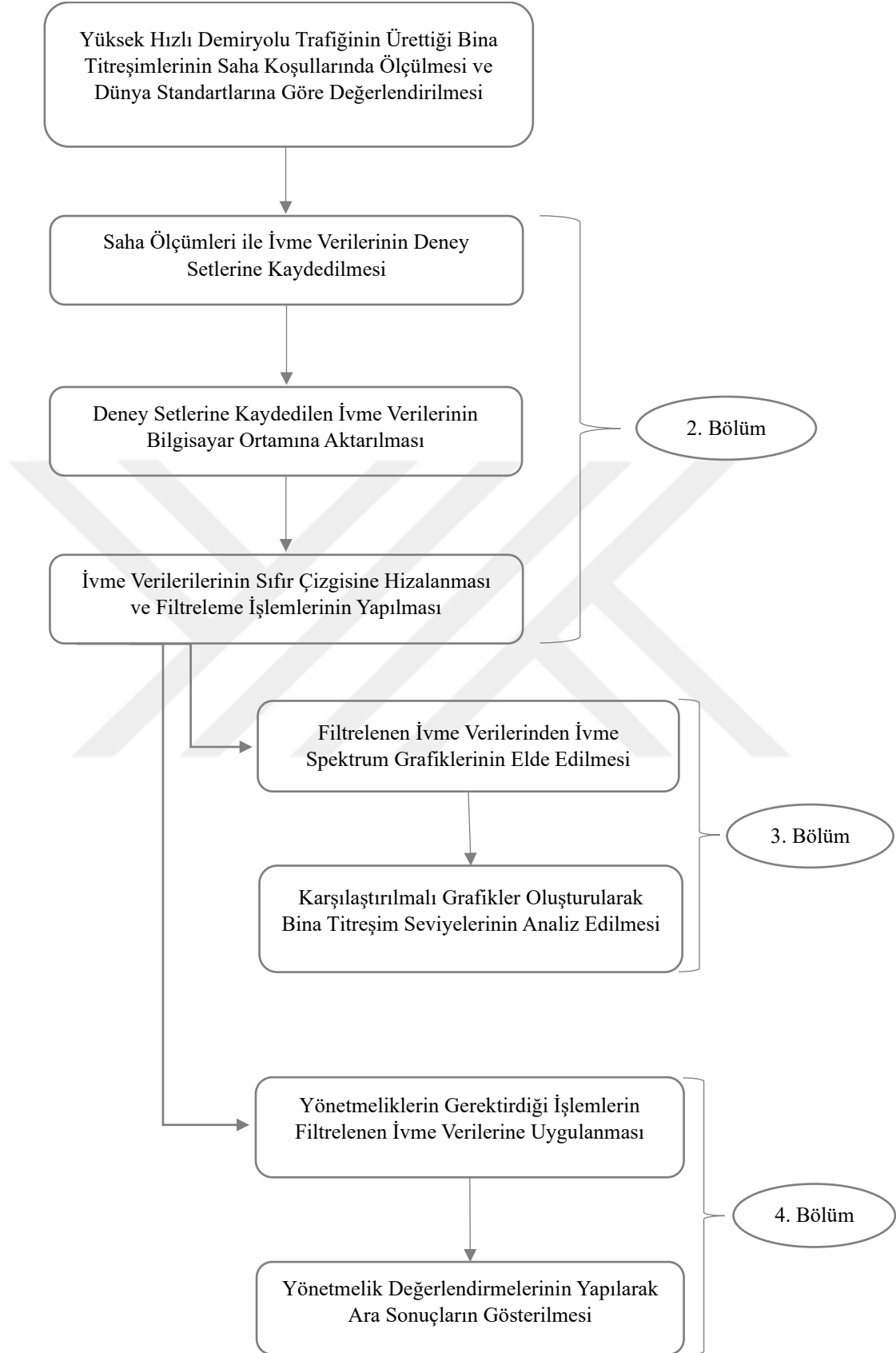
Dördüncü bölümde ise Amerikan (FTA 2006) ve Alman (DIN 4150-2/3) yönetmeliklerinin titreşim düzeyi değerlendirme kriterleri açıklanmış, değerlendirme yapabilmek için elde edilen yönetmelik parametreleri sunulmuştur. Değerlendirmeler, titreşimlerin tren hattına dik ve hatta paralel olmak üzere iki yöndeki yayılım doğrultusu için yapılmıştır. Titreşim değerlendirmeleri hem yapısal hasar bakımından hem de insan sağlığı ve konforu bakımından ele alınmaktadır.

Tez çalışmasının beşinci bölümü olan son bölümünde; sahadan deneysel olarak alınan verilerin gerekli analizler sonucunda elde edilen bulguları, tartışılarak gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU TRAFİĞİNİN ÜRETTİĞİ BİNA TİTREŞİMLERİNİN SAHA KOŞULLARINDA ÖLÇÜLMESİ VE VERİ ANALİZİ

Zemin ortamının herhangi bir noktasının doğal (deprem, tektonik faaliyetler vb.) veya yapay (yüksek hızlı tren, makine, inşaat aktiviteleri, patlama vb.) şekilde zorlanması ile oluşan titreşim enerjisi, ortamın sismik iletkenliği sayesinde bir noktadan başka bir noktaya sismik dalgalarla taşınabilir. Bu sismik dalgalar zemin ortamında oluştukları noktadan tüm yönlere doğru farklı biçimlerde yayılarak ulaştıkları yerlerde titreşimlere ve zemin hareketlerine sebep olurlar. İletimleri sırasında enerjilerinin bir kısmı zemin tarafından soğrulur ve zeminin hareketi, mesafeye bağlı olarak kaynaktan uzaklaştıkça azalır. Ayrıca sismik dalgalar zemin ortamında ilerlerken farklı zemin tabakaları ile karşılaşır, bu durum dalgalarda yansıma ve kırılmaları meydana getirir. Sismik dalgaların frekans içerikleri enerjilerinin korunması hakkında bilgiler verir. Yüksek frekanslı sismik dalgaların, düşük frekanslı dalgalara göre enerjilerini daha hızlı kaybettiği bilinmektedir. Sismik dalgardaki enerji kaybı frekans içeriği, mesafe ve dalgaın yayıldığı zemin ortamının fiziksel yapısı ile yakından ilişkilidir.

YHT titreşimlerinin ölçülmesi, tepki spektrumları ile bina titreşim seviyelerinin gösterilmesi ve yönetmeliklere göre titreşim seviyelerinin değerlendirilmesi için Şekil 2.1.'deki yol izlenmiştir. Öncelikle ölçüm yapılacak test alanları belirlenmiştir. Bu test alanlarında YHT'lerin oluşturduğu titreşimler deney setlerine kaydedilmiştir. Arazi ölçümleriyle deney setlerine kaydedilen ivme verileri bilgisayar ortamına aktararak sıfır çizgisine hizalanmış ve filtreleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Filtrelenen ivme verilerinden ivme spektrum grafikleri oluşturularak bina titreşim düzeyleri gösterilmiştir. Daha sonra filtrelenen ivme verilerine yönetmeliklerin gerektirdiği işlemler uygulanmış ve titreşim seviyeleri değerlendirilmiştir.



Şekil 2.1. YHT titreşim değerlendirmeleri işlem adımları

Tablo 2.1. Test sahalarının seçiminde etkili olan parametreler

Parametre	Sapanca/Kırkpınar	Gebze/GTÜ Kampüs	Pamukova/Yenice
Zemin Sınıfı (TBDY-2018)	ZE	ZE	ZE
Hafriyat Profili	Hemzemin	Hemzemin	Dolgu ve Kazık Temel
Tren Hızı (Vt)	250 km/sa	75 km/sa	250 km/sa
Titreşim Yalıtım Durumu	Hendekli ve Hendeksiz	Hendeksiz	Hendeksiz
Kayma Dalgası Hızları	$V_{s30}=196$ m/s	$V_{s1}=128$ m/s, $V_{s2}=354$ m/s	$V_{s30}=185$ m/s

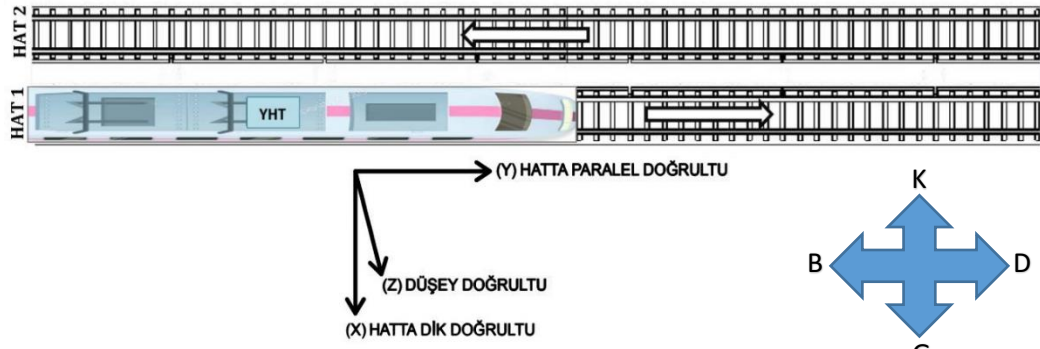
Saha çalışmalarının yapıldığı alanların dinamik zemin özelliklerini saptamak için Sismik Refraksiyon (Kırılma), Doğu-Batı ve Kuzey-Güney olmak üzere iki doğrultuda MASW (Çok Kanallı Yüzey dalgası) arazi deneyleri yapılmıştır. Şekil 2.3.'te arazi deneylerinin yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sismik Kırılma ve MASW arazi deneylerinin yapıları [47]

Arazi deneyleri ile dinamik zemin özellikleri belirlenen test sahalarının zemin sınıfları TBDY'ye göre tanımlanmıştır [52].

Titreşim ölçümlerinin yayılma doğrultuları ve hat isimlendirmeleri Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi ifade edilmiştir.

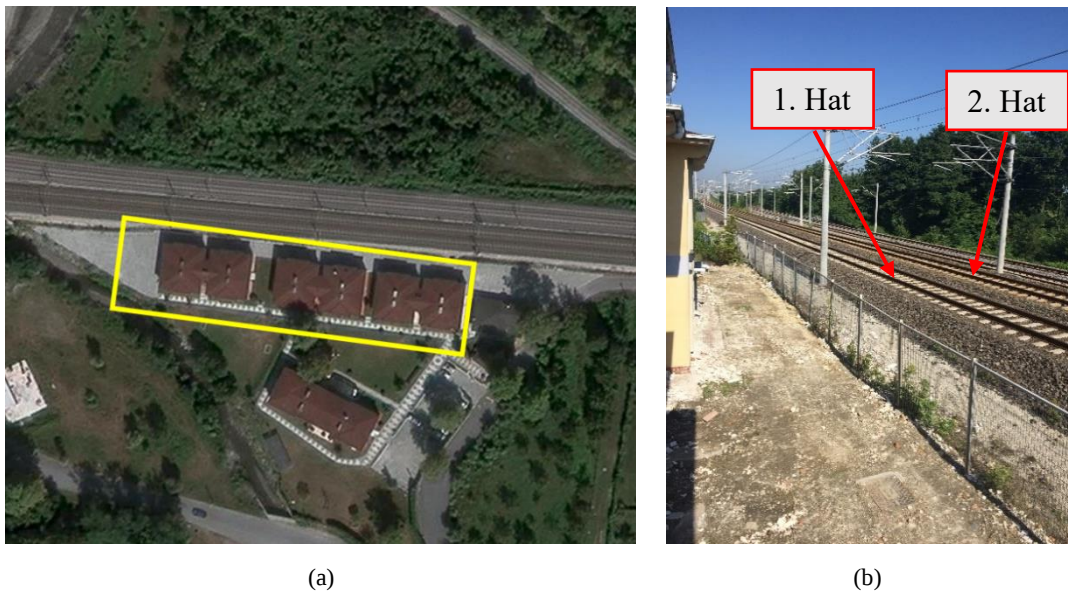


Şekil 2.4. YHT titreşimleri yayılma doğrultuları ve hatların isimlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm incelemeler titreşim enerjisinin tren hattına dik ve paralel yayılma doğrultuları için yapılmıştır [53]. Tüm çalışma sahalarında Kuzey-Güney (K-G) yönleri tren hattına dik doğrultuyu, Doğu-Batı (D-B) yönleri tren hattına paralel doğrultuyu ifade etmektedir.

2.1.1. Test sahası olarak Sapanca/Kırkpınar ve özellikleri

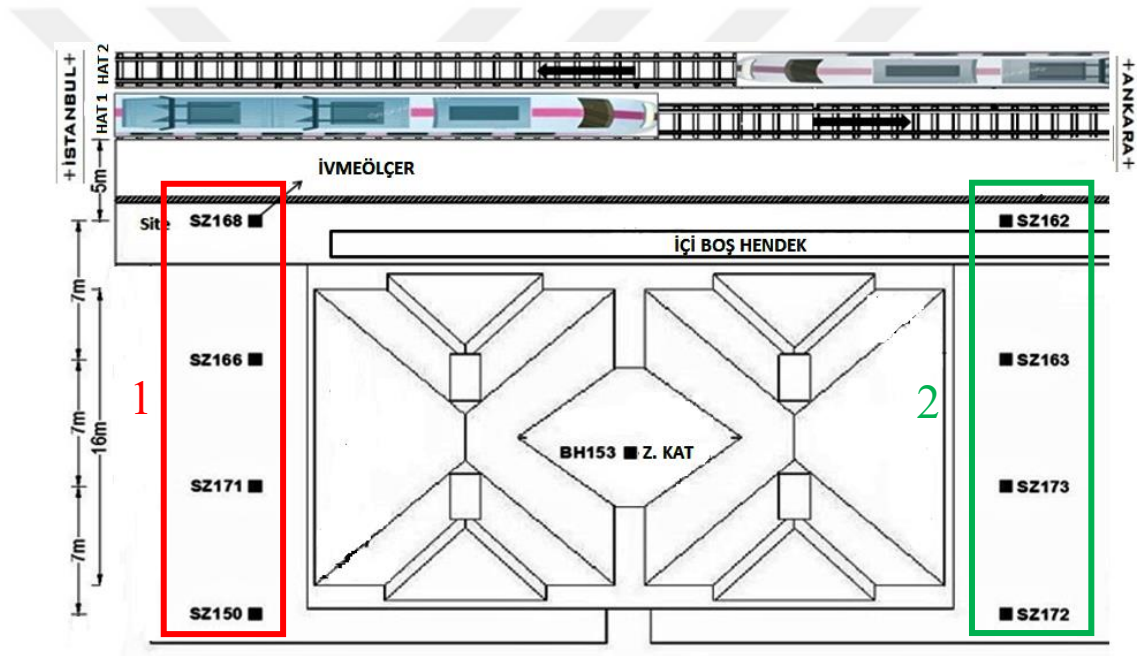
Birinci test alanı olarak Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi'ne (SUBÜ) ait Sapanca Uygulama Oteli ve arazisi seçilmiştir. Test sahası Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Test alanında bulunan iki hattın YHT'ler 250 km/sa'lık hızlarla geçmektedir.



Şekil 2.5. Sapanca/Kırkpınar test alanı uydu (a) ve saha (b) görüntüsü

Sapanca/Kırkpınar sahasının geoteknik ve jeofizik rapor sonuçlarına göre tren hattının yakın çevresinin üst tabakası 9 m kalınlığında alüvyal zemin olarak belirlenmiş, zemin sınıfı ise TBDY'ye göre ZE olarak tanımlanmıştır. Arazide farklı noktalarda yapılan sismik kırılma deneyleri sonucunda zeminin 1. tabakası için kayma dalga hızı $V_s = 170$ m/s olarak ölçülmüştür. Üst zemin katmanının elastisite modülü $E = 1404$ kg/cm² olarak tespit edilmiştir.

Şekil 2.6.'da Sapanca/Kırkpınar test alanına yerleştirilen ivmeölçer planı gösterilmektedir. Bu test alanında ivmeölçerlerin bir kısmı binanın sol (1) yanında bulunan doğal zemin yüzeyine tren hattına dik doğrultuda yerleştirilmiştir [54].



Şekil 2.6. Sapanca/Kırkpınar test alanı ivmeölçer yerleşim planı [47]

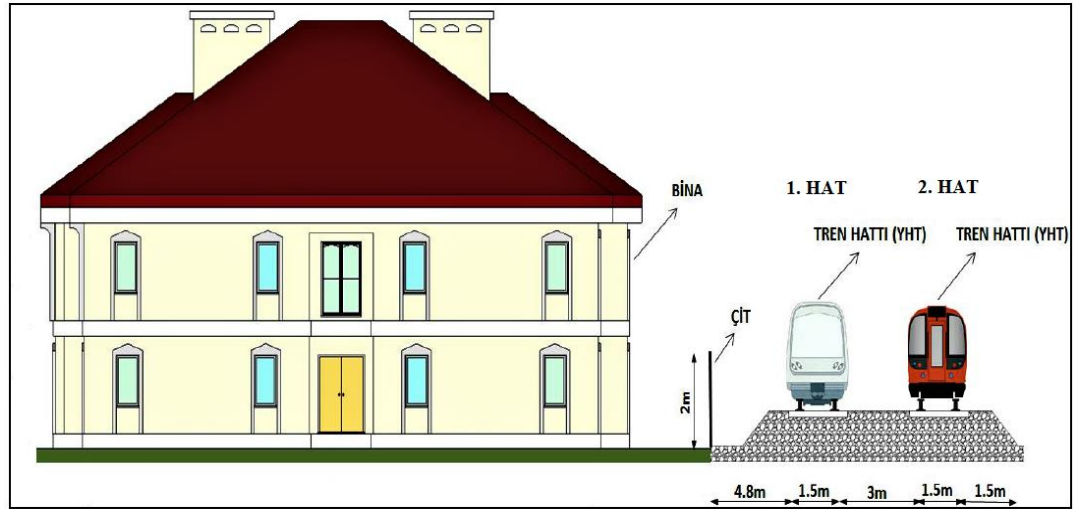
Şekil 2.6.'da kırmızı renkle gösterilen 1 nolu alanda tren hattına dik doğrultuda titreşim seviyesinin mesafeye göre değişimi incelenmiştir.

İvmeölçerlerin diğer kısmı binanın sağ (2) tarafına yerleştirilmiştir. Tren hattı ile ölçüm noktaları arasında bulunan içi boş hendekğin titreşim düzeyine olan etkisi incelenmiştir [55, 56, 57, 58]. Hendek genişliği 1 m derinliği 0,6 m'dir. Hendek Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Sapanca/Kırkpınar test alanında bulunan hendek [59]

Çalışma sahasında yer alan otel binası ve yüksek hızlı tren geçişlerinin yandan görünümü Şekil 2.8.'de verilmiştir.



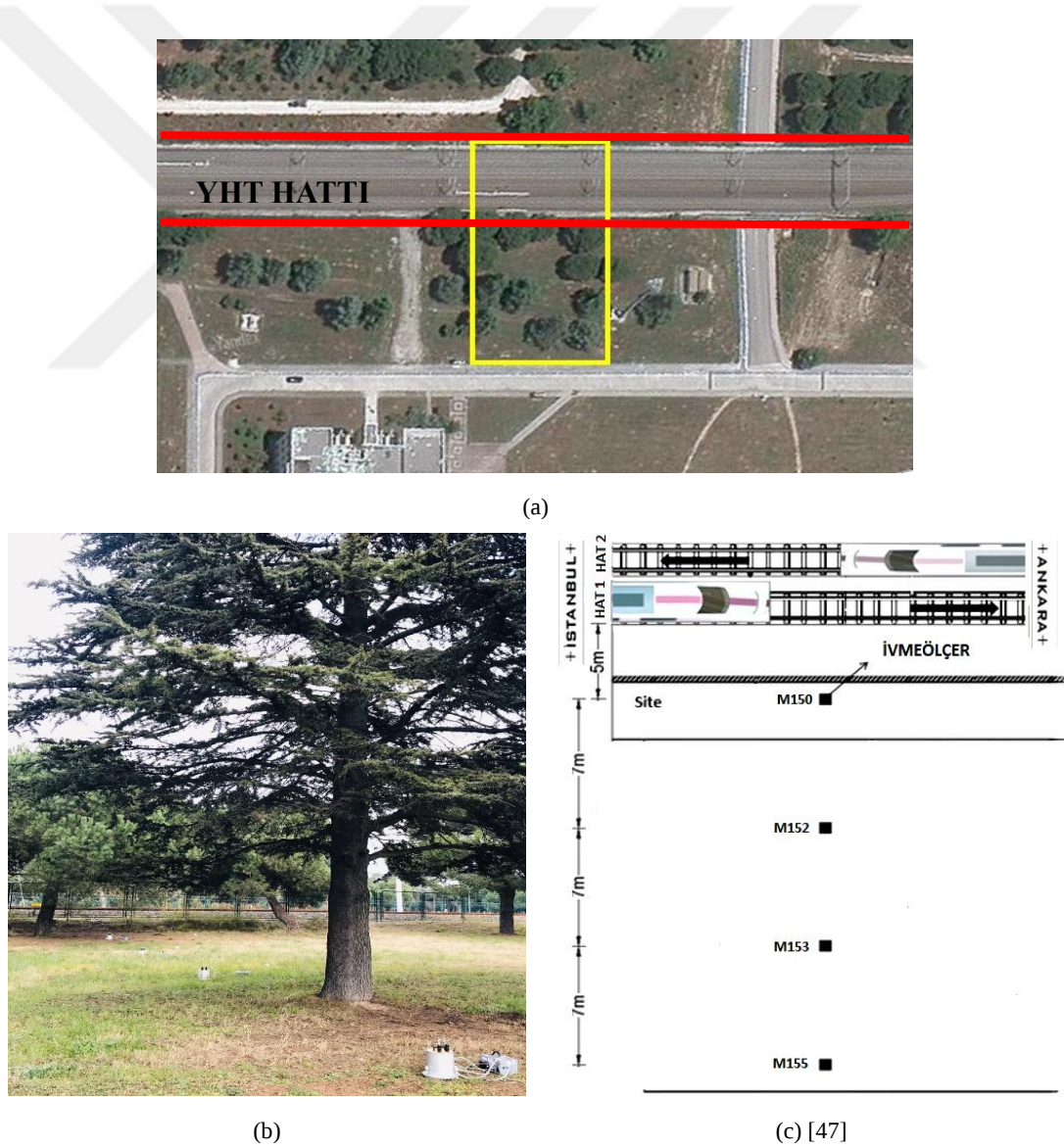
Şekil 2.8. Sapanca/Kırkpınar test sahasının yandan görünümü [60]

İvmeölçerlerden bir tanesi bina içerisinde giriş kata yerleştirilmiştir. Bina ile tren hattı arasındaki içi boş hendek bina boyunca uzandığı için yapı zemin etkileşiminin titreşim

düzeyine olan etkisini incelemek amacıyla bina içindeki cihaz (BH153) verisinden elde edilen sonuçlar ile binanın sağ tarafında tren hattına aynı uzaklıktaki cihaz (SZ173) verisinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.1.2. Test sahası olarak Gebze/GTÜ Kampüsü ve özellikleri

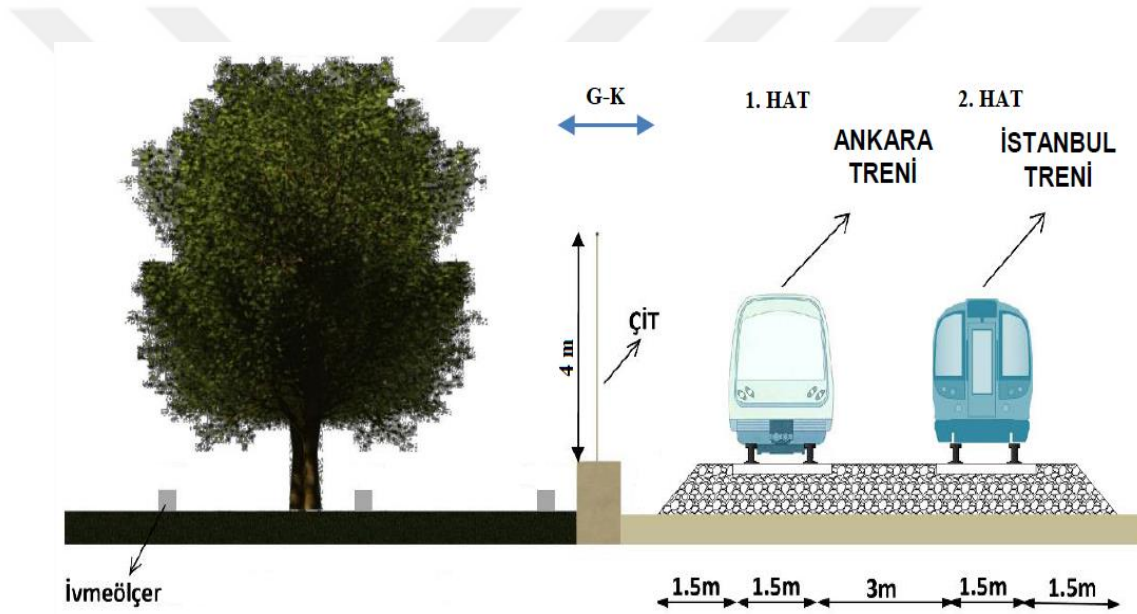
İkinci test alanı olarak Gebze Teknik Üniversitesi arazisinde YHD'ye yakın bir bölge seçilmiştir. Test alanı Şekil 2.9.'da gösterilmiştir. YHT'ler bu bölgeye yakın bir istasyon olması sebebiyle hızlarını yavaşlatmakta ve bölgeden 75 km/sa'lık hızlarla geçmektedir.



Şekil 2.9. Gebze/GTÜ Kampüs test alanı uydü (a) ve saha görüntüsü (b), ivmeölçer yerleşim planı (c)

Gebze/GTÜ Kampüs test sahasının geoteknik ve jeofizik rapor sonuçları, sahanın zemin cinsinin gevşek kıvamlı siltli kil olduğunu göstermiş, zemin sınıfı ise TBDY'ye göre ZE olarak tanımlanmıştır. Arazide farklı noktalarda yapılan sismik kırılma deneyleri sonucunda zeminin üst tabakası için kayma dalga hızı $V_s = 128$ m/s olarak ölçülmüştür. Üst zemin katmanının elastisite modülü $E = 1136$ kg/cm² olarak belirlenmiştir.

Test sahası ve yüksek hızlı tren geçişlerinin yandan görünümü Şekil 2.10.'da gösterilmiştir.

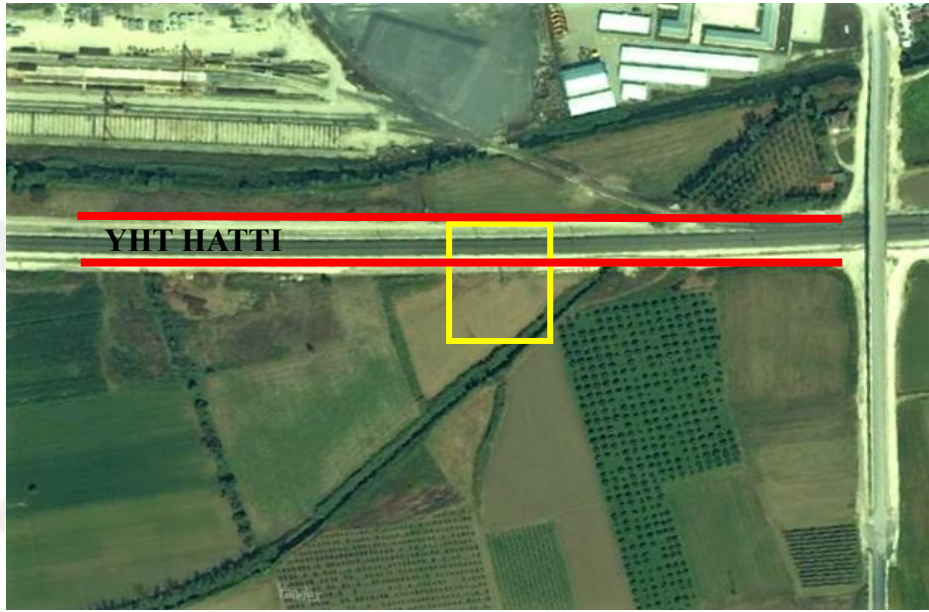


Şekil 2.10. Gebze/GTÜ Kampüs test sahasının yandan görünümü

İkinci test sahasında yapılan çalışma ile YHT hızının titreşim seviyesi üzerindeki etkisi araştırılmak istenmiştir [61]. Deneysel ölçümler tren hattına dik olarak yerleştirilen ivmeölçerle serbest zemin yüzeyinden alınmıştır. İvmeölçerler arasındaki mesafeler birinci test sahasındaki mesafelere uygun olarak seçilmiştir ayrıca titreşim seviyesinin uzaklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Sahadan elde edilen sonuçlar Sapanca/Kırkpınar test sahasında Şekil 2.6.'da gösterilen binanın sol (1) tarafındaki cihazlardan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

2.1.3. Test sahası olarak Pamukova/Yenice ve özellikleri

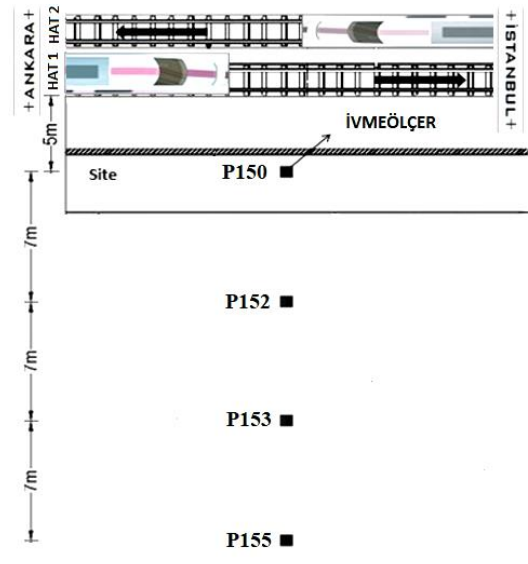
Üçüncü test alanı için Sakarya'nın Pamukova ilçesinin Yenice mevkinde YHD'ye yakın boş bir arazi seçilmiştir. Test alanı Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Çalışma alanında iki tren hattı bulunmakta ve bu hatlardan YHT'ler 250 km/sa'lık hızlarla geçiş yapmaktadır.



(a)



(b)

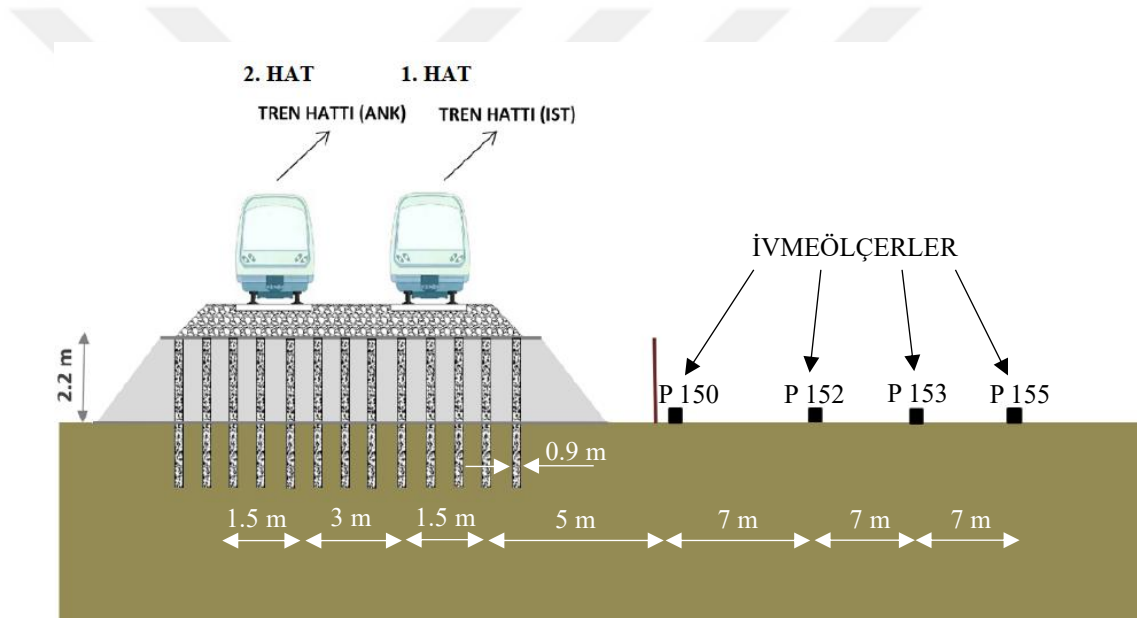


(c) [47]

Şekil 2.11. Pamukova/Yenice test alanı uydu (a) ve saha görüntüsü (b), ivmeölçer yerleşim planı (c)

Pamukova/Yenice test sahasının geoteknik ve jeofizik rapor sonuçlarına göre tren hattının yakın çevresinin zemin cinsi ağırlıklı olarak zayıf dayanımlı siltli kil olarak tespit edilmiş, zemin sınıfı ise TBDY'ye göre ZE olarak tanımlanmıştır. Bu test alanının zemin formasyonu da alüvyondur. Arazide beş profil sismik kırılma+MASW ölçümleri yapılarak, demiryolu hattının yakın çevresindeki zemin profilinin 7.95 m derinliğindeki üst tabakasının ortalama kayma dalgası yayılım hızı $V_s = 171$ m/s ve elastisite modülü $E = 1234$ kg/cm² olarak tespit edilmiştir.

Test sahası ve yüksek hızlı tren geçişlerinin yandan görünümü Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.



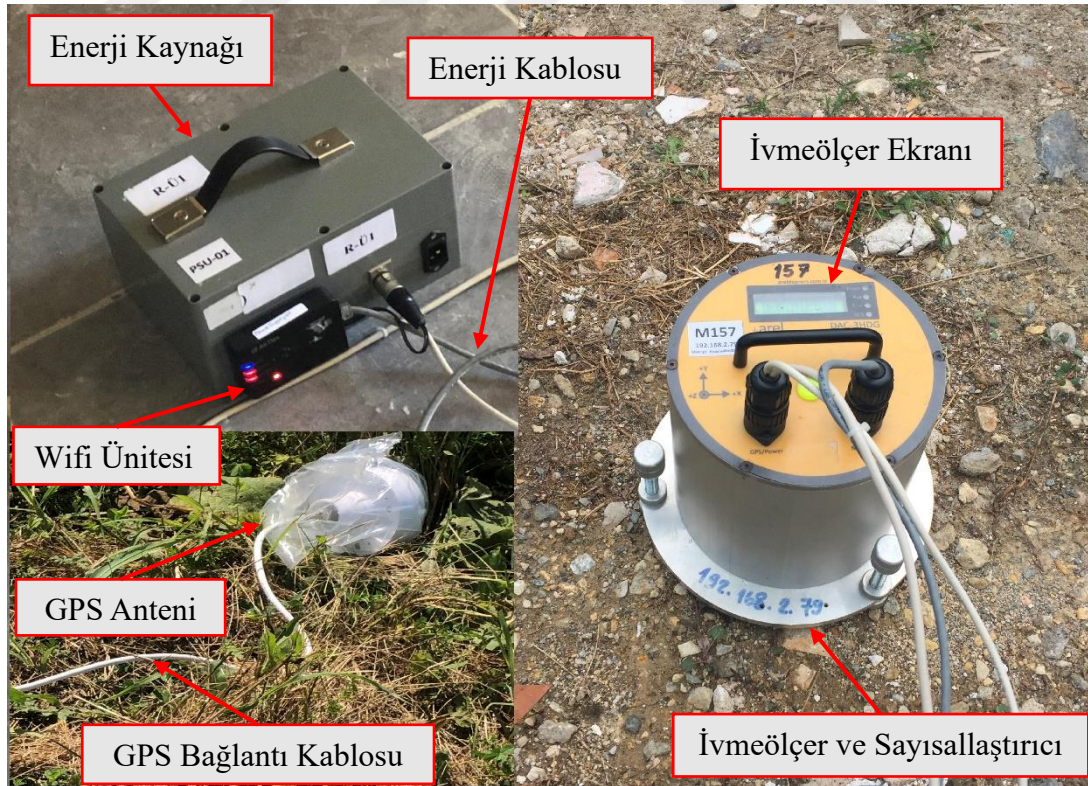
Şekil 2.12. Pamukova/Yenice test sahasının yandan görünümü

Pamukova/Yenice test sahasında demiryolu platformu yüksek bir dolgu tabakası üzerinde bulunmaktadır. Tren hattı zemin seviyesinden 2.2 m yükseltilmiştir [62, 63]. Ayrıca hat altına kazık temel uygulanmıştır. Kazık temel ve dolgudan kaynaklanan bu yükselti farkının demiryolu hattının yakın çevresindeki zemin titreşimleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. İvmeölçerler tren hattına dik doğrultuda Sapanca/Kırkpınar ve Gebze/GTÜ Kampüs test alanlarındaki mesafelere uygun olarak yerleştirilmiş ve serbest zemin titreşim ivme verileri kaydedilmiştir.

2.2. İvmeölçerlerin Teknik Özellikleri

Şekil 2.13.'te saha ölçümlerinde kullanılan ivmeölçer deney seti gösterilmiştir. Arazi çalışmaları kapsamında deneysel ölçümler için kullanılan ivmeölçerler çok düşük gürültü seviyelerine sahip, üç eksenli Capacitive Force Micro-machined sensörlerle zayıf titreşim hareketlerini ölçebilen, DAC-3HDG tipi 32 bit yüksek çözünürlüklü ivmeölçerlerdir. Saha ölçümlerinde kullanılan ekipman: İvmeölçer ana kutusu, enerji kaynağı ve GPS anteni olmak üzere üç temel unsurdan oluşmaktadır.

Enerji kaynağı ivmeölçer ana kutusuna ve GPS antenine güç sağlar. Bu sayede ivmeölçer ana kutusunda ivme verisi sayısal veri haline getirilir. GPS antenine sağlanan enerji sayesinde uydu ile bağlantı kurularak zaman verisi kaydedilir. Enerji kaynağı üzerinde bulunan wifi verilerin bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlar. Deney setinin üç ana ögesi ara kablolarla birbirine bağlanmaktadır. İvmeölçer ekranı deney setinin çalışır haldeki durumunu göstermektedir.



Şekil 2.13. Saha ölçümlerinde kullanılan deney seti

Deney setine ait teknik özellikler Tablo 2.2.'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 2.2. Deney seti teknik ve donatımsal özellikleri

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. (5mS)
Hafıza Kartı	2 Gb Dahili (140 saat kayıt alabilme yeteneği) Kutu
ADC	32 Bit yüksek çözünürlük
Filtre	2 Kanal FIR/Antialiasing

2.3. Saha Testleri ve Veri Analizinin Yapılması

Yerel zemin koşullarını dikkate alarak YHT'nin çift yönlü tekrarlı geçişlerinin ürettiği serbest yüzey yer hareketini uzaklığa bağlı incelemek ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için belirli aralıklarla güzergâha sistematik ve dik (K-G doğrultulu) olarak dizilmiş ivmeölçerler ile titreşim kaydı alınmıştır. Kayıtlar HT65000 kodlu tren setlerine aittir. İvme verilerinin kaydı için üç test sahasında ölçüm yapılmıştır. İvmeölçerler Şekil 2.6., Şekil 2.9.(c) ve Şekil 2.11.(c)'de gösterildiği gibi ilgili sahalara yerleştirilmiştir. İvmeölçerler sahalara yerleştirildikten sonra hepsi aynı anda açılmış, çalışma tamamıyla bitene kadar kapatılmamıştır ve veri kaydı tamamlandıktan sonra hepsi aynı anda kapatılmıştır. İvmeölçerler ilk çalıştırıldıklarında veri kaydı yapıp yapmadığını kontrol etmek için sahada bilgisayar ile cihazlara bağlanılarak canlı veri takibi yapıldıktan sonra bağlantıları kesilmiştir.

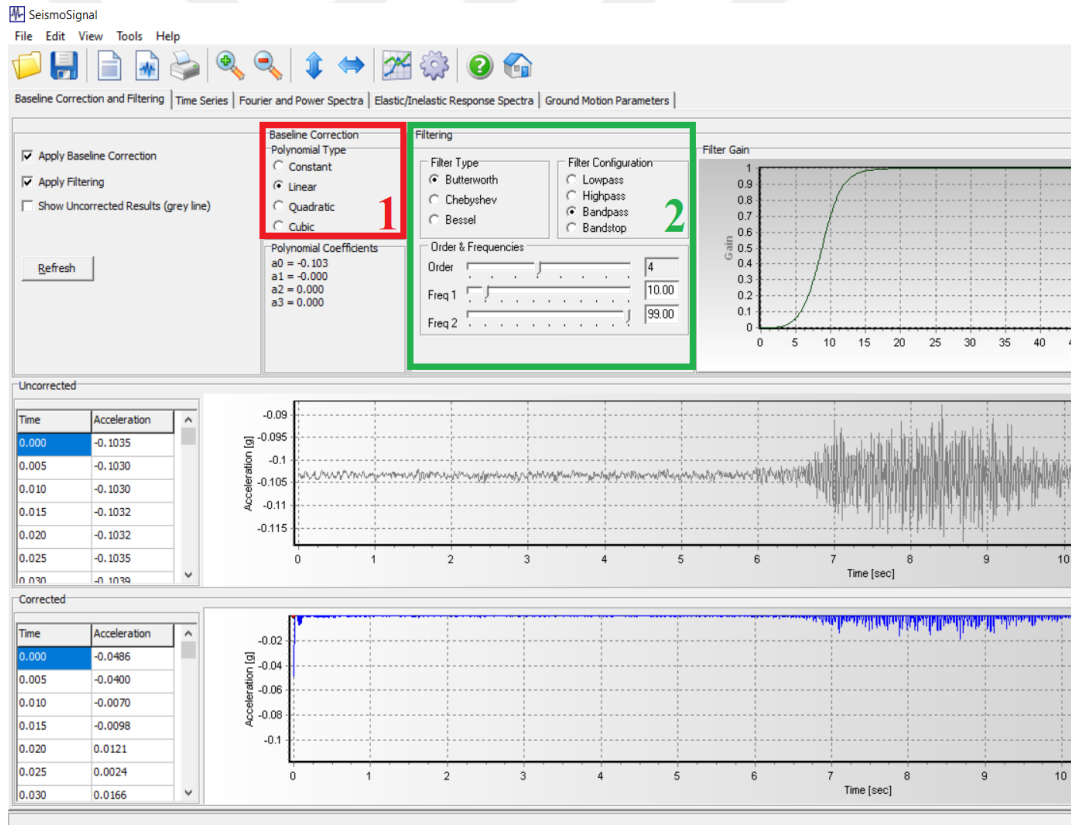
İvmeölçerler saniyede 200 ($\Delta t=1/200=0.005$) veri kaydedilebilecek şekilde ayarlanmıştır. Cihazlar çalıştırıldıktan sonra hiç kapatılmamış, saatlerce veri kaydetmiştir. GPS anteni ile kurulan uydu bağlantısı sayesinde titreşimin zaman bilgisi deney setine kaydedilmiştir. Ekipman bir yılı 365 güne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

Çalışma sahasına gidilmeden önce tren sefer saatleri bilgisi alınmıştır. YHT'lerin çalışma sahasında olacakları zaman tahmin edilerek YHT geçişleri gözlemlenmiştir. YHT'lerin geçiş saatleri not edilmiş bu sayede ivmeölçerlerin tek bir kayıt olarak aldığı verinin içinde YHT'lerin oluşturduğu titreşim verisinin bulunması kolaylaşmıştır.

Deney setinin üzerinde bulunan wifi sayesinde bilgisayarlar arasında kurulan bağlantı ile cihazdaki tüm veri bilgisayarlara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veride YHT'lerin geçiş saatlerinin olduğu zamanlara gidilerek bu bölümler on beş saniyelik süre ile tüm veriden çıkarılmıştır. Kesilen ivme verisinin bir sütununda on beş saniyelik süre için 3000 sayısal ivme verisi bulunmakta ve her bir sütun farklı yayılım doğrultusundaki ivme kaydını temsil etmektedir. Şekil 2.14.'te örnek bir ivme kaydı gösterilmiştir.

Şekil 2.14. Örnek ivme kaydı

Parçalanmış ham ivme verileri SeismoSignal programında işlenerek anlamlı ivme doneleri haline getirilmiştir. Veri analizleri zaman ve frekans ortamında yapılmıştır. İvme verisi ilk olarak sıfır çizgisine (Baseline Correction) hizalanmıştır. Bu işlem Şekil 2.15.'te kırmızı renkle gösterilen 1 nolu alanda gerçekleştirilmiştir. Sıfır çizgisine getirilen titreşim kayıtlarının Fourier genlik spektrumları incelendiğinde, dinamik yükün baskın frekans aralığı 10 ile 100 Hz aralığında olduğu saptanmıştır. Filtreleme işleminde ivme-zaman verilerinin integrasyon işlemi için 4. dereceden Butterworth Band geçişli filtreleme fonksiyonu kullanılmıştır [64]. Filtreleme Şekil 2.15.'te yeşil renkle gösterilen 2 nolu alanda gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işlemler kesilen tüm ivme verilerinin hepsine ayrı ayrı uygulanmıştır. İvme-spektrum grafikleri %5 sönümle çizdirilmiştir.



Şekil 2.15. İvme verisinin sıfır çizgisine hizalanması ve filtrelenmesi

BÖLÜM 3. ZEMİN TİTREŞİMLERİNİN İVME VERİLERİNDEN ELDE EDİLEN TEPKİ SPEKTRUMLARI İLE BİNA TİTREŞİM SEVİYELERİNİN ANALİZİ

İvmeölçerler, test alanlarına ivmeölçer yerleşim planlarında gösterildiği gibi tren hattına belirli mesafelerle ve hatta dik olarak konumlandırılmıştır. Test sahalarına sistematik olarak yerleştirilen ivmeölçerlerle serbest zemin titreşim kayıtları alınmış ve bu kayıtlardan tepki spektrumları oluşturulmuştur. Ölçüm noktalarına ait tepki spektrumları karşılaştırılarak titreşim seviyesinin mesafeye (hatta dik, K-G) göre değişimi incelenmiştir. Hendek ve yapı-zemin etkileşiminin titreşim seviyesine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca farklı test sahalarının tren hattına eşit uzaklıktaki ölçüm noktaları arasında yapılan karşılaştırmalarla tren hızının, hafriyat profilinin titreşim seviyeleri üzerindeki etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Değerlendirmeler dalga yayılım doğrultularından hatta dik ve hatta paralel olmak üzere iki yayılım doğrultusu ve iki geçiş -bir tanesi birinci hat, bir tanesi ikinci hat YHT geçişi- için yapılmıştır.

3.1. Ölçüm Noktalarındaki Titreşim Seviyelerinin Karşılaştırmalı Analizi

Bu bölümde seçilen test sahalarında titreşim seviyesine uzaklığa bağlı değişimin yanısıra hendek ve yapı-zemin etkileşiminin etkisi incelenmiştir.

3.1.1. Sapanca/Kırkpınar test alanında yapılan analizler

Sapanca/Kırkpınar test sahasında uzaklığa bağlı değişimin, hendek ve yapı-zemin etkileşiminin titreşim seviyesine etkisi araştırılmıştır. İvmeölçerler tren hattına dik (K-G) doğrultuda birinci hattın itibaren 5, 12, 19, 26 m mesafelerdeki ölçüm noktalarına konumlandırılmıştır. Birinci hat ve ikinci hat arası mesafe 4.5 m'dir. Bu test alanında birinci hat geçişlerinde İstanbul'dan kalkan trenler Ankara istikametine,

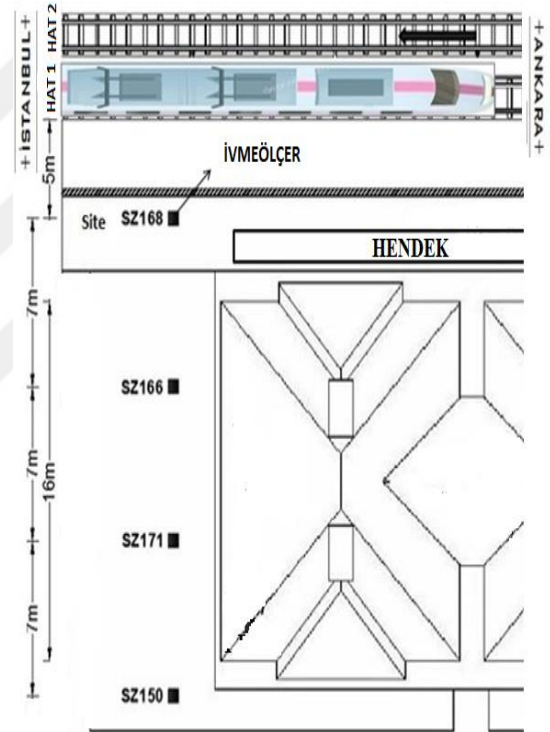
ikinci hat geçişlerinde Ankara'dan kalkan trenler İstanbul istikametine gitmektedir. YHT'lerin geçiş hızı 250 km/sa'dır.

3.1.1.1. Sapanca/Kırkpınar test alanı doğal zemin bölümü analizleri

Doğal zemine ait titreşim seviyesinin uzaklığa bağlı değişimi bu bölümde incelenmiştir. Şekil 3.1.'de ivmeölçerlerin sahadaki konumları, mesafe ve isimleri gösterilmiştir.



(a)

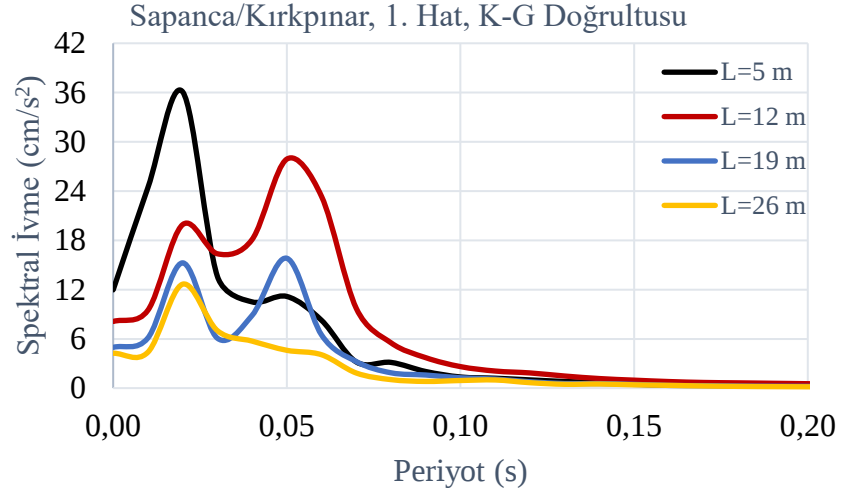


(b) [47]

Şekil 3.1. Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin ivmeölçer saha konumları (a), mesafe ve isimleri (b)

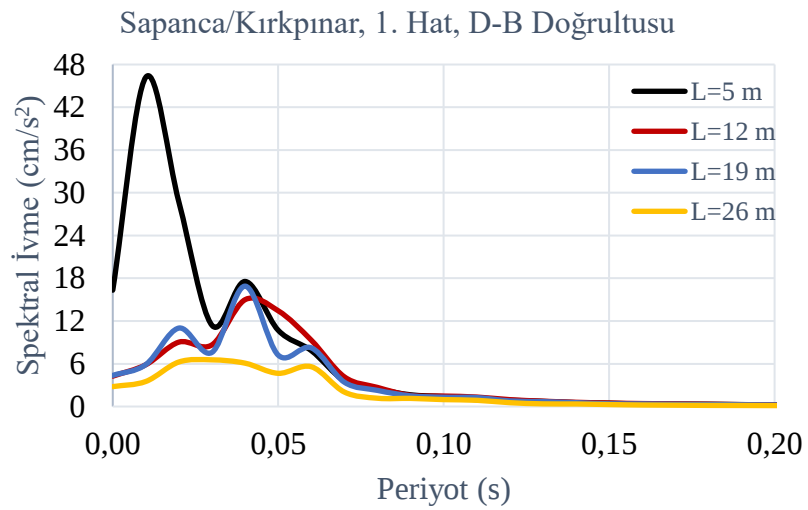
Grafik başlıklarında, soldan sağa doğru saha ismi, trenin geçiş yaptığı hat ve titreşim enerjisinin yayılma doğrultusu belirtilmiştir. Titreşim enerjisinin tren hattına dik doğrultuda yayılması K-G (Kuzey-Güney), tren hattına paralel doğrultuda yayılması D-B (Doğu-Batı) ile sembolize edilmiştir. Grafiklerde L sembolü ile ölçüm noktalarının hatta olan mesafeleri ifade edilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerini ifade etmek için hat isimleriyle birlikte trenlerin gittiği istikamet belirtilmiştir.

Şekil 3.2.'de titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen belirlenen noktalarda ölçülen titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



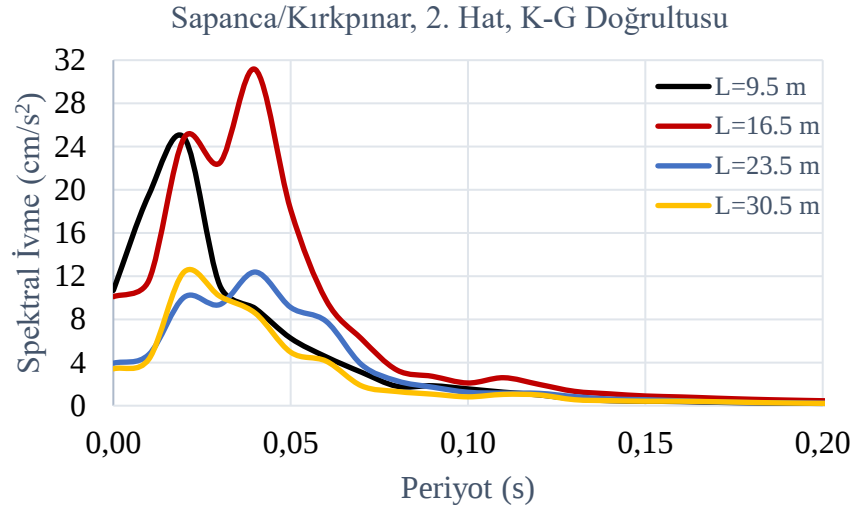
Şekil 3.2. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.3.'te titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



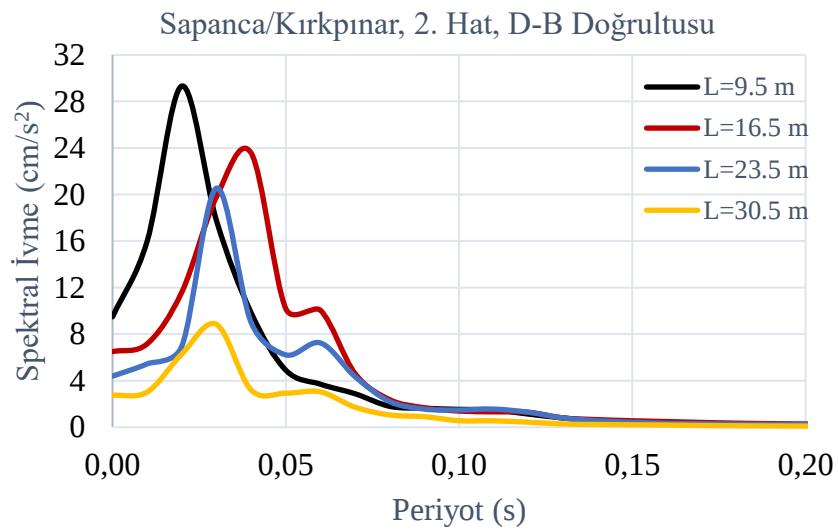
Şekil 3.3. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.4.'te titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.4. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.5.'te titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen belirlenen noktalarda ölçülen titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

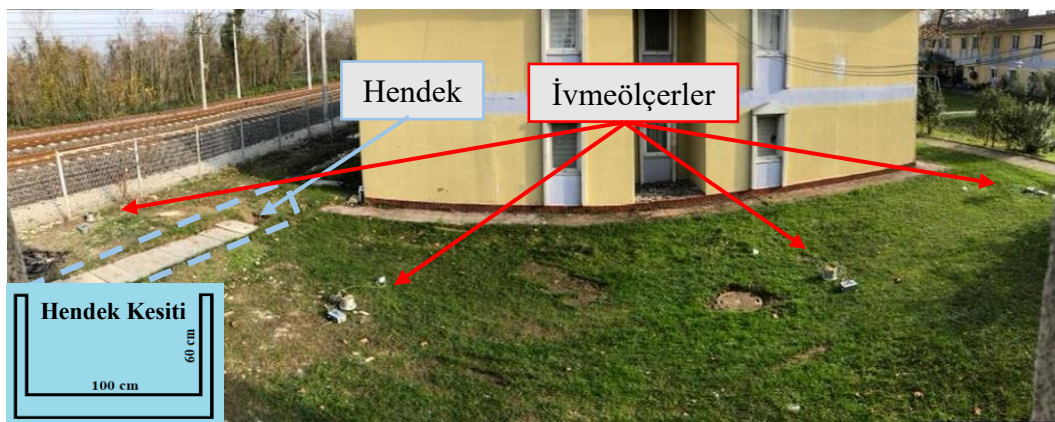


Şekil 3.5. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda doğal zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Titreşim enerjisinde, genel olarak mesafeye bağlı düzenli bir azalım ilişkisi beklense de deneysel ölçümlerde bu durum farklı yayılma doğrultularında ve farklı hat geçişlerinde değişiklik göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre dalga yayılım doğrultuları birbirinden farklı azalım ilişkilerine sahiptir. Deneysel sonuçlarda oluşan bu farklılıklar yerel zemin koşullarındaki heterojen yapı nedeniyle -gerek insan müdahaleleri gerekse doğal zeminin oluşum sürecinde meydana gelen- yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların varlığını düşündürmüştür. Birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşimin seviyesi, ikinci hattan geçen trenin oluşturduğu titreşim seviyesinden daha fazladır. Bu durumun nedeni olarak 1. hattın ray altyapısının 2. hat geçişindeki titreşim genliklerini etkilemesi ve 2. hattın ölçüm noktalarına uzaklığı 1. hattan fazla (4.5 m) olması düşünülmüştür.

3.1.1.2. Sapanca/Kırkpınar test alanı hendekli zemin bölümü analizleri

Hendekli zemine ait titreşim seviyesinin uzaklığa bağlı değişimi bu bölümde araştırılmıştır. Yapılan çalışmada tüm kontroller yapıldıktan sonra tren hattına en yakın noktadaki SZ162 ivmeölçeri bilinmeyen teknik bir sebeple kayıt almayı durdurmuştur. Bu durum nedeniyle tekrar bir çalışma yapılmamıştır. Kayıt alınamayan nokta hendek ile tren hattı arasındadır. SZ162 ve SZ168 ivmeölçerlerinin titreşim kaynağı ile ölçüm noktası arasında herhangi bir değişken bulunmadığı için SZ168 cihazından elde edilen sonuçlar SZ162 cihazının alacağı veriler yerine kullanılmıştır. Şekil 3.6.'da hendek, ivmeölçerlerin sahadaki konumları, mesafe ve isimleri gösterilmiştir.

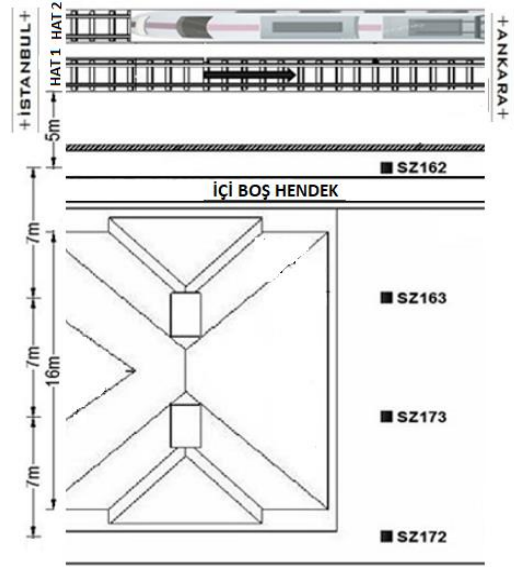


(a) [64]

Şekil 3.6. Sapanca/Kırkpınar test sahasındaki hendek (a) ivmeölçer saha konumları (b), mesafe ve isimleri (c)



(b)

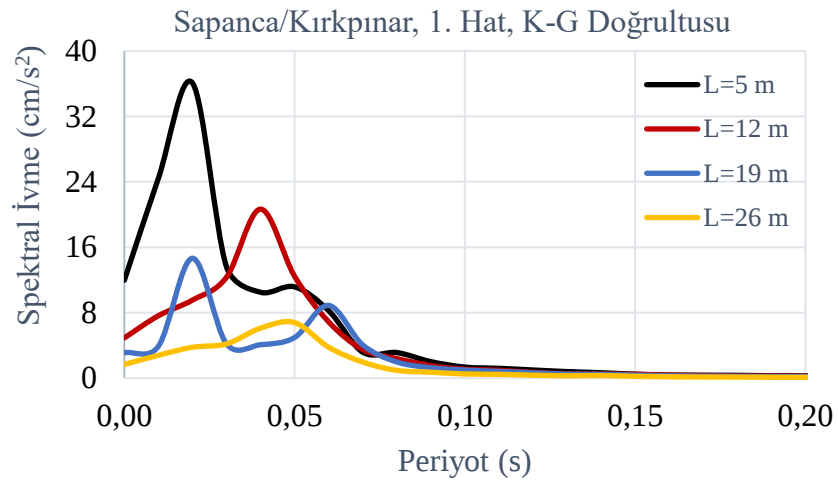


(c) [47]

Şekil 3.6. (Devamı)

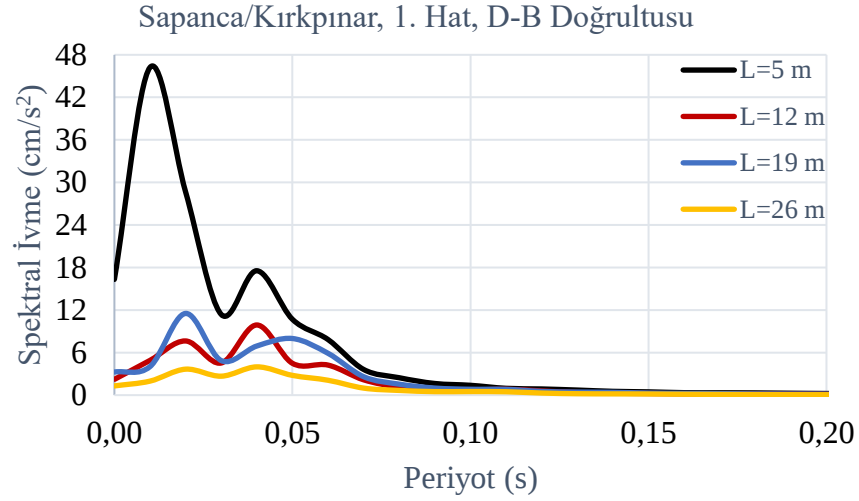
Titreşim enerjisinin tren hattına dik doğrultuda yayılması K-G, tren hattına paralel doğrultuda yayılması D-B ile sembolize edilmiştir. Grafiklerde L sembolü ile ölçüm noktalarının hatta olan mesafeleri ifade edilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerinin yanısıra trenlerin gittiği istikamet belirtilmiştir.

Sapanca/Kırkpınar sahasında hendekli zeminde oluşan titreşim seviyesinin hatta dik doğrultudaki uzaklığa bağlı değişimi Şekil 3.7.'de gösterilmiştir. Bu grafik birinci hat geçişinin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



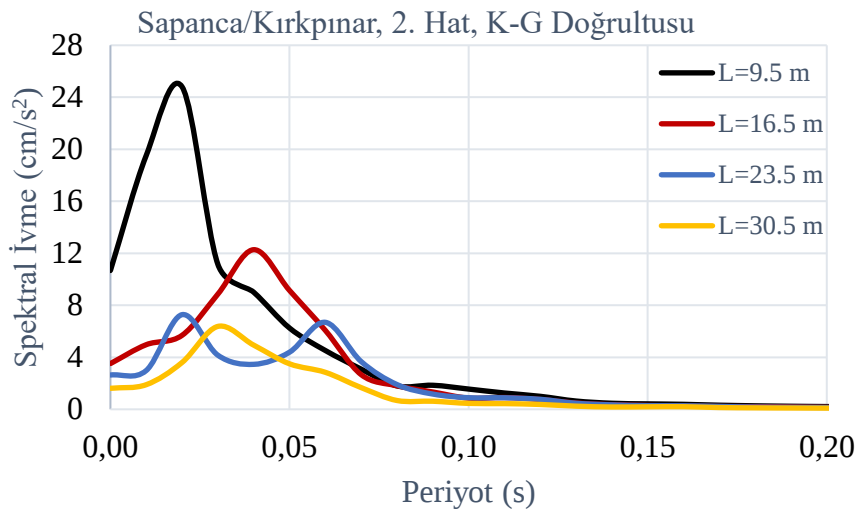
Şekil 3.7. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.8.'de titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattın geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



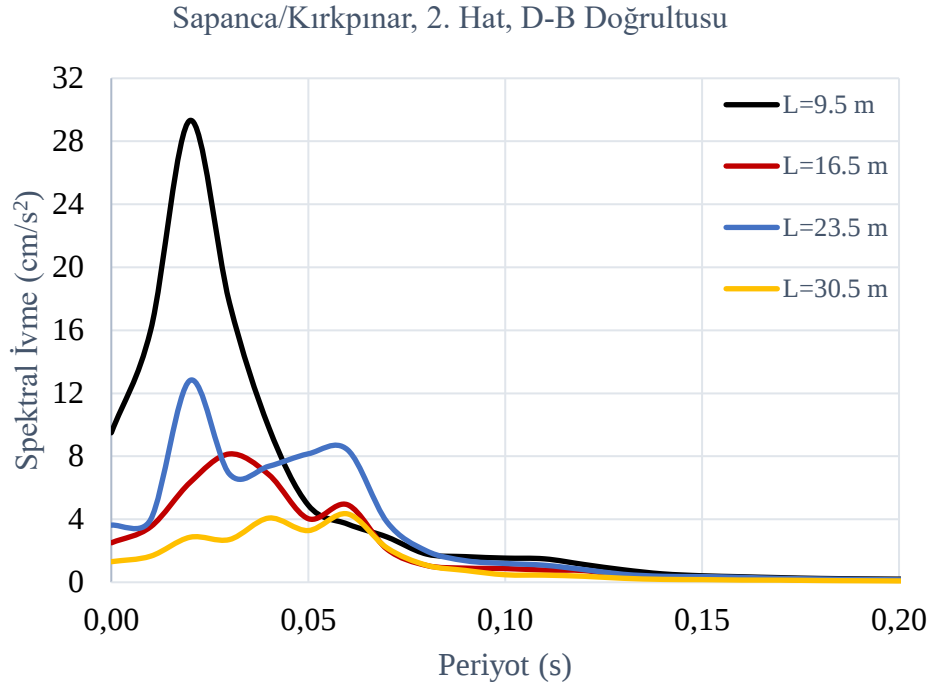
Şekil 3.8. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.9.'da titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattın geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.9. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.10.'da titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen belirlenen noktalarda ölçülen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

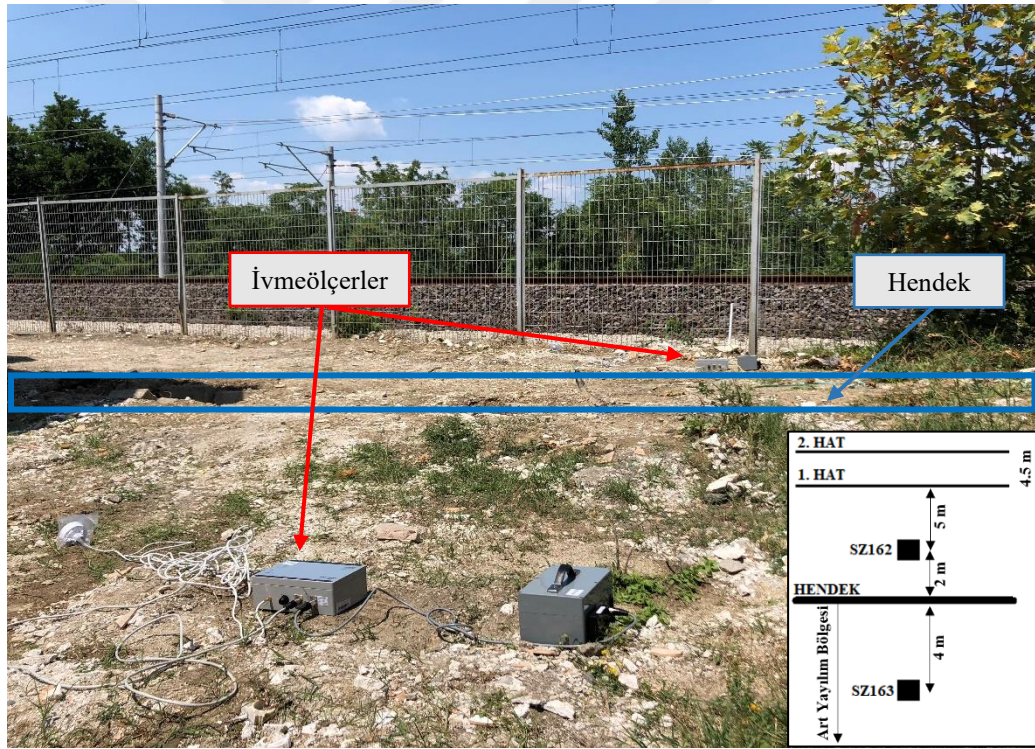


Şekil 3.10. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Hendekli bölümde titreşim seviyesi mesafeye bağlı olarak tren hattına dik doğrultuda sürekli azalış ilişkisi göstermiş ancak tren hattına paralel doğrultuda sürekli azalış gözlenmemiştir. 1. hat geçişi tren hattına dik (K-G) yayılım doğrultusunda hatta en yakın ölçüm noktası (5 m) ile en uzak ölçüm noktası (26 m) arasındaki maksimum spektral ivme farkı 29.292 cm/s^2 , hatta paralel doğrultuda bu fark 42.241 cm/s^2 'dir. Benzer şekilde 2. hat geçişinde tren hattına dik (K-G) yayılım doğrultusundaki fark 18.431 cm/s^2 , tren hattına paralel (D-B) yayılım doğrultusundaki fark 24.983 cm/s^2 'dir. İlave olarak maksimum spektral ivmelere karşı gelen periyot değerleri mesafelere göre değişkenlik göstermiştir.

3.1.1.3. Sapanca/Kırkpınar alanı doğal zemin ve hendekli zemin bölümü titreşim seviyelerinin karşılaştırmalı analizi

Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde tren hattına eşit uzaklıktaki ölçüm noktalarında oluşturulan ivme tepki spektrumları karşılaştırılarak hendek bariyerin titreşim düzeyine olan etkisi incelenmiştir [65-66]. Hendek titreşim bariyeri ile tren hattı arasında kalan bölgenin titreşim düzeyi karşılaştırılmamıştır. Titreşim bariyerinin etkisinin gözlemlenebilmesi için hendek bariyerin art yayılım bölgesindeki (1. hatta uzaklığı 12, 19, 26 m olan ölçüm noktaları) titreşim seviyesini karşılaştırmanın yeterli olduğu düşünülmüştür. Titreşim seviyeleri tren hattına en yakın noktadan en uzağa doğru sırasıyla hendek art bölgesi için verilmiştir. Şekil 3.11.'de hendek yeri ve art bölgesi gösterilmiştir.

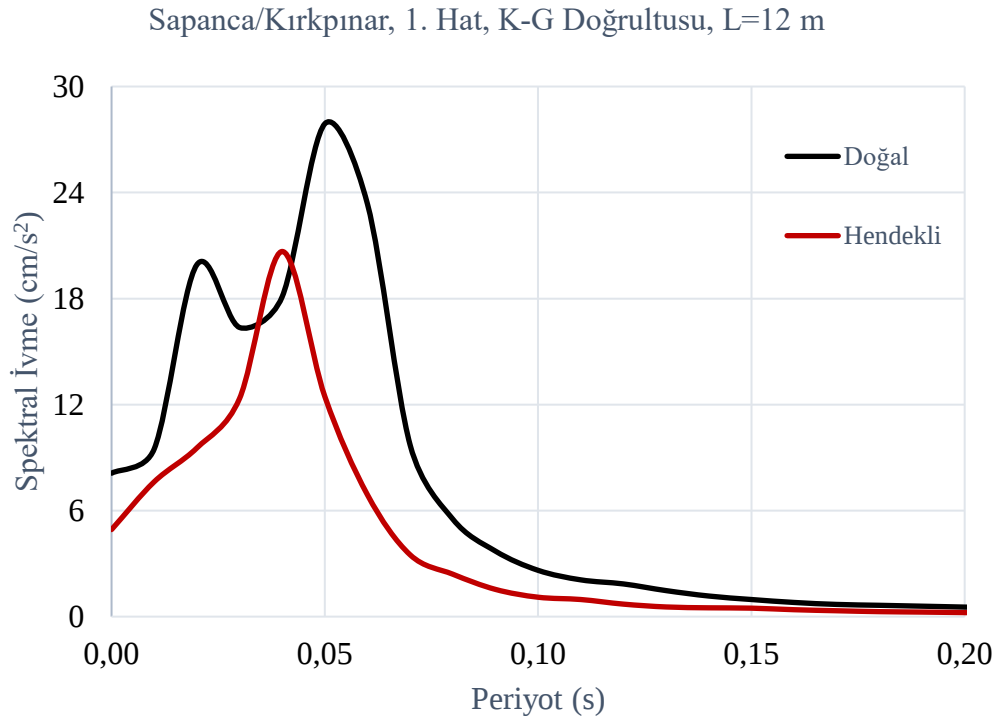


Şekil 3.11. Sapanca/Kırkpınar test sahasında bulunan hendeğin konumu

Grafik başlıklarında, soldan sağa doğru saha ismi, trenin geçiş yaptığı hat, titreşim enerjisinin yayılma doğrultusu ve ölçüm noktasının hatta olan uzaklığı belirtilmiştir. Titreşim enerjisinin tren hattına dik doğrultuda yayılması K-G (Kuzey-Güney), tren hattına paralel doğrultuda yayılması D-B (Doğu-Batı) ile sembolize edilmiştir.

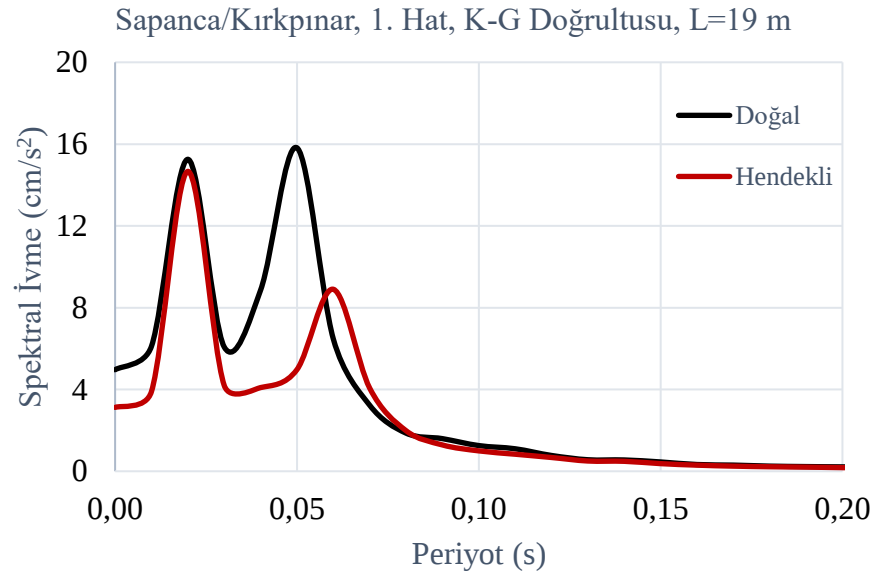
Grafiklerde gösterilen titreşim seviyeleri doğal zemin bölümüne aitse “Doğal”, hendekli zemin bölümüne ait ise “Hendekli” biçiminde ifade edilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerini ifade etmek için hat isimleriyle birlikte trenlerin gittiği istikamet belirtilmiştir.

Şekil 3.12.’de Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 12 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT’nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



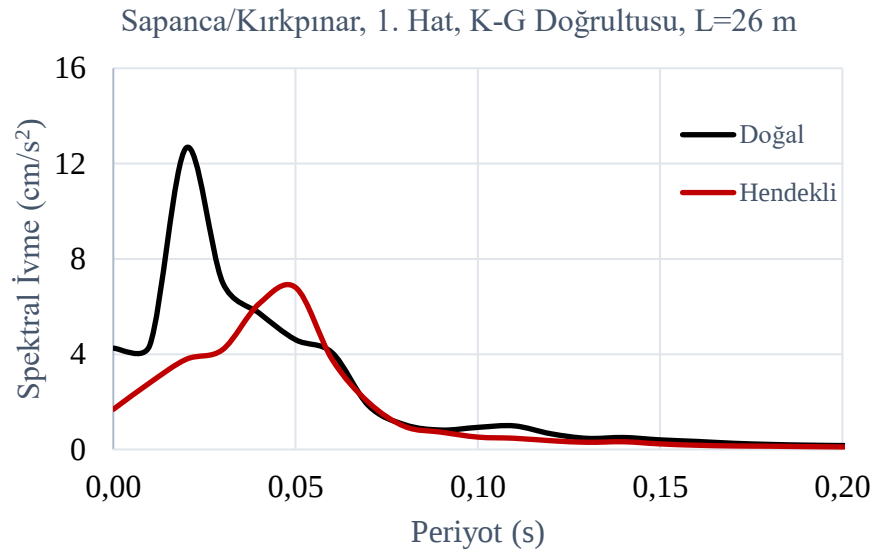
Şekil 3.12. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=12 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.13.’te Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 19 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT’nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.13. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=19 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

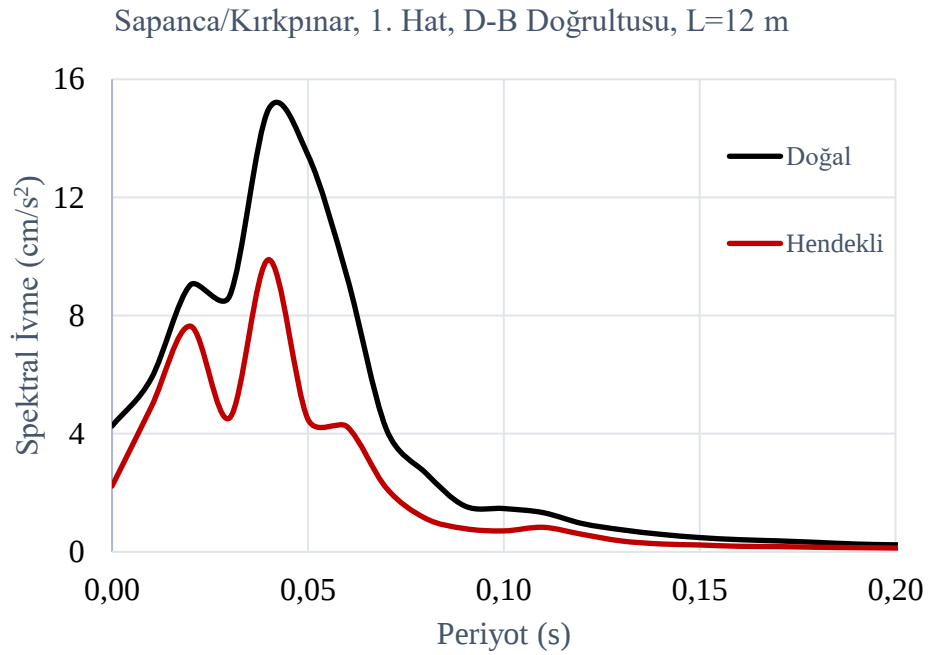
Şekil 3.14.'te Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 26 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.14. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=26 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

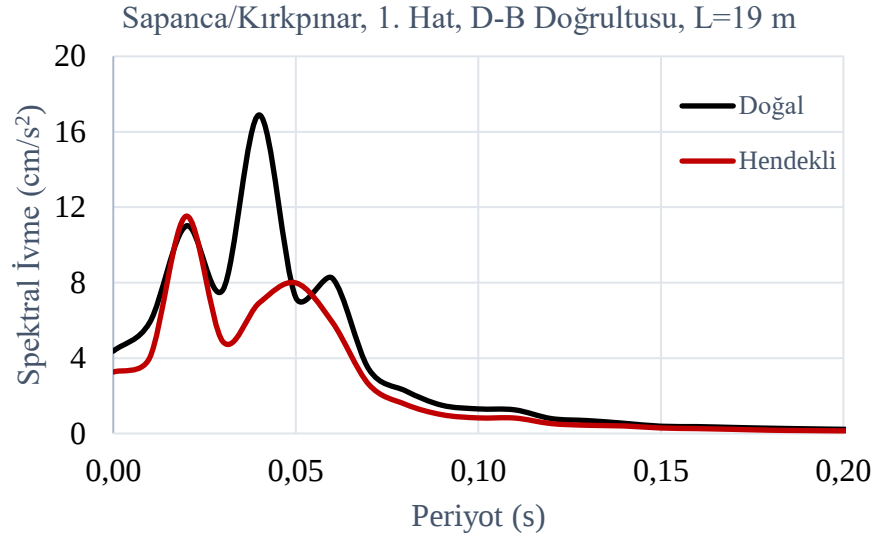
Trenin 1. hat (Ankara) geçişinde oluşturduğu titreşim hatta dik yayılım doğrultusunda 12 m, 19 m, 26 m uzaklıklarda hendekli bölgede sırasıyla 7.230 cm/s^2 , 1.154 cm/s^2 , 5.862 cm/s^2 azalmıştır. Hem doğal zemin bölümünde hem de hendekli zemin bölümünde maksimum spektral ivme değerleri sürekli azalış göstermiştir. Hendek 12 m ve 19 m uzaklıklarda maksimum spektral ivme oluşum periyodunu kısaltırken 26 m uzaklıktaki noktada uzatmıştır.

Şekil 3.15.'te Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 12 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



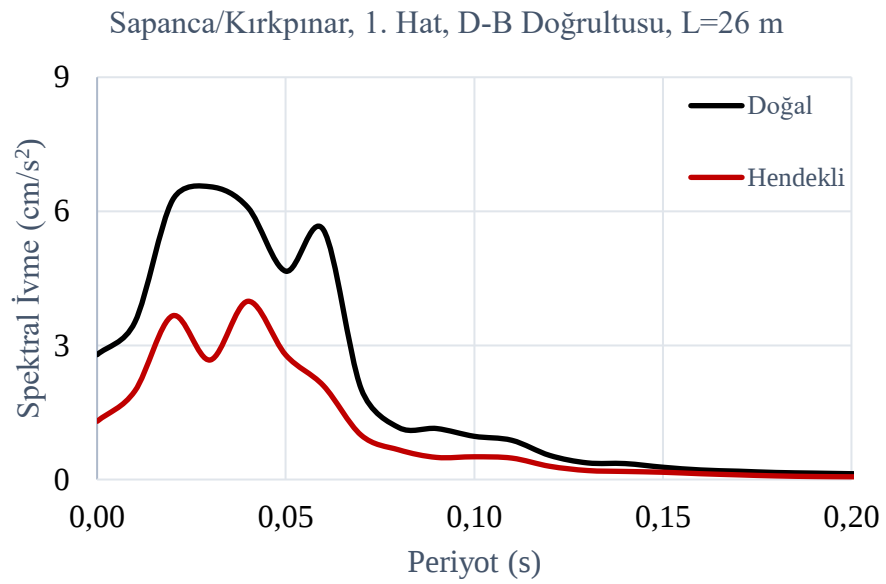
Şekil 3.15. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=12 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.16.'da Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 19 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini gösterir.



Şekil 3.16. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=19 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

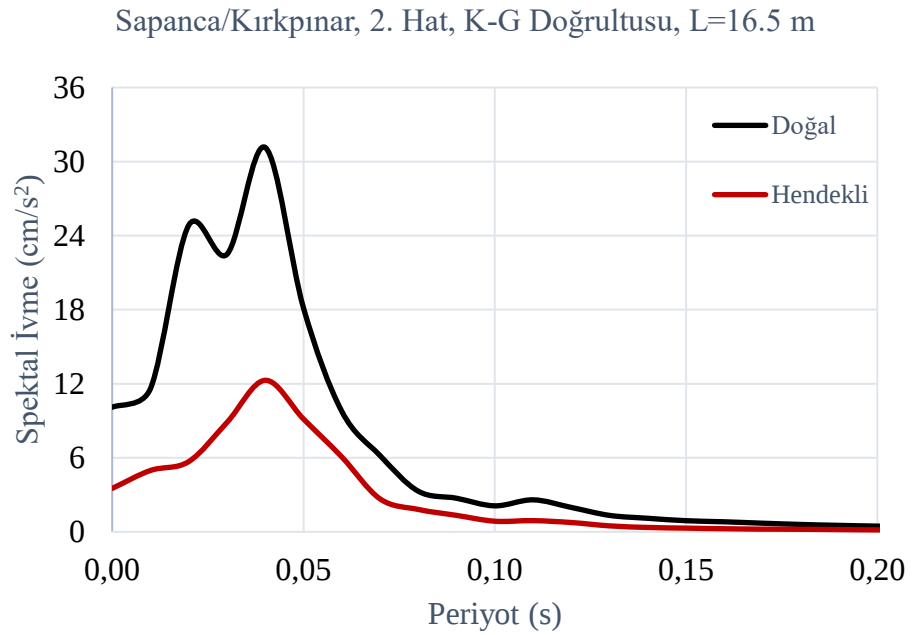
Şekil 3.17.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 26 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini gösterir.



Şekil 3.17. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için L=26 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

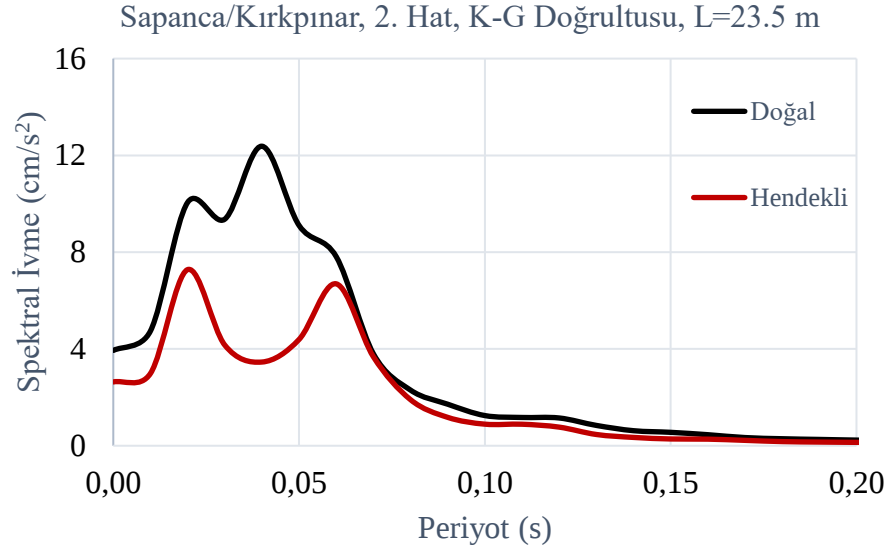
Trenin 1. hat (Ankara) geçişinde oluşturduğu titreşim hatta paralel yayılım doğrultusunda 12 m, 19 m, 26 m uzaklıklarda hendekli bölgede sırasıyla 5.103 cm/s^2 , 5.368 cm/s^2 , 2.561 cm/s^2 azalmıştır. Hem doğal zemin bölümünde hem de hendekli zemin bölümünde maksimum spektral ivme değerleri sürekli azalım göstermemiştir. Maksimum spektral ivme oluşum periyodu 12 m uzaklıktaki noktada değişmezken, 19 m uzaklıkta kısalmış, 26 m uzaklıkta uzamıştır.

Şekil 3.18.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 16.5 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



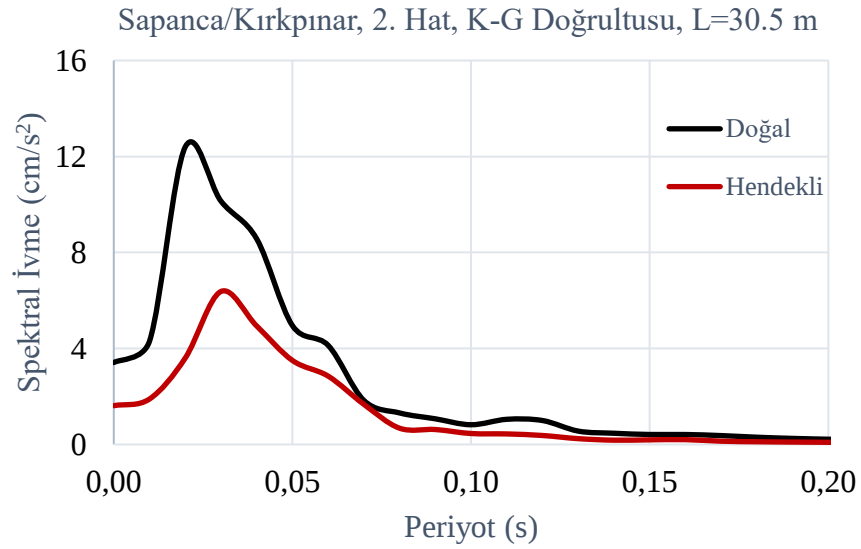
Şekil 3.18. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=16.5 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.19.'da Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 23.5 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.19. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=23.5 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

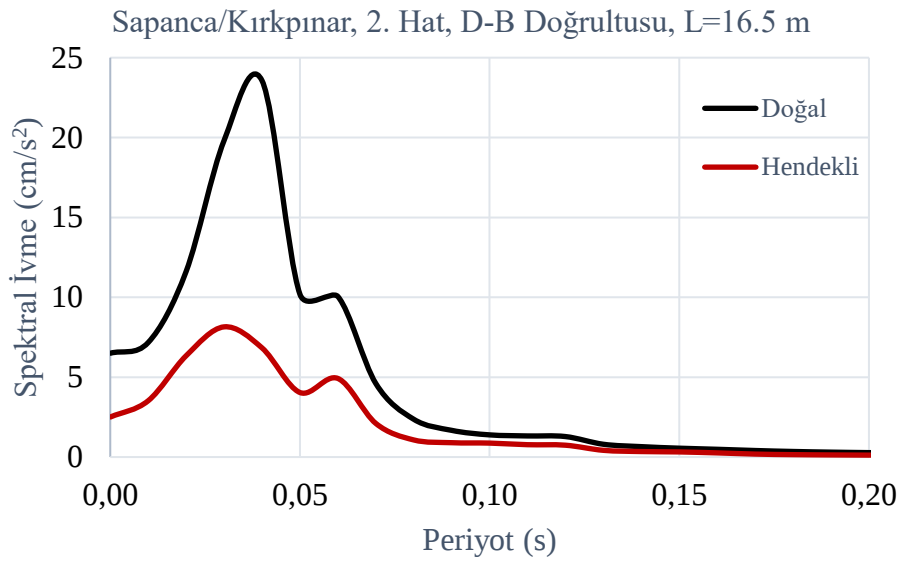
Şekil 3.20.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 30.5 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.20. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=30.5 m K-G doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

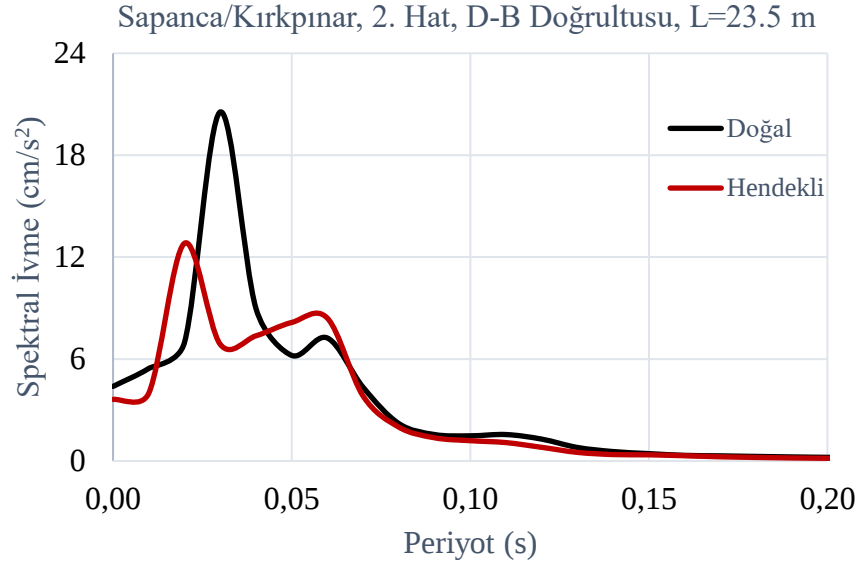
Trenin 2. hat (İstanbul) geçişinde oluşturduğu titreşim hatta dik yayılım doğrultusunda 12.5 m, 23.5 m, 30.5 m, uzaklıklarda hendekli bölgede sırasıyla 18.866 cm/s^2 , 5.099 cm/s^2 , 6.023 cm/s^2 azalmıştır. Maksimum spektral ivme değerleri doğal zemin bölümünde sürekli azalım göstermezken hendekli zemin bölümünde sürekli azalım göstermiştir. Maksimum spektral ivme oluşum periyodu 16.5 m uzaklıktaki noktada hem doğal zemin bölümünde hem de hendekli zemin bölümünde 0.040 s, 23.5 m uzaklıkta doğal zemin bölümünde 0.040 s'den hendekli zemin bölümünde 0.020 s'ye düşmüş, 30.5 m uzaklıkta ise doğal zeminde 0.020 s'den hendekli zemin bölümünde 0.030 s'ye yükselmiştir.

Şekil 3.21.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 16.5 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattın geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



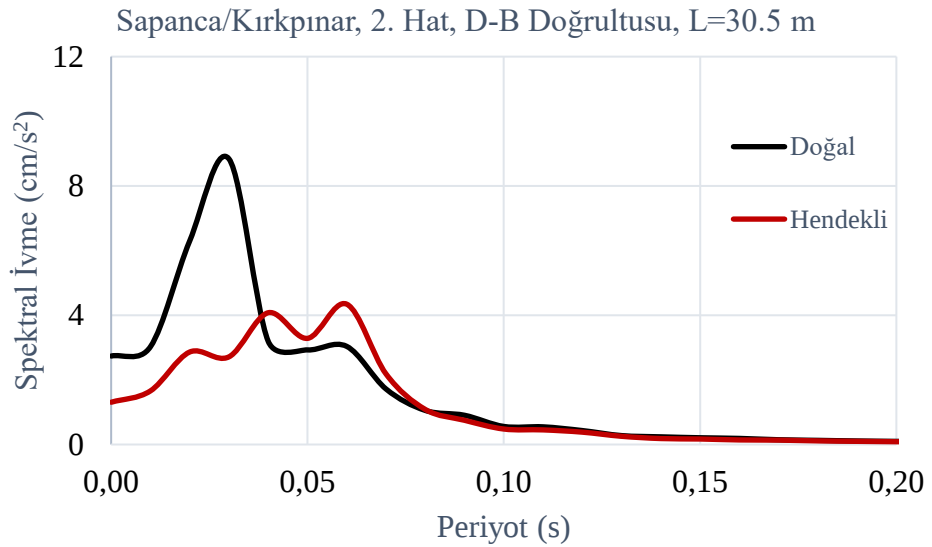
Şekil 3.21. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=16.5 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.22.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 23.5 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattın geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.22. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=23.5 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.23.'te Sapanca/Kırkpınar test sahasında doğal zemin bölümü ile hendekli zemin bölümünde bulunan tren hattına 30.5 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.23. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için L=30.5 m D-B doğrultusunda doğal ve hendekli zemin ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Trenin 2. hat (İstanbul) geçişinde oluşturduğu titreşim hatta paralel yayılım doğrultusunda 16.5 m, 23.5 m, 30.5 m, uzaklıklarda hendekli bölgede sırasıyla 15.412 cm/s², 7.729 cm/s², 4.495 cm/s² azalmıştır. Maksimum spektral ivme değerleri hendekli zemin bölümünde sürekli azalım göstermezken doğal zemin bölümünde sürekli azalım göstermiştir. Maksimum spektral ivme oluşum periyodu 16.5 m uzaklıktaki noktada doğal zemin bölümünde 0.040 s'den hendekli zemin bölümünde 0.030 s'ye düşmüş, 23.5 m uzaklıkta doğal zemin bölümünde 0.030 s'den hendekli zemin bölümünde 0.020 s'ye düşmüş ve 30.5 m uzaklıkta ise doğal zeminde 0.030 s'den hendekli zemin bölümünde 0.060 s'ye yükselmiştir.

İçi boş hendek tipi bariyer titreşim seviyesini hatta dik doğrultuda %7-61 ve hatta paralel doğrultuda %39-66 arasında değişen oranlarla düşürmektedir. Hendekli bölüm ve doğal zemin bölümünde maksimum spektral ivme değerlerinin meydana geldikleri periyotların birbirinden farklı olduğu gözlenmiştir. Hendek periyotları bazı noktalar için uzatırken bazı noktalarda ise kısaltmaktadır. Hendekli bölüm ile doğal zemin bölümü ivme tepki spektrumları büyük ölçüde paralellik göstermektedir, bu durum hendeğin titreşim seviyesini düşürse de dalga yayılım karakterizasyonunu (mesafeye bağlı azalım ilişkilerini) değiştirmedini düşündürmüştür.

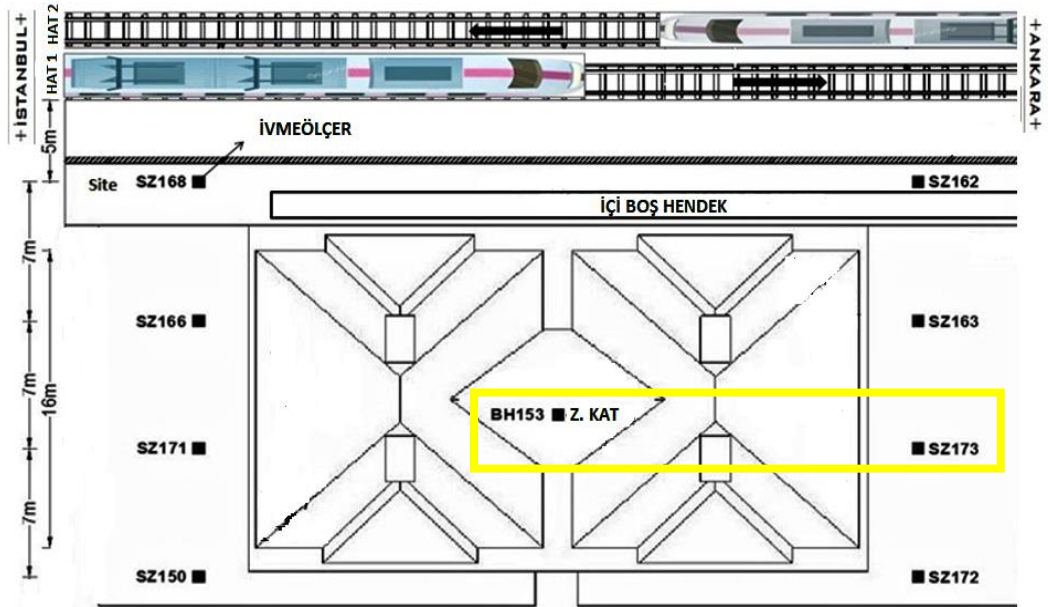
3.1.1.4. Yapı varlığının titreşim seviyesine etkisinin yapı-zemin etkileşimi açısından incelenmesi

Yüksekliği fazla olan rijit binalar, nükleer enerji santrallerinde bulunan yapılar, barajlar ve köprü gibi dinamik yükler altındaki -küçük yerdeğiştirmelerin bile önemli olduğu- yapı sistemleri, farklı iki zemin özelliğine sahip araziler üzerinde zeminlerin geçiş yaptığı bölgeye yapılacak üstyapılarda, yapı ile zemin arasındaki karşılıklı dinamik etki problemi yapı zemin etkileşiminin ilgi alanıdır. Bir bölgedeki yapının detaylı şekilde analiz edilmesinde, yapı zemin sisteminin dinamik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir aksi takdirde geleneksel yöntemlerle üstyapı ile zeminin ankastre bir bağlantısı olduğu kabul edilmekte bu da çok farklı sonuçlara neden olmaktadır. Gerçek davranışın hesaplanabilmesi için zemin ortamı ile üstyapıyı bir

bütün olarak analiz etmek gerekmektedir [67]. Gerçek davranışın bilgisayar ve hesap modellerinin oluşturulması amacıyla yapı zemin etkileşim problemine farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada yapı zemin etkileşim probleminde kinematik etkileşimin etkisi deneysel olarak ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmanın daha iyi hesap ve bilgisayar modelleri oluşturmak için kullanılabileceği düşünülmüştür.

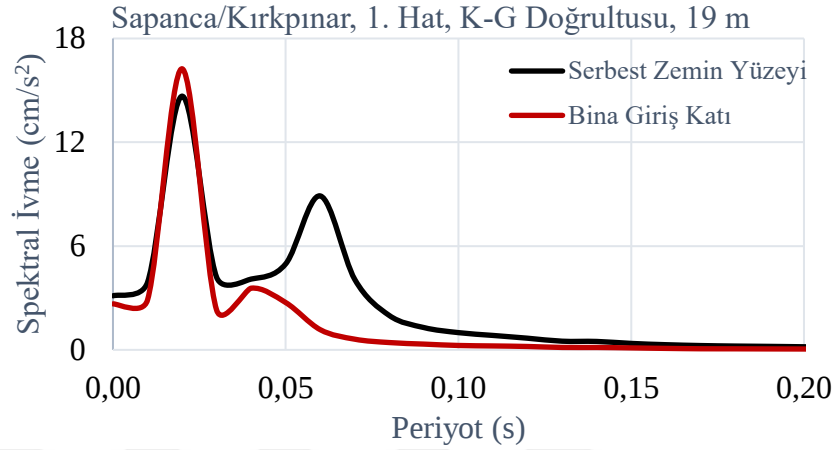
Sapanca/Kırkpınar test alanında bulunan hendek yapı boyunca uzanmaktadır ve dinamik yük kaynağından yapıya gelen titreşimleri engellemektedir. Yapı zemin kinematik etkileşiminin incelenmesi için hendekli serbest zemin ile bina temeli üzerindeki cihaz verilerinden oluşturulan ivme tepki spektrumları karşılaştırılmıştır. Cihazların (BH 153-SZ173) birinci hatta olan dik uzaklıkları (19 m) eşittir. BH 153 ivmeölçeri bina içinde giriş katta bulunmaktadır. Şekil 3.24.'te titreşim seviyeleri karşılaştırılan cihazlar gösterilmiştir.

Grafiklerde gösterilen titreşim seviyeleri zemin bölümüne aitse “Serbest Zemin Yüzeyi”, yapı-zemin etkileşiminin olduğu yapı içine ait ise “Bina Giriş Katı” biçiminde ifade edilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerini ifade etmek için hat isimleriyle birlikte trenlerin gittiği istikamet belirtilmiştir.



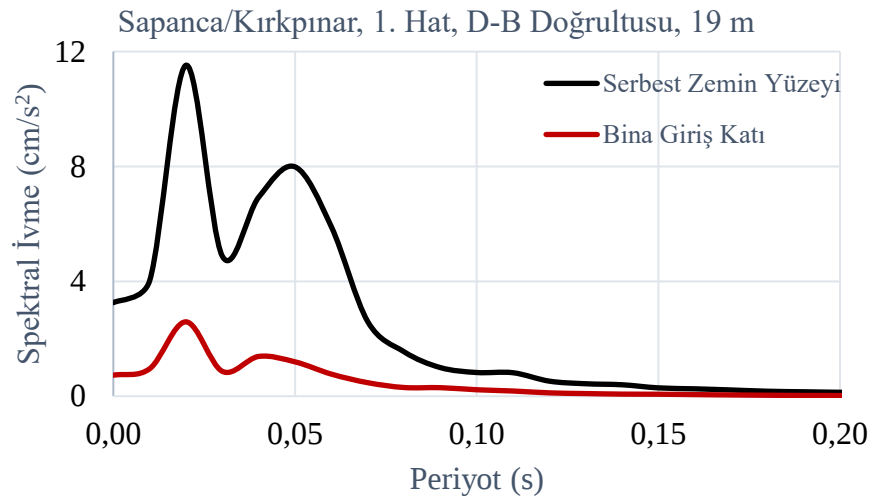
Şekil 3.24. Yapı zemin kinematik etkileşiminin incelenmesi için verileri karşılaştırılan ivmeölçerler [47]

Şekil 3.25.'te Sapanca/Kırkpınar test sahasında hendekli zemin bölümü ile bina temeli üzerinde bulunan tren hattına 19 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



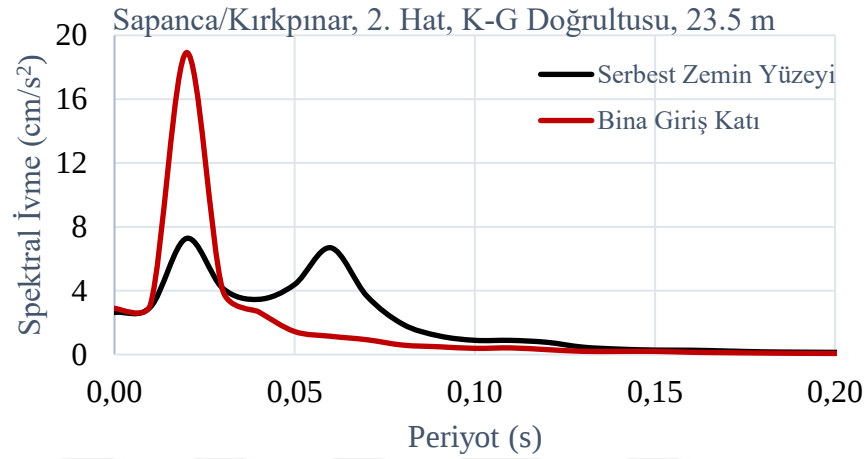
Şekil 3.25. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.26.'da Sapanca/Kırkpınar test sahasında hendekli zemin bölümü ile bina temeli üzerinde bulunan tren hattına 19 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



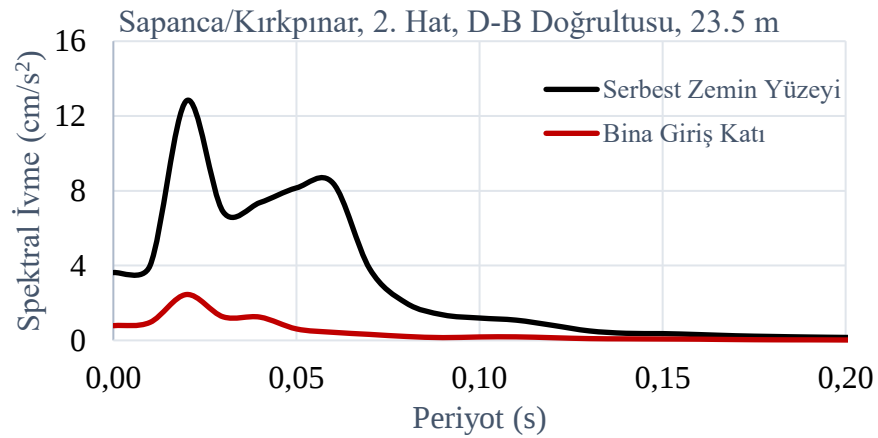
Şekil 3.26. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.27.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında hendekli zemin bölümü ile bina temeli üzerinde bulunan tren hattına 23.5 m mesafedeki noktaların tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.27. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.28.'de Sapanca/Kırkpınar test sahasında hendekli zemin bölümü ile bina temeli üzerinde bulunan tren hattına 23.5 m mesafedeki noktaların tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi ivme tepki spektrumlarıyla gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.28. Sapanca/Kırkpınar mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda zemin ile yapı zemin etkileşimli durumun ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

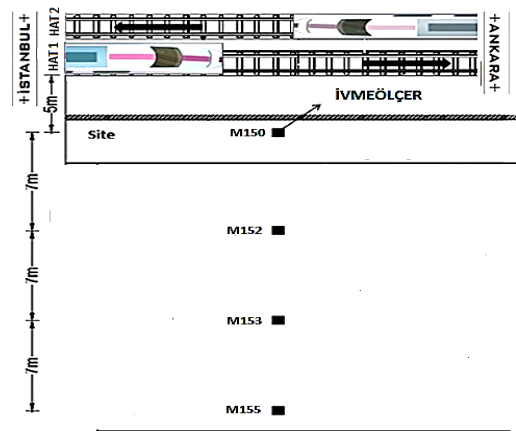
Sapanca/Kırkpınar test sahasındaki çalışmada her iki yatay doğrultu için ölçülen titreşimlerden elde edilen ivme spektrum eğrileri incelendiğinde binanın varlığının serbest yüzey hareketini büyük ölçüde değiştirdiği görülmüştür. Bina temeli üzerine yerleştirilen ivmeölçerden alınan tren hattına paralel (D-B) doğrultudaki titreşim kayıtlarından üretilen ivme spektrum eğrileri serbest yüzey titreşim hareketinden elde edilen spektrum eğrilerine göre kinematik etkileşim nedeniyle daha küçük genlik değerlerinde dağılım göstermiştir. (Şekil 3.26.-28.) Tren hattına dik (K-G) doğrultudaki kayıtlardan elde edilen spektrum eğrilerinde ise; aynı eğilim tren hattına paralel (D-B) doğrultuda olduğu gibi büyük periyot değerleri için görülse de küçük periyotlarda durum aksine dönmüştür. (Şekil 3.25.-27.)

3.1.2. Gebze/GTÜ Kampüs test alanında yapılan analizler

Gebze/GTÜ Kampüs test sahasında yapılan bu bölümdeki analizlerde titreşim düzeyinin mesafeye göre değişimi incelenmiştir. İvmeölçerler tren hattına dik (K-G) doğrultuda birinci hattan itibaren 5, 12, 19, 26 m mesafelerdeki ölçüm noktalarına Sapanca/Kırkpınar test sahasına uygun olarak yerleştirilmiştir. Birinci hat ve ikinci hat arası mesafe 4.5 m'dir. Bu test alanında Sapanca/Kırkpınar test sahasında olduğu gibi birinci hat geçişlerinde İstanbul'dan kalkan trenler Ankara istikametine, ikinci hat geçişlerinde Ankara'dan kalkan trenler İstanbul istikametine gitmektedir. YHT'lerin geçiş hızı 75 km/sa'dır. Şekil 3.29.'da ivmeölçerlerin sahadaki konumları, mesafe ve isimleri gösterilmiştir.



(a)

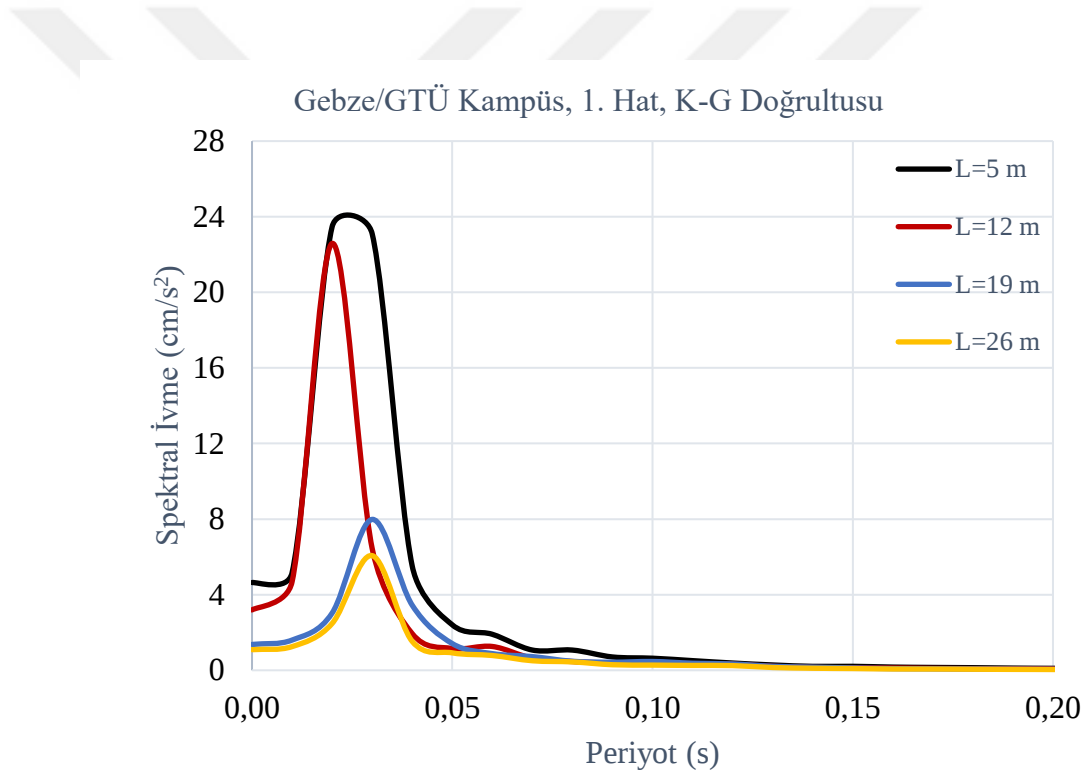


(b) [47]

Şekil 3.29. Gebze/GTÜ Kampüs test sahasında ivmeölçer saha konumları (a), mesafe ve isimleri (b)

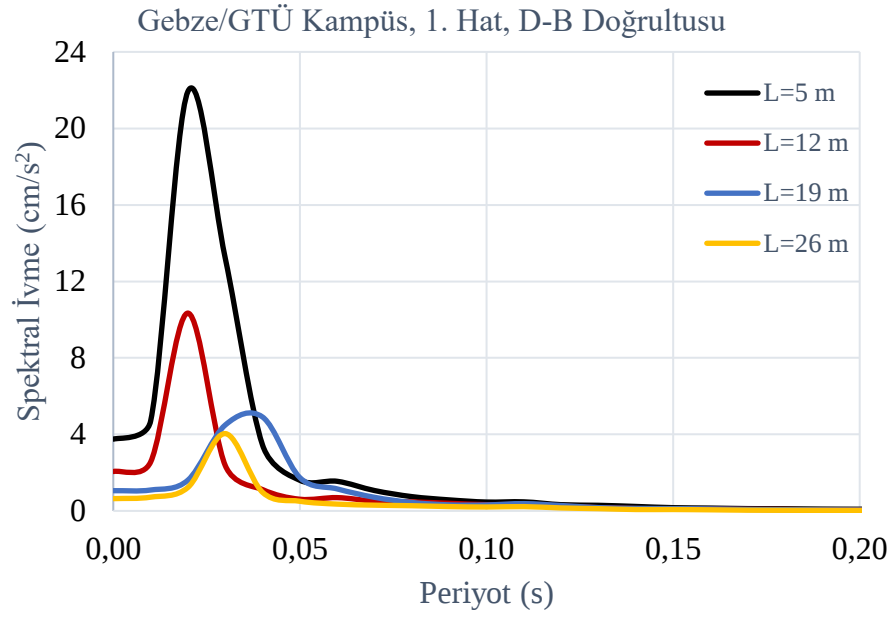
Grafik başlıklarında, soldan sağa doğru saha ismi, trenin geçiş yaptığı hat ve titreşim enerjisinin yayılma doğrultusu belirtilmiştir. Titreşim enerjisinin tren hattına dik doğrultuda yayılması K-G (Kuzey-Güney), tren hattına paralel doğrultuda yayılması D-B (Doğu-Batı) ile sembolize edilmiştir. Grafiklerde L sembolü ile ölçüm noktalarının hatta olan mesafeleri ifade edilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerini ifade etmek için hat isimleriyle birlikte trenlerin gittiği istikamet belirtilmiştir.

Şekil 3.30.'da titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



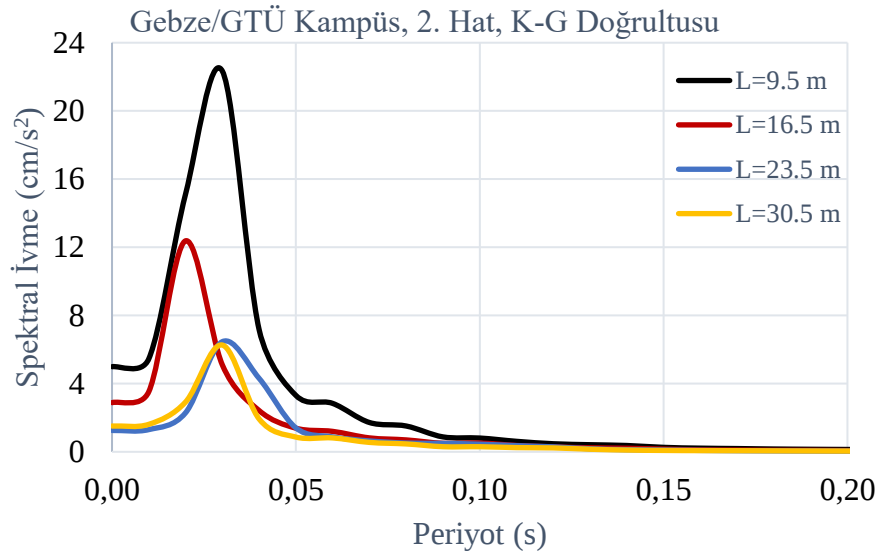
Şekil 3.30. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.31.'de titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



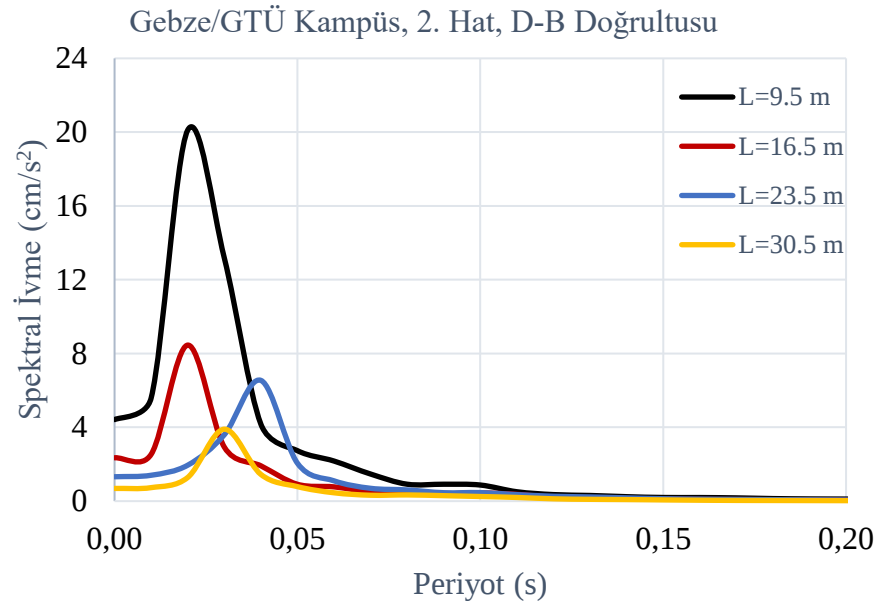
Şekil 3.31. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 1. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.32.'de titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.32. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.33.'te titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen belirlenen noktalarda ölçülen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil 3.33. Gebze/GTÜ Kampüs mevkinde 2. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

YHT hızının azalmasıyla titreşimlerin mesafeye göre dağılımında beklenen sürekli azalış ilişkisi gözlenmiştir. Bu durum yerel zemin koşullarının homojen bir yapıya sahip olabileceğini düşündürmüştür. 1. hat geçişi tren hattına dik (K-G) yayılım doğrultusunda hatta en yakın ölçüm noktası (5 m) ile en uzak ölçüm noktası (26 m) arasındaki fark 17.394 cm/s^2 , hatta paralel doğrultuda bu fark 17.888 cm/s^2 'dir. Benzer şekilde 2. hat geçişinde tren hattına dik (K-G) yayılım doğrultusundaki fark 16.073 cm/s^2 , tren hattına paralel (D-B) yayılım doğrultusundaki fark 16.210 cm/s^2 'dir. Hatta dik doğrultudaki maksimum spektral ivmelerinin meydana geldikleri periyotlar birbirine yakinken, hatta paralel doğrultudaki maksimum spektral ivme periyotlarının değerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Bu durum dalga yayılım karakteristiklerinin dalga yayılım doğrultusuna göre değiştiğini göstermektedir.

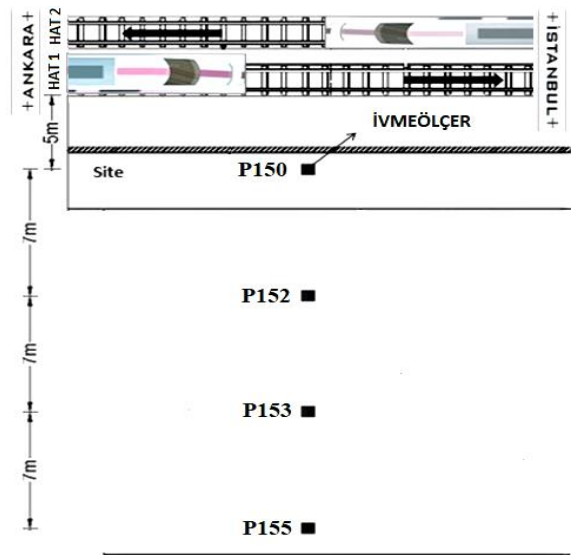
3.1.3. Pamukova/Yenice test alanında yapılan analizler

Pamukova/Yenice test sahasında yapılan bu bölümdeki analizlerde titreşim düzeyinin mesafeye göre değişimi incelenmiştir. İvmeölçerler tren hattına dik (K-G) doğrultuda birinci hattan itibaren 5, 12, 19, 26 m mesafelerdeki ölçüm noktalarına diğer iki test sahasına uygun olarak yerleştirilmiştir. Birinci hat ve ikinci hat arası mesafe 4.5 m'dir. Bu test alanında diğer iki test sahasının aksine birinci hat geçişlerinde Ankara'dan kalkan trenler İstanbul istikametine, ikinci hat geçişlerinde İstanbul'dan kalkan trenler Ankara istikametine gitmektedir. Pamukova/Yenice test sahasında YHD hattının kot seviyesinin yükseltilmesi için tabii zemin üzerine 2.2 m dolgu yapılmıştır. Dolgu içerisine kazık temel uygulaması yapılmıştır. (Şekil 2.12.) YHT'lerin geçiş hızı 250 km/sa'dır.

Titreşim enerjisinin tren hattına dik doğrultuda yayılması K-G (Kuzey-Güney), tren hattına paralel doğrultuda yayılması D-B (Doğu-Batı) ile sembolize edilmiştir. Grafiklerde L sembolü ile ölçüm noktalarının hatta olan mesafeleri ifade edilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerini ifade etmek için hat isimleriyle birlikte trenlerin gittiği istikamet belirtilmiştir. Şekil 3.34.'te ivmeölçerlerin sahadaki konumları, mesafe ve isimleri gösterilmiştir.



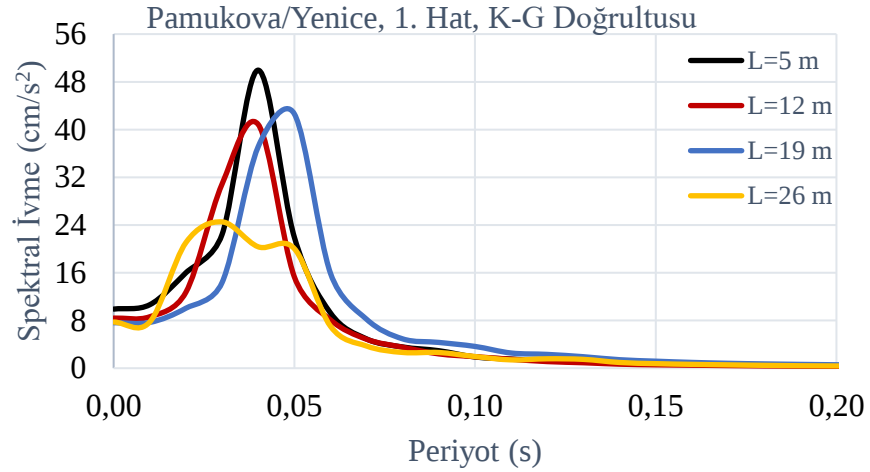
(a)



(b) [47]

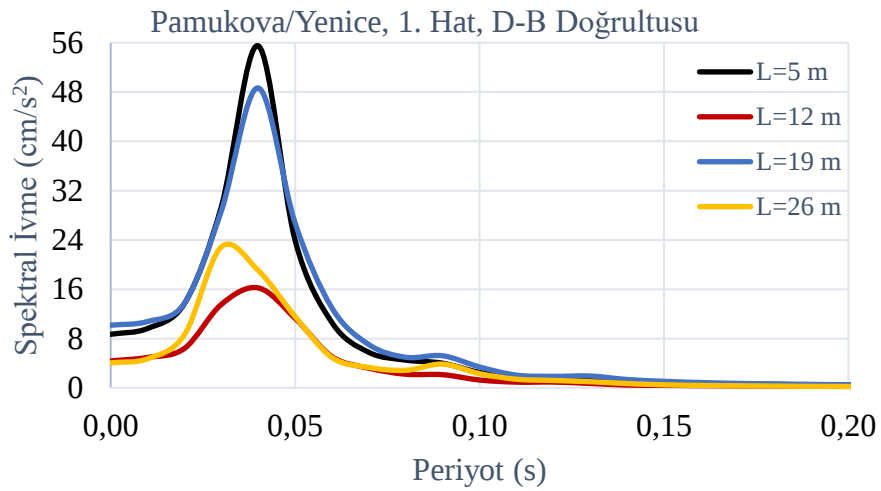
Şekil 3.34. Pamukova/Yenice test sahasında ivmeölçer saha konumları (a), mesafe ve isimleri (b)

Şekil 3.35.'te titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik çalışma sahasında tren hattına belirli mesafelerdeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattın geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



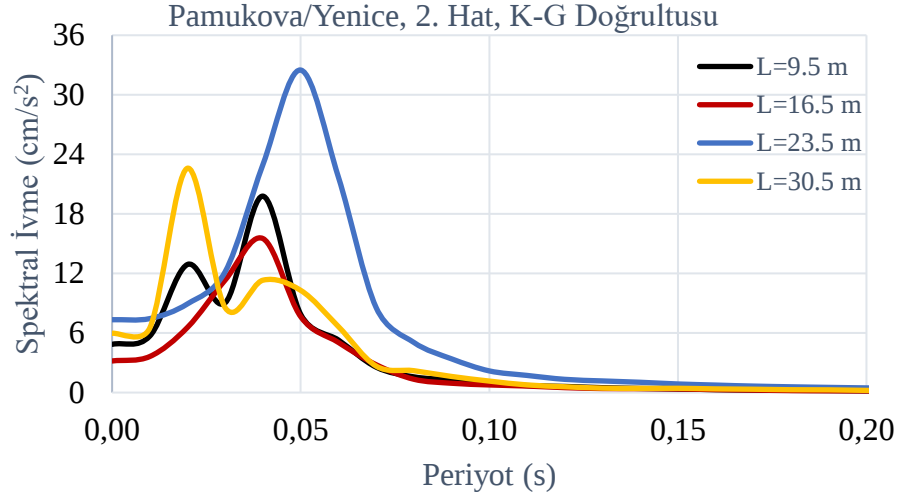
Şekil 3.35. Pamukova/Yenice mevkinde 1. hat (İstanbul) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.36.'da titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik birinci hattın geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



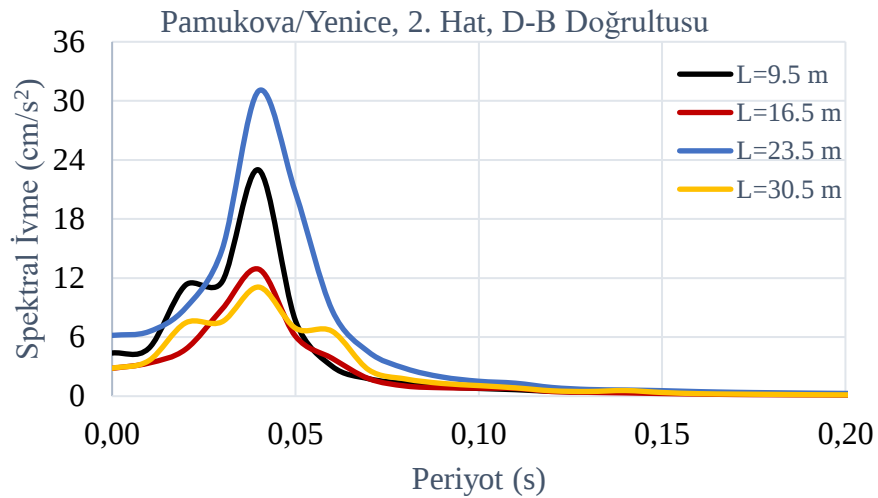
Şekil 3.36. Pamukova/Yenice mevkinde 1. hat (İstanbul) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.37.'de titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini göstermektedir.



Şekil 3.37. Pamukova/Yenice mevkinde 2. hat (Ankara) geçişi için K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.38.'de titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda uzaklığa bağlı olarak spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik ikinci hattan geçen belirlenen noktalarda YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil 3.38. Pamukova/Yenice mevkinde 2. hat (Ankara) geçişi için D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

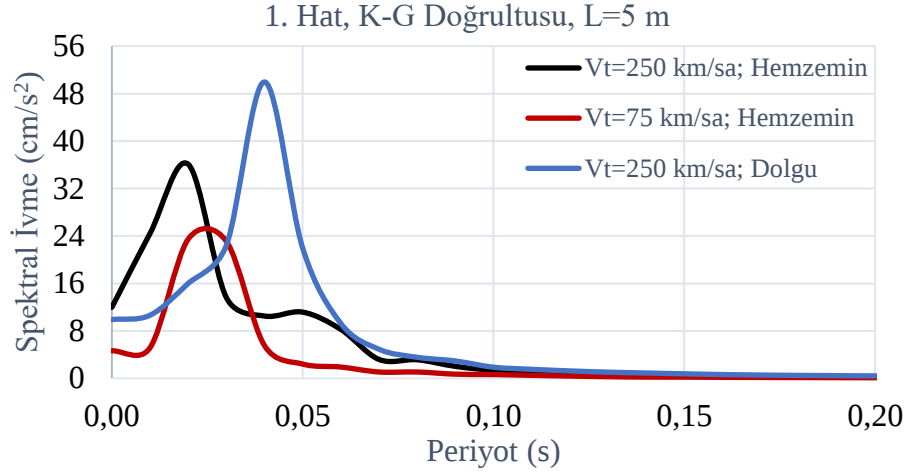
Pamukova/Yenice test sahasından elde edilen sonuçlara göre birinci ve ikinci hat geçişinde mesafeye göre titreşim düzeyi azalım ilişkisi gözlenmemiştir. Birinci hat geçişinden elde edilen sonuçlara göre maksimum spektral ivme değerlerinin oluştuğu periyot değerleri birbirine daha yakındır. İkinci hat geçişinde özellikle hatta dik doğrultuda maksimum spektral ivme oluşum periyotları birbirinden farklıdır. İkinci hattın geçişin meydana getirdiği titreşim seviyesi birinci hatta göre oldukça düşüktür. Bu durum birinci hattın hatta dik doğrultuda dalga yayılım karakteristiğini etkilediğini göstermektedir.

3.2. Farklı Test Sahalarındaki Titreşim Seviyelerinin Karşılaştırmalı Analizi

Bu bölümde Sapanca/Kırkpınar (YHT hızı=250 km/sa) test alanında binanın sol tarafında bulunan doğal zemin bölümü, Gebze/GTÜ Kampüs (YHT hızı=75 km/sa) test alanı ve Pamukova/Yenice (YHT hızı=250 km/sa) test alanından ölçülen verilerle oluşturulan ivme tepki spektrum grafikleri, YHT hattına göre en yakından başlayarak en uzak noktaya doğru birbirleriyle karşılaştırılarak verilmiştir. Sırasıyla birinci tren hattından 5, 12, 19 ve 26 m’de bulunan ivmeölçerlerin verilerinden oluşturulan ivme tepki spektrumları dalga yayılım doğrultularından hatta dik (K-G) ve hatta paralel (D-B) olmak üzere iki doğrultu için gösterilmiştir. Bu bölümde YHT hızı ve YHT hattına yapılan 2.2 m’lik dolgu ve dolgu içine çakılan kazıkların titreşim seviyesine olan etkisi incelenmiştir.

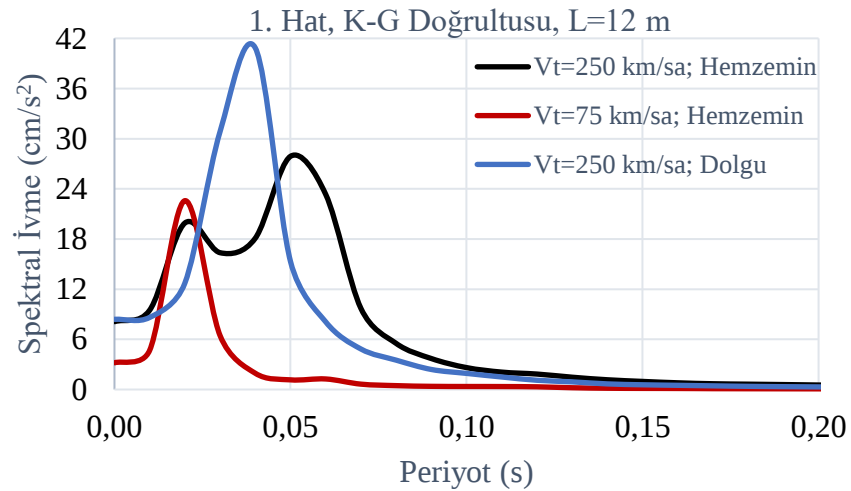
Grafik başlıklarında trenin geçiş yaptığı hat, titreşim enerjisinin yayılma doğrultusu ve ölçüm noktasının hatta olan uzaklığı belirtilmiştir. Titreşim enerjisinin tren hattına dik doğrultuda yayılması K-G (Kuzey-Güney), tren hattına paralel doğrultuda yayılması D-B (Doğu-Batı) ile sembolize edilmiştir. Ayrıca test sahaslarının ayırt edici özelliklerinden tren hızı “ V_t ” (km/sa), hafriyat profillerinden hemzemin profil “Hemzemin”, dolgu profil “Dolgu” biçiminde gösterilmiştir. Şekil isimlerinde tren hat geçişlerini ifade etmek için sadece hat isimleri kullanılmıştır çünkü tren istikametleri test alanlarına (önceki bölümlerde trenlerin hatlardaki istikametleri açıklanmıştır) göre farklılık göstermektedir.

Şekil 3.39.'da test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



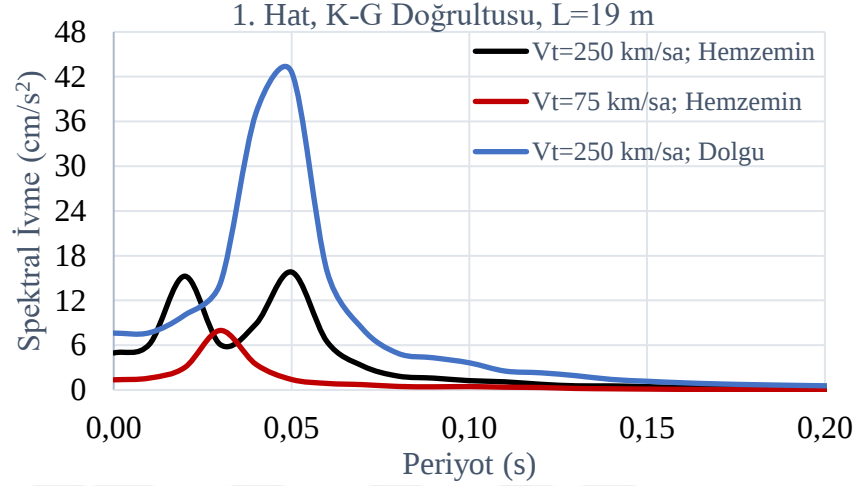
Şekil 3.39. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.40.'ta test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 12 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



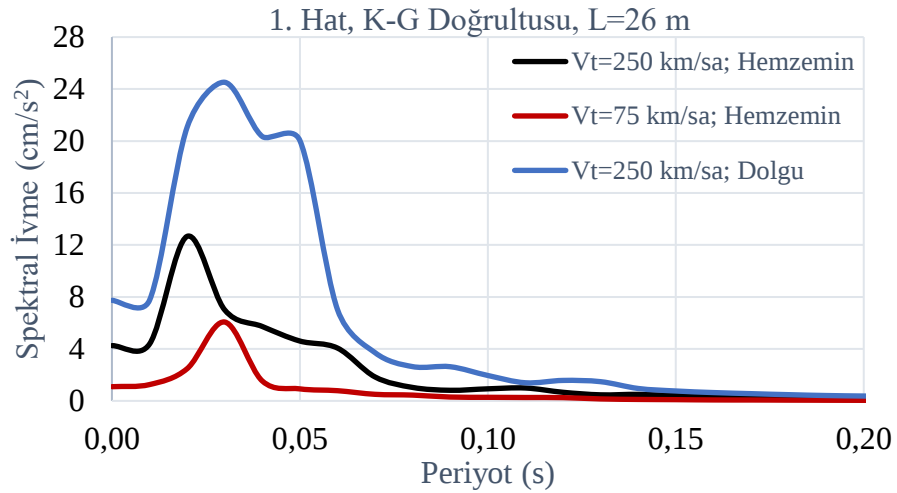
Şekil 3.40. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=12 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.41.'de test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 19 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



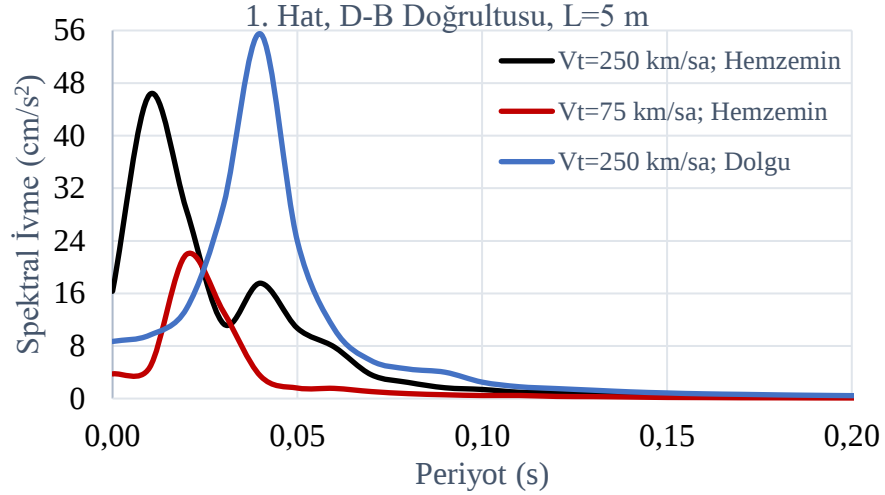
Şekil 3.41. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=19 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.42.'te test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 26 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



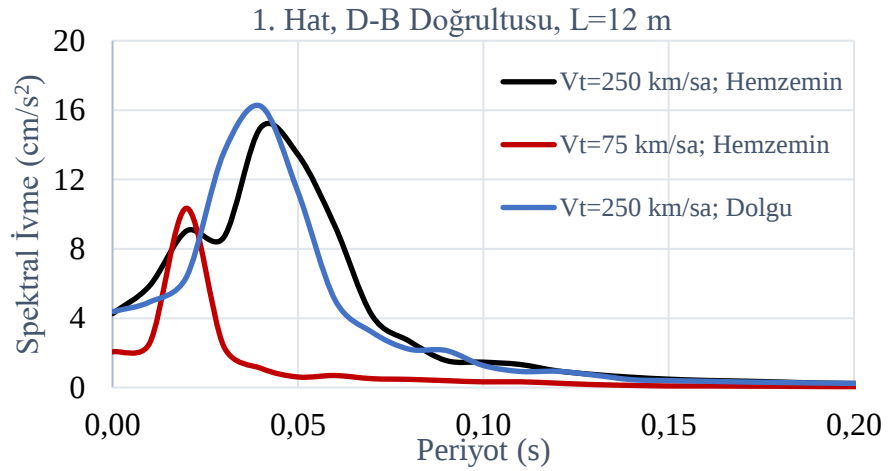
Şekil 3.42. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=26 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.43.'te test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



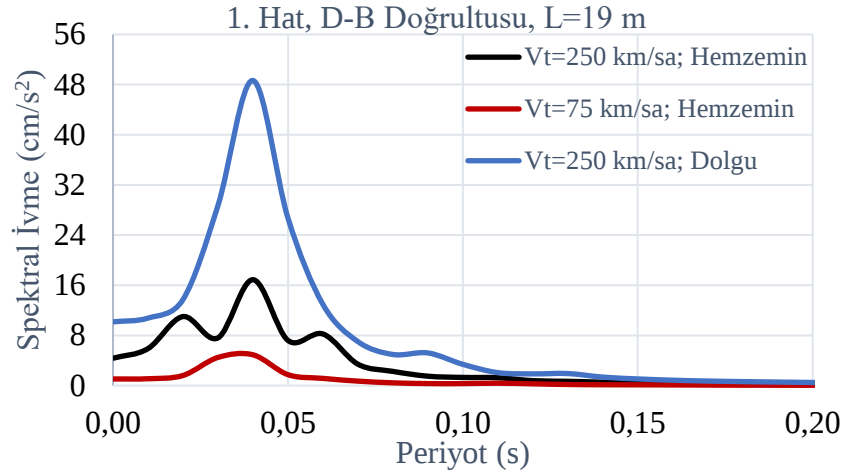
Şekil 3.43. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.44.'te test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 12 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



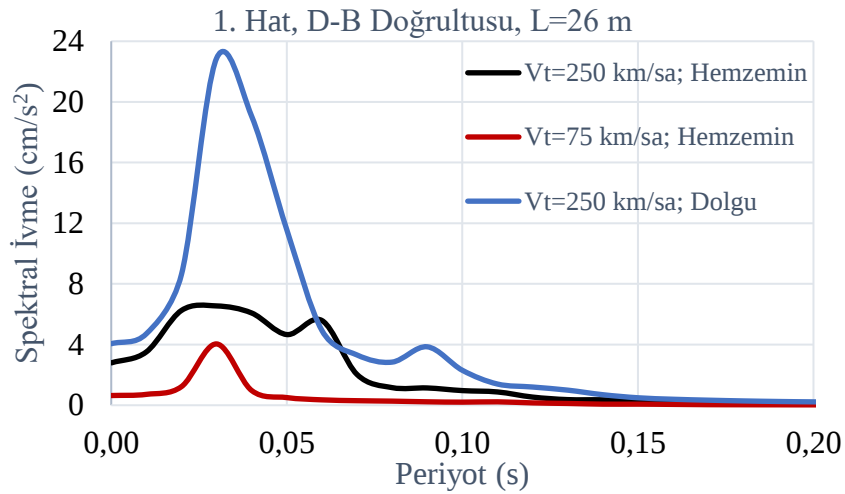
Şekil 3.44. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=12 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.45.'te test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 19 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



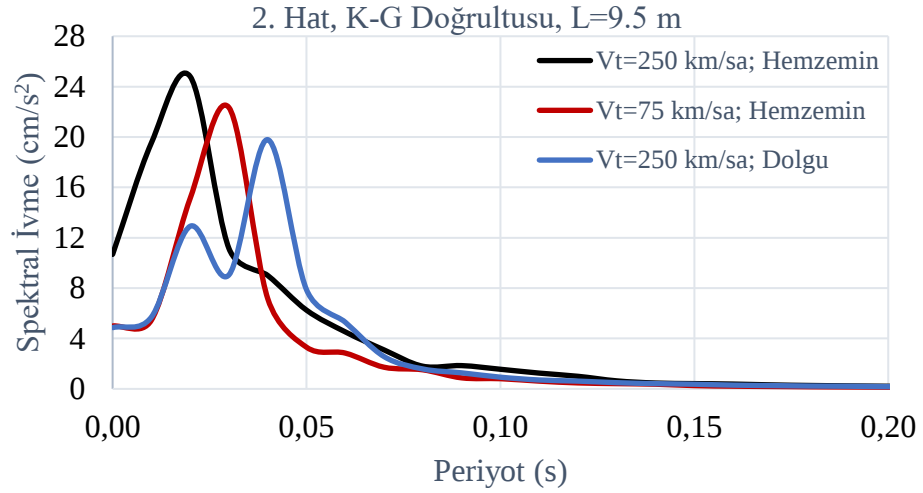
Şekil 3.45. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=19 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.46.'da test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 26 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, birinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



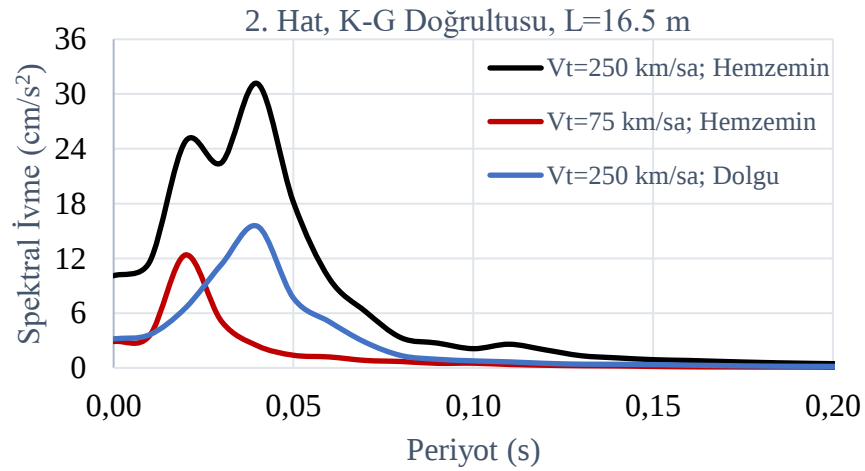
Şekil 3.46. Farklı test sahalarına ait 1. hat geçişi için L=26 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.47.'de test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 9.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



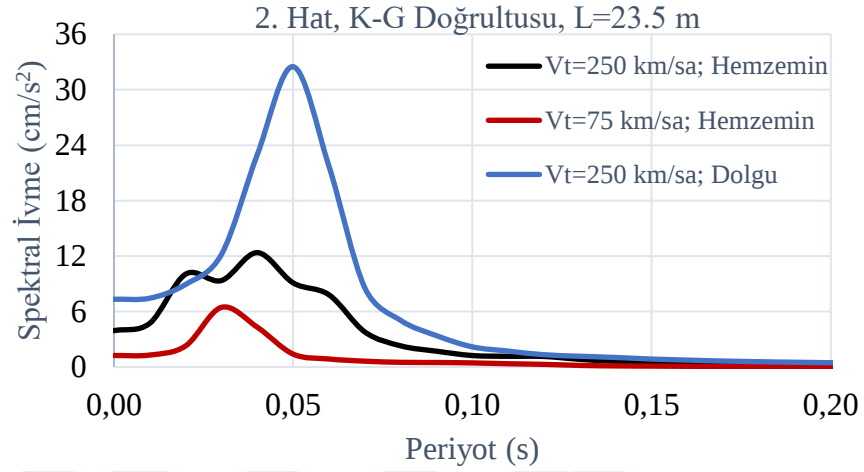
Şekil 3.47. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=9.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.48.'de test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 16.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



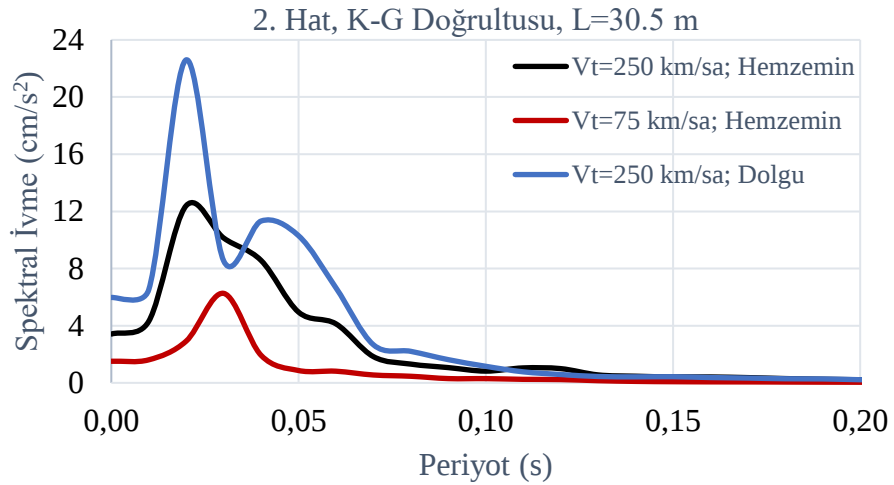
Şekil 3.48. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=16.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.49.'da test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 23.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



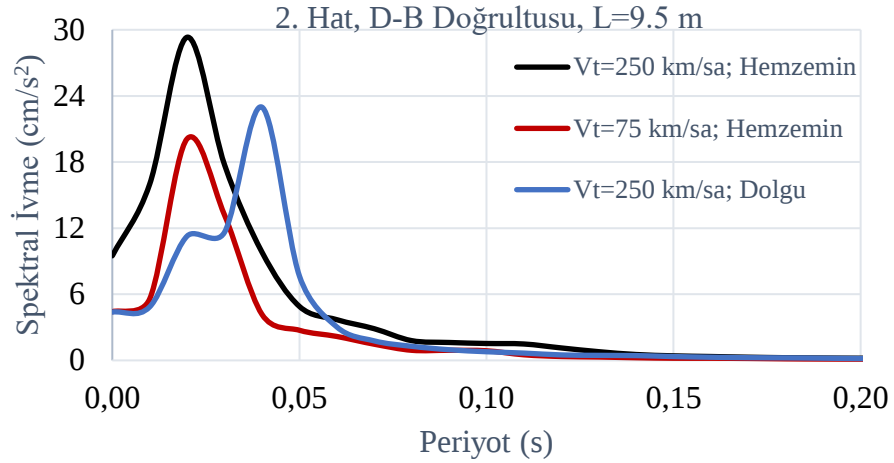
Şekil 3.49. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=23.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.50.'de test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına dik doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 30.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



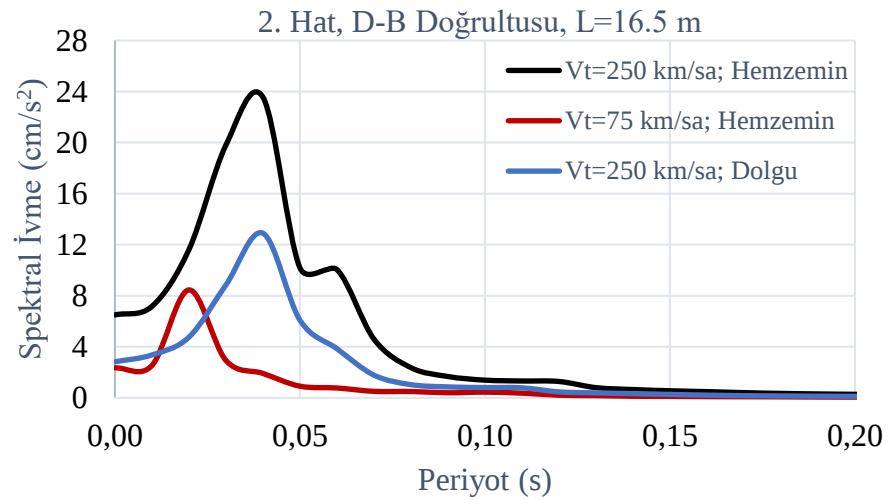
Şekil 3.50. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=30.5 m K-G doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.51.'de test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 9.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



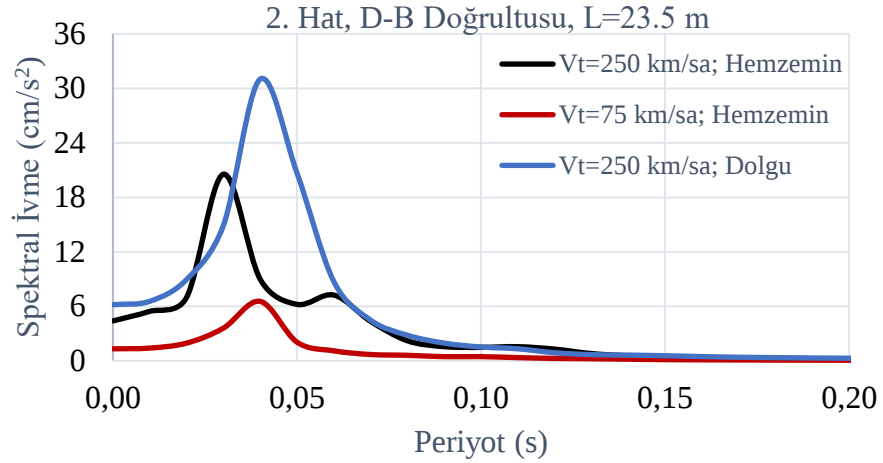
Şekil 3.51. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=9.5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.52.'de test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 16.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



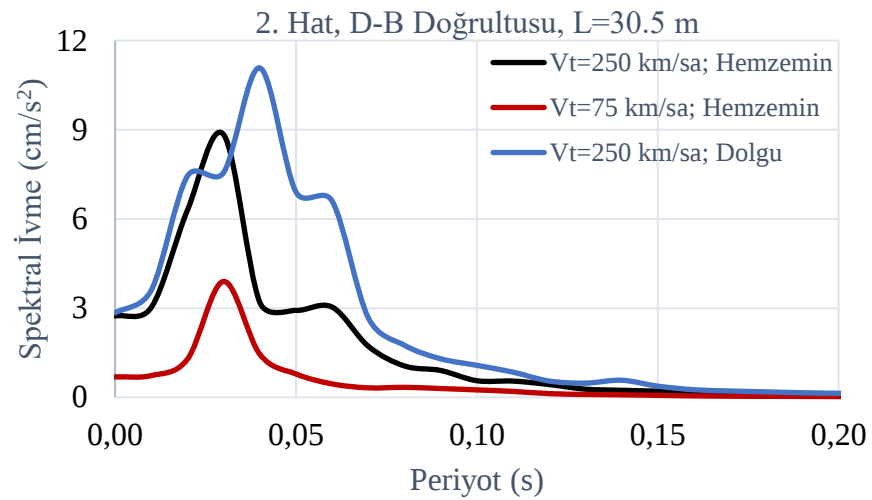
Şekil 3.52. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=16.5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.53.'te test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 23.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil 3.53. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=23.5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 3.54.'te test sahalarına ait titreşim seviyesi tren hattına paralel doğrultuda spektral ivme grafikleriyle gösterilmiştir. Bu grafik üç çalışma sahasında tren hattına 30.5 m mesafedeki ivmeölçerlerle deneysel olarak ölçülen, ikinci hattan geçen YHT'nin oluşturduğu titreşim düzeyini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil 3.54. Farklı test sahalarına ait 2. hat geçişi için L=30.5 m D-B doğrultusunda ivme tepki spektrumlarının karşılaştırılması

Üç test sahasından alınan veriler karşılaştırıldığında genel olarak Pamukova/Yenice test sahasında oluşan titreşim seviyesi Sapanca/Kırkpınar test alanından, Sapanca/Kırkpınar test sahasında oluşan titreşim seviyesi de Gebze/GTÜ Kampüs test alanındakinden fazladır. Birinci hat geçişinde hem hatta dik hem de hatta paralel doğrultuda tren hızının azalması titreşim düzeyini azaltmış, dolgu yüksekliğinin artması titreşim düzeyini artırmıştır. Birinci ve ikinci hat geçişleri için hatta paralel doğrultuda oluşan titreşim seviyeleri karşılaştırıldığında titreşim karakteristikleri -azalım veya artım ilişkisi- birbirine benzer davranmakta ancak hatta dik doğrultuda titreşim karakteristikleri tamamen farklılaşmaktadır. Birinci hat geçişinden kaynaklanan titreşim seviyeleri hem hatta dik hem de hatta paralel doğrultuda ikinci hat geçişinin oluşturduğu titreşim düzeyinden fazladır. Bu durumun oluşmasında titreşim kaynağının ölçüm noktasından uzaklaşmasının, birinci hattın ikinci hatta oluşan titreşimler için yayılma alanını baskılamasının ve yerel zemin koşullarının -ne kadar birbirine benzer alınsa da farklılar gösterebilir- etkili olduğu düşünülmüştür. Ayrıca saha koşullarının titreşim seviyesi ve karakteristiklerini büyük ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

BÖLÜM 4. DÜNYA STANDARTLARINA GÖRE TİTREŞİM VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde dünyada kullanılan bazı yönetmeliklerin uygulama esasları belirtilmiş, daha önceki bölümlerde analizleri yapılan deneysel çalışmalarla elde edilmiş ivme verileri Amerikan (FTA 2006) ve Alman (DIN 4150-2/3) yönetmeliklerinde belirtilen ilkeler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Tablo 4.1.'de dünyada kullanılan bazı yönetmeliklerin uygulama esasları gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Dünyada kullanılan bazı yönetmeliklerin uygulama esasları [68]

	Uluslararası Standartlar ISO 2631-2:2013	Almanya DIN 4150-2:1999	ABD FRA (2005) FTA (2006)	Türkiye Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği
İçerik	Tüm vücut titreşimi: Binalarda sürekli ve şoka neden olan titreşim	Titreşimlerin binalarda insanlara etkileri	Titreşim ve gürültü etkisinin değerlendirilmesi için kılavuz	Gürültü ağırlıklı gürültü ve titreşim kontrol yönetmeliği
Ölçülen Değer	İvme	Hız	Hız	Hız
Hesap Yöntemi	Ağırlıklı ortalama ivme değeri, RMS Maks. transfer titreşim değeri, MTTV Titreşim doz değeri, VDV En yüksek amplitüd yönünde (genellikle aralığın ortasında)	Maksimum ağırlıklı titreşim mukavemeti KBfmax Eşdeğer titreşim kuvveti KBfTr	Maksimum RMS hız değeri	Hız ve RMS hızı
Ölçüm Yeri		Üç yönde (x, y, z) en yüksek amplitüdün görülebildiği katta	Genlik en yüksek yerde (genellikle aralığın ortasında)	Bina ve zemin

Türkiye’de YHT titreşimlerinin kriterlerini belirten bir yönetmelik bulunmamaktadır. Türkiye’de bulunan “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” sesler ve ses kaynaklı gürültünün kriterleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Titreşim değerlendirmeleri, YHT'lerin birinci hattan geçişi esnasında oluşturdukları titreşim etkileri için yapılmıştır. Bunun nedeni birinci hat geçişlerinden kaynaklanan titreşim seviyesinin ikinci hat geçişlerinin meydana getirdiği titreşim seviyesinden fazla olmasıdır, böylece en olumsuz durumlar değerlendirilerek YHT titreşimlerinin istenmeyen sonuçlar oluşturabileceği gösterilmiş ve titreşim kontrolünün gerekliliği ortaya konulmuştur. Değerlendirmeler titreşim enerjisinin dalga yayılım doğrultusuna göre hatta dik ve hatta paralel olmak üzere iki doğrultu için yapılmıştır. Yönetmelikler yapı içinden alınan titreşim verilerini değerlendirmektedir bu yüzden sadece Sapanca/Kırkpınar test alanındaki yapıda bulunan ivmeölçer (BH153) verileri değerlendirmeye uygundur. Diğer tüm titreşim değerlendirmeleri, kayıtların yapı içinde olduğu varsayılarak yapılmış olup BH153 (bina içinde bulunan BH153 ivmeölçerinin birinci hatta uzaklığı 19 m'dir.) ivmeölçer verilerinin titreşim değerlendirmeleri ile karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla tren hattına 19 m mesafede bulunan ivmeölçerlerden alınan veriler için yapılmıştır.

4.1. Amerikan Yönetmeliği Uygulama Adımları (FTA 2006-Federal Transit Administration Report)

FTA titreşim seviyelerini yapısal hasar ve insan algısı olmak üzere iki açıdan değerlendirmektedir. Test sahasından deneysel olarak alınan titreşime ait ivme kayıtları yönetmelikte verilen ilkeler doğrultusunda önce hız, daha sonra RMS (Root Mean Square) ve son olarak desibel birimine dönüştürülerek elde edilen sonuçlar yönetmelikte verilen ilgili tablolarla karşılaştırılmıştır. Yönetmeliğin YHT'lerin bulunduğu tüm hat boyunca uygulanmasının gerekli olmadığı ve bazı durumlarda tamamen göz ardı edilebileceği belirtilmiştir. (Örneğin, çok az trafik olan veya kısa trenler bulunan demiryolları)

RMS parametresi, aşağıda verilen denklem 4.1 ile hesaplanmıştır [69].

$$RMS = \sqrt{\frac{V^2}{2}} \quad (4.1)$$

Burada V ivme verisinden elde edilmiş hızı ifade etmektedir.

Eşik titreşim seviyeleri ile karşılaştırılacak L_v parametresi denklem 4.2'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Burada V_w maksimum RMS genliğini ve V_{ref} referans değeri ifade etmektedir. ($V_{ref}=10^{-6}$ in/s the USA, $V_{ref}=2.54 \times 10^{-8}$ m/s uluslararası)

4.1.1.FTA'da insan sağlığı ve konforu bakımından değerlendirme

FTA'ya göre insan sağlığı ve konforu bakımından yapılacak değerlendirme için Denklem 4.2'den elde edilen sonuçlar Tablo 4.2.'de verilen eşik değerlerle karşılaştırılır.

Tablo 4.2. İnsan algısı bakımından FTA'daki eşik titreşim hız seviyeleri [19]

Titreşim Hız Seviyesi	İnsan Tepkisi
65 VdB	Birçok insan için algı eşiğidir. Düşük frekanslı ses genellikle duyulmaz. Orta frekanslı ses: sessiz uyku alanları için aşırıdır.
75 VdB	Zar zor algılanabilir ve açıkça algılanabilir seviyeleri arasındaki ayrım çizgisini ifade eder. Birçok insan bu seviyedeki transit titreşimi rahatsız edici bulur. Düşük frekanslı gürültü: uyku alanları için tolere edilebilir. Orta frekanslı gürültü: çoğu sessiz yerleşim bölgesinde aşırıdır.
85 VdB	Bu titreşim seviyesi, seyrek meydana gelen titreşimler için tolere edilebilir. Düşük frekanslı gürültü: uyku alanları için aşırıdır. Orta frekanslı gürültü: bazı faaliyet türlerinde seyrek olaylar için bile aşırıdır.

4.1.2.FTA'da yapısal hasar bakımından değerlendirme

FTA'ya göre yapısal hasar bakımından yapılacak değerlendirmede, Denklem 4.2'den elde edilen sonuçlar Tablo 4.3.'te verilen eşik değerlerle karşılaştırılır ve titreşim düzeyi yorumlanır.

Tablo 4.3. Yapısal hasar bakımından FTA'daki eşik titreşim hız seviyeleri [19]

Zemin Kaynaklı Titreşimler için Genel Değerlendirme Kriterleri			
Arazi Kullanım Kategorisi	Zemin Kaynaklı Titreşim Etki Seviyeleri (VdB 1 mikro-inç/s)		
	Sık Olaylar ¹	Ara Sıra Olaylar ²	Seyrek Olaylar ³
<i>Kategori 1:</i> Titreşimin iç operasyonlara müdahale edeceği binalar.	65 VdB ⁴	65 VdB ⁴	65 VdB ⁴
<i>Kategori 2:</i> İnsanların normalde uyuduğu konutlar ve binalar.	72 VdB	75 VdB	80 VdB
<i>Kategori 3:</i> Gündüz kullanılan kurumsal araziler	75 VdB	78 VdB	83 VdB
<i>Notlar:</i> 1. "Sık Olaylar", aynı kaynaktan günde 70'den fazla titreşim olayı olarak tanımlanır. Çoğu hızlı geçiş projesi bu kategoriye girer. 2. "Ara sıra Olaylar", aynı kaynaktan günde 30 ila 70 titreşim olayı olarak tanımlanır. Çoğu banliyö ana hattı bu kadar çok operasyona sahiptir. 3. "Seyrek Olaylar", günde aynı türden 30'dan az titreşim olayı olarak tanımlanır. Bu kategori, çoğu banliyö demiryolu şube hattını içerir. 4. Bu kriter limiti, optik mikroskoplar gibi orta derecede hassas ekipmanların çoğu için kabul edilebilir seviyelere dayanmaktadır. Titreşime duyarlı üretim veya araştırmada, kabul edilebilir titreşim seviyelerini tanımlamak için ayrıntılı değerlendirme gerektirecektir. Bir binada daha düşük titreşim seviyelerinin sağlanması genellikle HVAC sistemlerinin ve sertleştirilmiş zeminlerin özel tasarımını gerektirir. 5. Titreşime duyarlı ekipman genellikle zeminden kaynaklanan gürültüye duyarlı değildir.			

4.2. Alman Yönetmelikleri Uygulama Adımları (DIN 4150-2/3)

Alman yönetmelikleri, titreşim düzeyini yapısal hasar ve insan algısı olmak üzere iki açıdan değerlendirmektedir. Yönetmelikler, zemin kaynaklı titreşimlerden dolayı izin verilen tepkiyi maksimum parçacık hızları (PPV) ile tanımlamaktadır. Değerlendirmeleri yapabilmek amacıyla deneysel olarak ölçülen titreşimlerin ivme kayıtlarından hız zaman grafikleri ve titreşimlerin frekans içerikleri oluşturulmuştur.

4.2.1. DIN 4150-2’de insan sağlığı ve konforu bakımından değerlendirme

DIN 4150-2’ye göre insan sağlığı ve konforu bakımından yapılacak değerlendirme için hız zaman grafiklerinden elde edilen maksimum hız (PPV) değerleri Tablo 4.4.’te verilen eşik değerlerle karşılaştırılır.

Tablo 4.4. İnsan algısı bakımından DIN 4150-2’deki eşik titreşim hız seviyeleri [70,71]

Yaklaşık Titreşim Seviyesi	Algı Derecesi
0,1 mm/s	Hissedilmez
0,15 mm/s	Algı eşiği
0,35 mm/s	Zor fark edilir
1,0 mm/s	Fark edilebilir
2,2 mm/s	Kolayca fark edilir
6 mm/s	Kesinlikle fark edilir
14 mm/s	çok güçlü bir şekilde fark edilir

4.2.2. DIN 4150-3’te yapısal hasar bakımından değerlendirme

DIN 4150-3’e göre yapısal hasar bakımından değerlendirme için, maksimum hız (PPV) değerleri ve titreşimlerin baskın frekans içerikleri tespit edilerek Tablo 4.5.’te verilen eşik değerlerle karşılaştırılır ve titreşim düzeyi yorumlanır.

Tablo 4.5. Yapısal hasar bakımından DIN 4150-3’teki eşik titreşim hız seviyeleri [72]

Yapı Tipi	Yapısal Hasar İçin Titreşim Kriteri, PPV (mm/s)				
	Kısa-Dönem			Uzun-Dönem	
	Temelde			En st Kat	En st Kat
	0 - 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100 Hz	Tüm Frekanslar	Tüm Frekanslar
Ticari /Endüstriyel	20	20 - 40	40 - 50	40	10
Konut	5	5 - 15	15 - 20	15	5
Hassas/Tarihi	3	3 - 8	8 - 10	8	2.5

4.3. Sapanca/Kırkpınar Test Sahasında Yapılan Titreşim Değerlendirmeleri

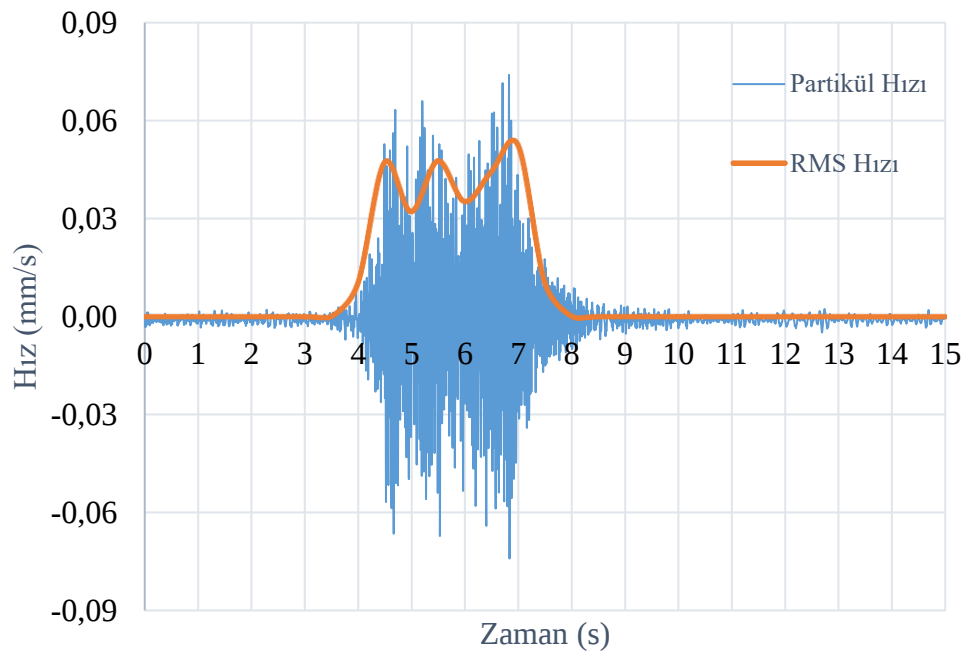
Sapanca/Kırkpınar test alanında bina içi ve binanın sol tarafındaki doğal zemin bölgesi için hem Amerikan (FTA) yönetmeliği hem de Alman (DIN 4150-2/3) yönetmeliğine göre değerlendirmeler yapılmıştır.

4.3.1. Bina içi titreşim değerlendirmeleri

Bina içi titreşimler, temel üzerinde bulunan BH153 (zemin kat) ivmeölçerinden elde edilen veriler kullanılarak birinci hattan (Ankara) geçen YHT için tren hattına dik (K-G) ve paralel (D-B) doğrultuda yapılmıştır.

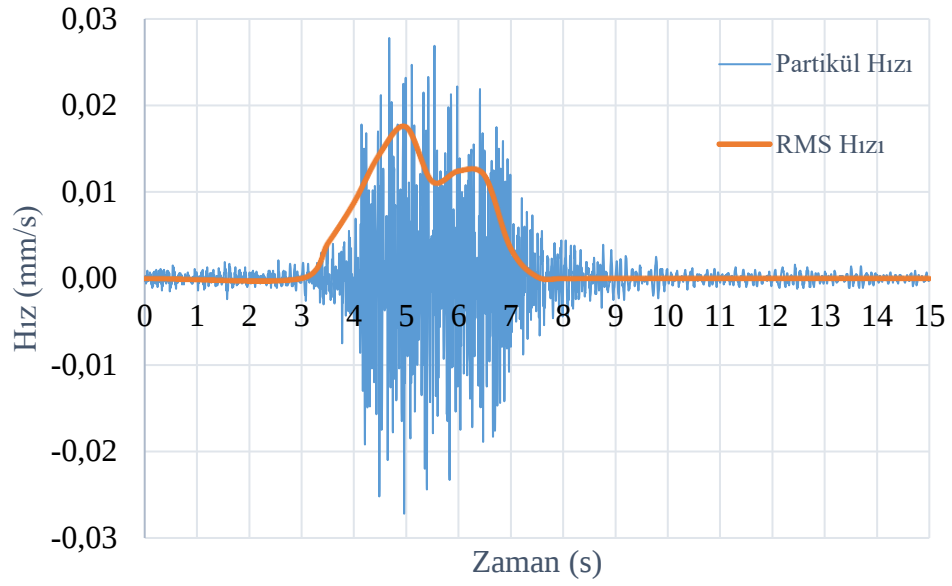
4.3.1.1. Amerikan yönetmeliği (FTA) titreşim değerlendirmeleri

RMS değerleri hız zaman grafiğiyle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1. (a)'da YHT hattına dik, Şekil 4.1. (b)'de hatta paralel doğrultuda gösterilmiştir [73].



(a) K-G Doğrultusu

Şekil 4.1. RMS değerlerinin grafiksel gösterimi ve hız zaman grafiğiyle karşılaştırılması (BH153)



(b) D-B Doğrultusu
Şekil 4.1 (Devamı)

Tablo 4.6.'da titreşim düzeyi değerlendirmelerinde kullanılacak FTA'da yapılan tanımlamalara göre dönüştürülmüş ölçüm sonuçlarının maksimum değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.6. FTA'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (BH153)

Cihaz No	Maks RMS (mm/s)		Maks Hız (mm/s)		Maks Lv (VdB)	
	H. Paralel	H. Dik	H. Paralel	H. Dik	H. Paralel	H. Dik
BH153	0,019	0,052	0,027	0,074	57,773	66,289

Tablo 4.6.'da belirtilen deneysel ölçümlerden elde edilen titreşim parametreleri, Tablo 4.2. ve Tablo 4.3'te gösterilen FTA kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Tren hattına dik doğrultuda oluşan titreşim düzeyinin, insan sağlığı ve konforu açısından birçok insanın algılayabileceği seviye olduğu ve uyku alanları için 1.289 VdB fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu değer oransal olarak yaklaşık %2'ye karşılık gelmektedir. Deney sahasında bulunan bina, otel olarak kullanılmaktadır, bina içi operasyonlar (mutfak vb.) düşünüldüğünde bu titreşim seviyesinin bina için fazla olduğu düşünülmüştür. Tren hattına paralel doğrultuda oluşan titreşim düzeyi insan sağlığı ve konforu açısından eşik değerlerin altındadır.

Yapısal bakımdan değerlendirmede günlük ortalama meydana gelen titreşim sayısı bilinmelidir. Ölçüm sahalarında günlük maksimum 26 (bu değer deneylerin yapıldığı dönem için geçerlidir, TCDD yolcu talep ve iklim şartlarına göre sefer sayısını değiştirebilmektedir ve YHD ağının genişlemesi titreşim olay sayısını artırmaktadır.) YHT geçişi olmaktadır ve bu durum seyrek olay olarak tanımlanmaktadır. Yapısal hasar bakımından tren hattına dik doğrultuda oluşan titreşim düzeyi, kategori 1’de belirtilen, hassas binalar (titreşim istenmeyen) için uygun değildir. Tren hattına paralel doğrultuda oluşan titreşim seviyesi yönetmeliğin eşik değerlerinin altında kalmaktadır.

4.3.1.2. Alman yönetmeliği (DIN 4150-2/3) titreşim değerlendirmeleri

Bina içi titreşimleri için temel üzerinde bulunan BH153 ivmeölçerinden alınan verilerden elde edilen hız değerleri Tablo 4.7.’de gösterilmiştir.

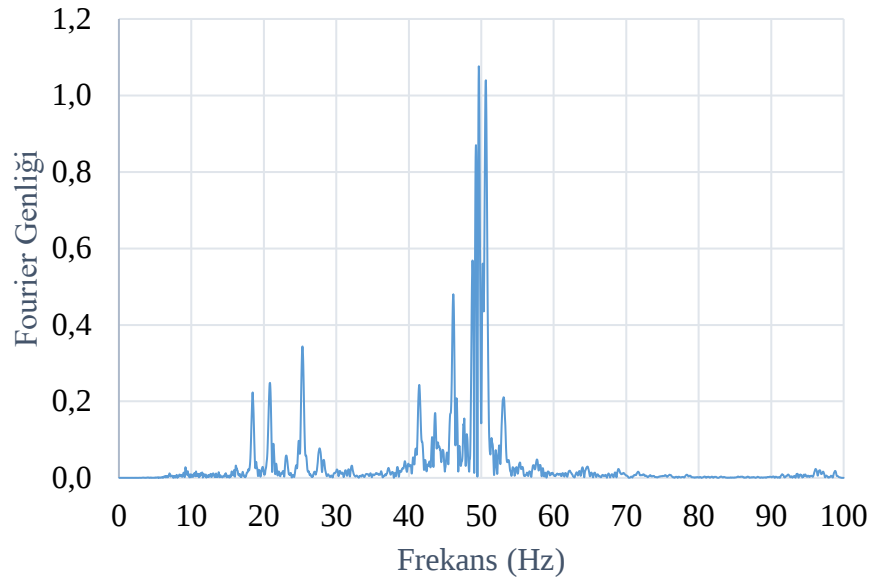
Tablo 4.7. DIN 4150-2/3’te tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (BH153)

Cihaz No	Maks Hız (mm/s)	
	H. Paralel	H. Dik
BH153	0,027	0,074

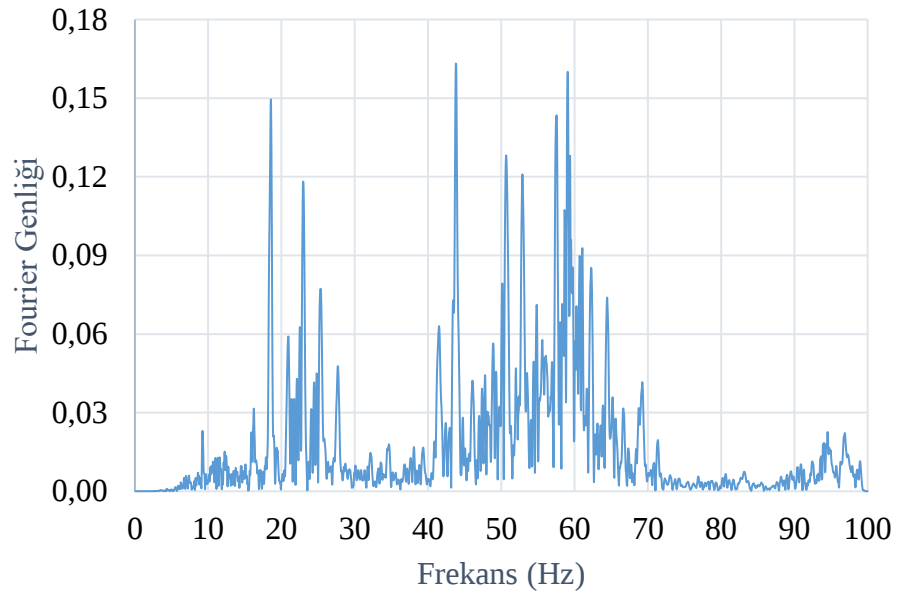
Tablo 4.7.’de belirtilen deneysel ölçümlerden elde edilen titreşim parametreleri, insan sağlığı ve konforu bakımından değerlendirme için Tablo 4.4.’te gösterilen DIN 4150-2 kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar, insan sağlığı ve konforu bakımından hem hatta dik hem de hatta paralel doğrultuda yönetmelikte verilen eşik değerlerin altında kalmıştır. Titreşim düzeyi DIN 4150-2’ye göre insan sağlığı ve konforu bakımından uygundur.

Yapısal hasar bakımından yapılacak değerlendirmede titreşimlerin hız değerleri Tablo 4.7.’de belirtilmiştir, frekans içerikleri ise Şekil 4.2. (a)’da tren hattına dik, Şekil 4.2. (b)’de hatta paralel durum için gösterilmiştir [74].



(a) K-G Doğrultusu



(b) D-B Doğrultusu

Şekil 4.2. BH153 ivmeölçer verisinden oluşturulan Fourier genlik spektrumları

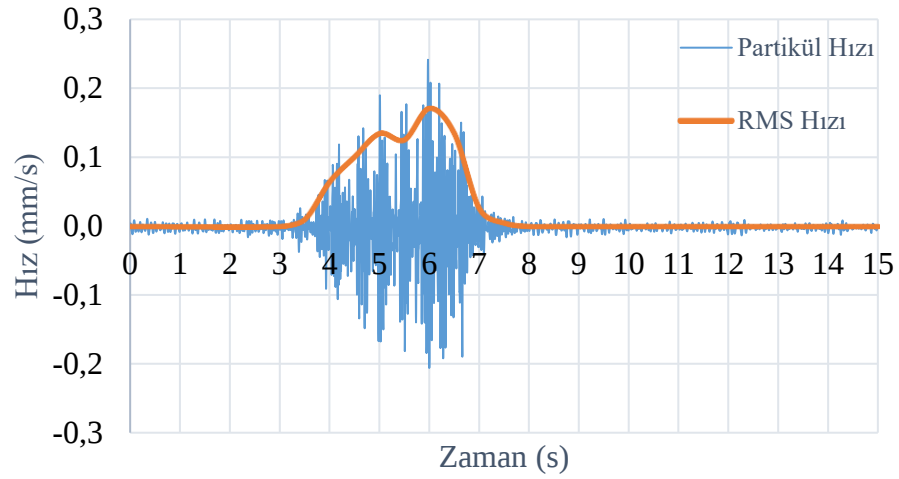
Bina temelinde yapılan ölçümlerde tren hattına dik doğrultuda Şekil 4.2. (a)'da baskın frekansın 50 Hz, hatta paralel doğrultuda Şekil 4.2. (b)'de baskın frekansın 42 Hz olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.2. ve Tablo 4.7.'de elde edilen sonuçlar yapısal hasar bakımından birlikte kullanılarak yönetmelikteki eşik değerler (Tablo 4.5.) ile karşılaştırıldığında titreşim seviyesinin bütün yapılar için kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

4.3.2. Doğal zemin bölümü titreşim değerlendirmeleri

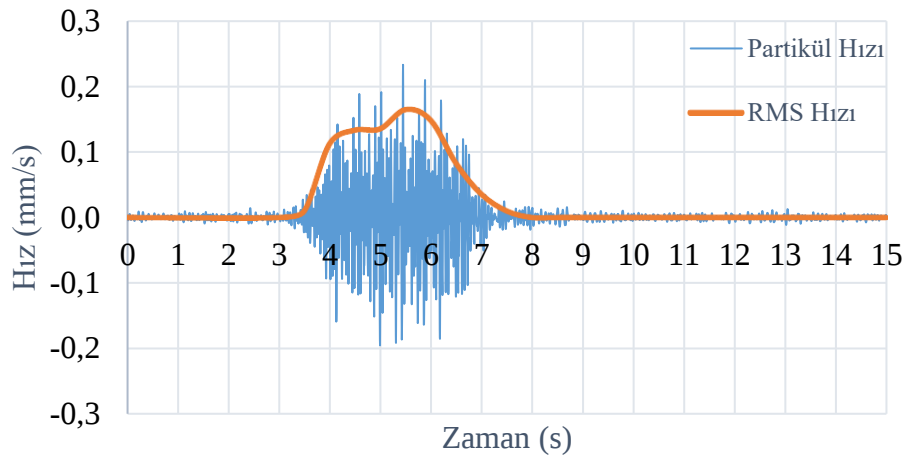
Doğal zemin bölümü titreşimleri, SZ171 ivmeölçerinin serbest zemin kayıtlarından elde edilen veriler kullanılarak birinci hattan (Ankara) geçen YHT için tren hattına dik (K-G) ve paralel (D-B) doğrultuda yapılmıştır.

4.3.2.1. Amerikan yönetmeliği (FTA) titreşim değerlendirmeleri

RMS değerleri hız zaman grafiğiyle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.3. (a)'da YHT hattına dik, Şekil 4.3. (b)'de hatta paralel doğrultuda gösterilmiştir.



(a) K-G Doğrultusu



(b) D-B Doğrultusu

Şekil 4.3. RMS değerlerinin grafiksel gösterimi ve hız zaman grafiğiyle karşılaştırılması (SZ171)

Tablo 4.8.'de titreşim düzeyi değerlendirmelerinde kullanılacak FTA'da yapılan tanımlamalara göre dönüştürülmüş ölçüm sonuçlarının maksimum değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.8. FTA'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (SZ171)

Cihaz No	Maks RMS (mm/s)		Maks Hız (mm/s)		Maks Lv (VdB)	
	H. Paralel	H. Dik	H. Paralel	H. Dik	H. Paralel	H. Dik
SZ171	0,165	0,170	0,233	0,241	76,255	76,544

Tablo 4.8.'de belirtilen deneysel ölçümlerden elde edilen titreşim parametreleri, Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'te gösterilen FTA kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Tren hattına dik ve paralel doğrultuda oluşan titreşim düzeyinin, insan sağlığı ve konforu açısından birçok insan için can sıkıcı seviyede olduğu tespit edilmiştir. İnsanlar için konfor bozucu olarak değerlendirilebilir. Titreşim seviyesi hatta dik ve paralel doğrultuda algı seviyesinden oransal olarak yaklaşık %18 can sıkıcı seviyeden yaklaşık %2 oranında yüksektir.

Yapısal hasar bakımından tren hattına dik ve paralel doğrultuda oluşan titreşim düzeyi, kategori 1 ve 2'de belirtilen, binalar için uygun değildir. Titreşim seviyesi kategori 1 seviyesini yaklaşık %18, kategori 2 seviyesini yaklaşık %7 oranında aşmıştır.

4.3.2.2. Alman yönetmeliği (DIN 4150-2/3) titreşim değerlendirmeleri

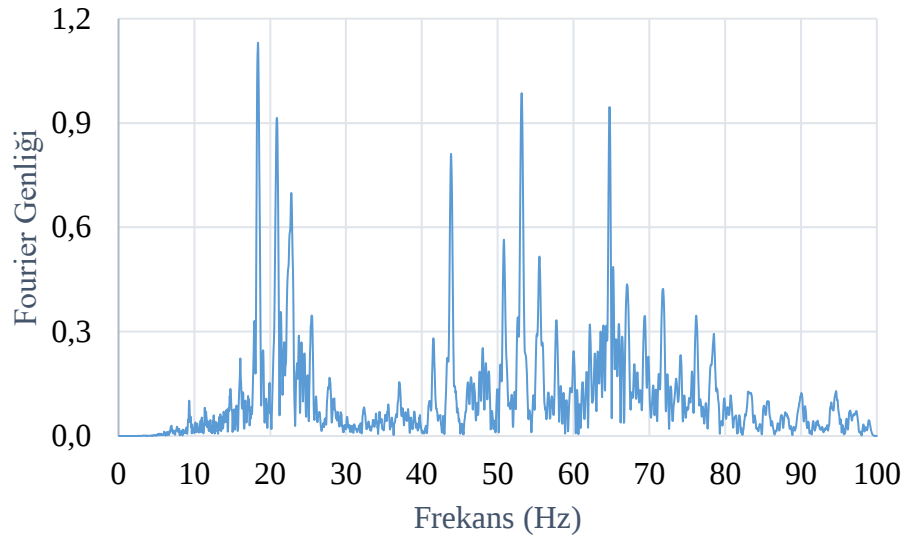
Doğal zemin titreşimleri için SZ171 ivmeölçerinin serbest zemin kayıtlarından alınan verilerden elde edilen hız değerleri Tablo 4.9.'da gösterilmiştir.

Tablo 4.9. DIN 4150-2/3'te tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (SZ171)

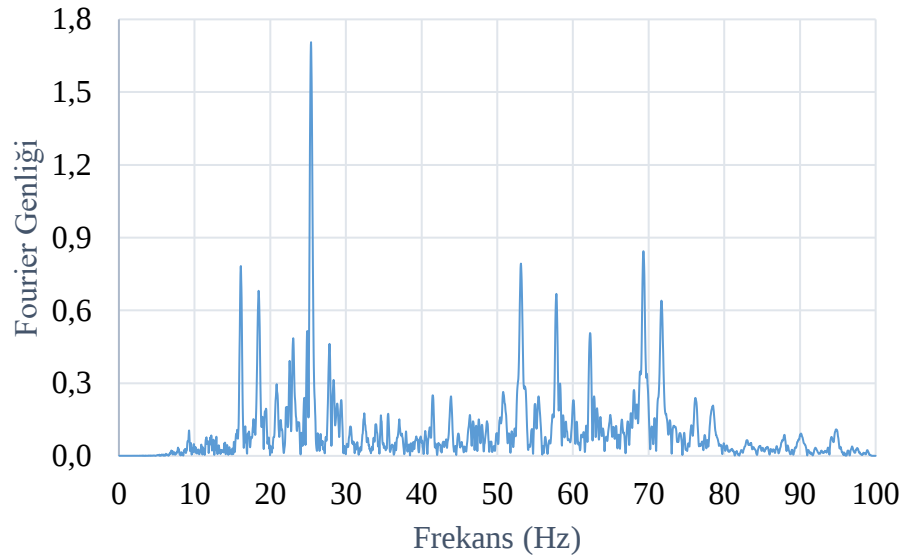
Cihaz No	Maks Hız (mm/s)	
	H. Paralel	H. Dik
SZ171	0,233400	0,241300

Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar, insan sağlığı ve konforu bakımından hem hatta dik hem de hatta paralel doğrultuda yönetmeliğe göre insanlar tarafından algılanabilir seviyededir.

Yapısal hasar bakımından yapılacak değerlendirmede titreşimlerin frekans içerikleri ise Şekil 4.4. (a)'da tren hattına dik, Şekil 4.4. (b)'de hatta paralel durum için gösterilmiştir.



(a) K-G Doğrultusu



(b) D-B Doğrultusu

Şekil 4.4. SZ171 ivmeölçer verisinden oluşturulan Fourier genlik spektrumları

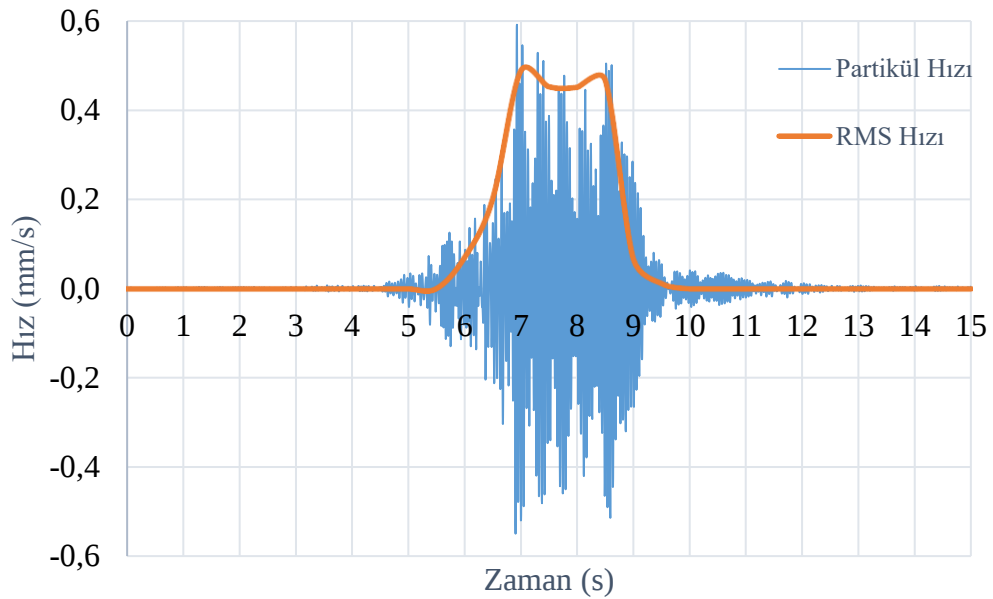
Serbest zeminde yapılan ölçümlerde tren hattına dik doğrultuda Şekil 4.4. (a)'da baskın frekansın 18 Hz, hatta paralel doğrultuda Şekil 4.4. (b)'de baskın frekansın 26 Hz olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.4. ve Tablo 4.9.'da elde edilen sonuçlar yapısal hasar bakımından birlikte kullanılarak yönetmelikteki eşik değerler (Tablo 4.5.) ile karşılaştırıldığında titreşim seviyesinin bütün yapılar için kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

4.4. Pamukova/Yenice Test Sahasında Yapılan Titreşim Değerlendirmeleri

Pamukova/Yenice test alanında, Sapanca/Kırkpınar test sahasında olduğu gibi tren hattına 19 m uzaklıktaki titreşim düzeyi hem Amerikan yönetmeliği (FTA) hem de Alman Yönetmeliğine (DIN 4150-2/3) göre değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler P153 ivmeölçerinden alınan verilerle gerçekleştirilmiştir.

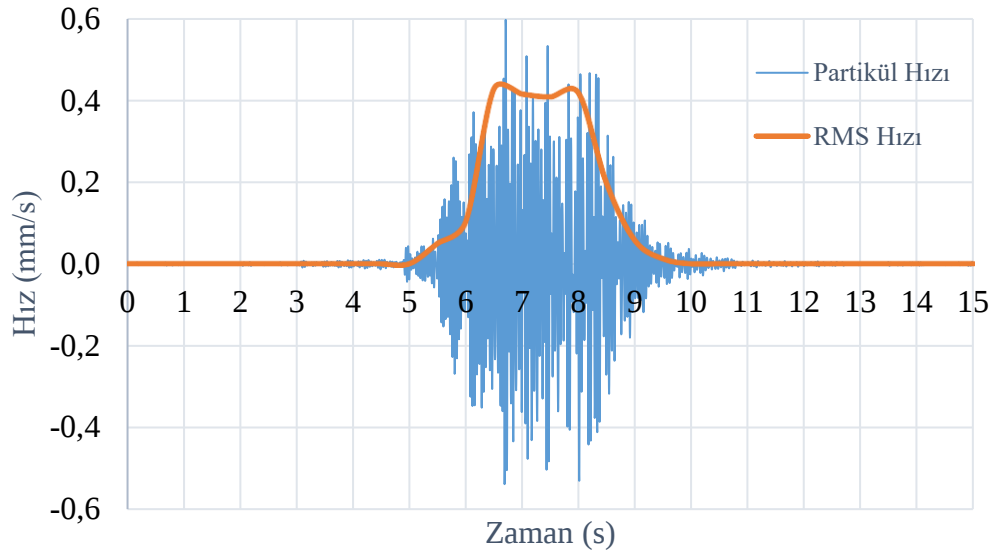
4.4.1. Amerikan yönetmeliği (FTA) titreşim değerlendirmeleri

RMS değerleri hız zaman grafiğiyle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.5. (a)'da YHT hattına dik, Şekil 4.5. (b)'de hatta paralel doğrultuda gösterilmiştir.



(a) K-G Doğrultusu

Şekil 4.5. RMS değerlerinin grafiksel gösterimi ve hız zaman grafiğiyle karşılaştırılması (P153)



(b) D-B Doğrultusu
Şekil 4.5 (Devamı)

Tablo 4.10.'da titreşim düzeyi değerlendirmelerinde kullanılacak FTA'da yapılan tanımlamalara göre dönüştürülmüş ölçüm sonuçlarının maksimum değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4.10. FTA'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (P153)

Cihaz No	Maks RMS (mm/s)		Maks Hız (mm/s)		Maks Lv (VdB)	
	H. Paralel	H. Dik	H. Paralel	H. Dik	H. Paralel	H. Dik
P153	0,422	0,418	0,597	0,591	84,424	84,336

Tablo 4.10.'da belirtilen deneysel ölçümlerden elde edilen titreşim parametreleri, Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'te gösterilen FTA kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Tren hattına dik ve paralel doğrultuda oluşan titreşim düzeyinin, insan sağlığı ve konforu açısından birçok insan için can sıkıcı seviyede olduğu tespit edilmiştir. İnsanlar için konfor bozucu olarak değerlendirilebilir. Bu titreşim seviyesi oransal olarak kriter tablosunda belirtilen algı eşiğinden yaklaşık %30, can sıkıcı seviyeden yaklaşık %13 daha yüksektir. Bir üst kategorik sınıra oldukça yaklaşılmıştır bu titreşim seviyesi Sapanca/Kırkpınar test sahasındaki düzeyden fazladır.

Yapısal hasar bakımından tren hattına dik ve paralel doğrultuda oluşan titreşim düzeyi, tüm kategorilerde belirtilen binalar için uygun değildir. Titreşim düzeyi en yüksek (75 VdB) kriter olan kategori 3'te belirtilen düzeyden yaklaşık %13 daha fazladır.

4.4.2. Alman yönetmeliği (DIN 4150-2/3) titreşim değerlendirmeleri

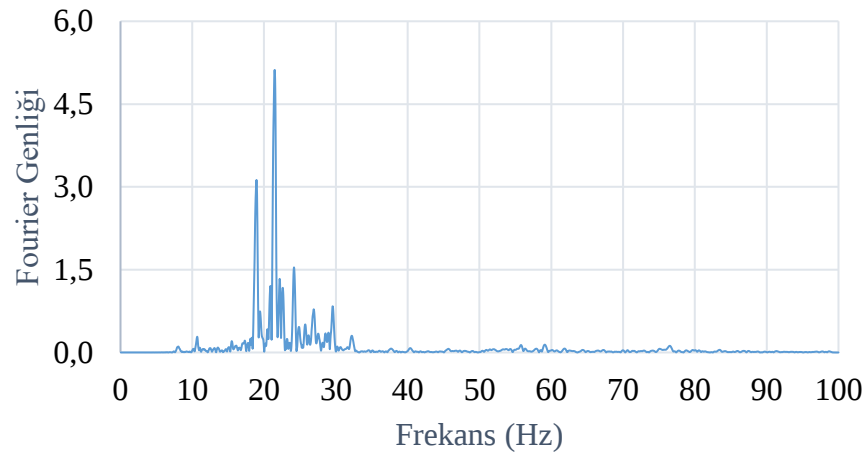
P153 ivmeölçerinden alınan serbest zemin titreşim verilerden elde edilen hız değerleri Tablo 4.11.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11. DIN 4150-2/3'te tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları (P153)

Cihaz No	Maks Hız (mm/s)	
	H. Paralel	H. Dik
P153	0,597	0,591

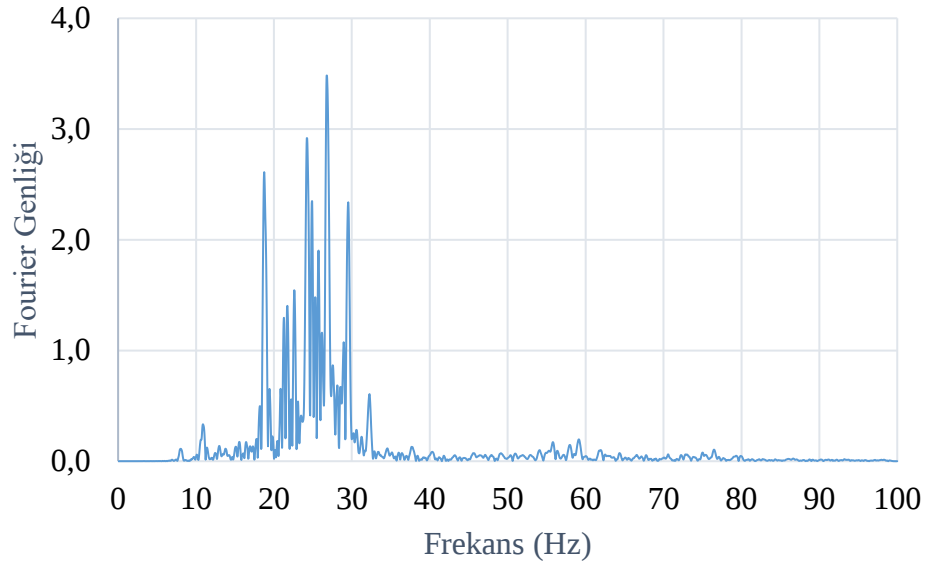
P153 ivmeölçerinden elde edilen sonuçlar, insan sağlığı ve konforu bakımından hem hatta dik hem de hatta paralel doğrultuda yönetmeliğe göre insanlar tarafından Sapanca/Kırkpınar test sahasındaki serbest zemin titreşim seviyesini bir kategori geçerek neredeyse fark edilir olarak tanımlanan seviyeye ulaşmıştır.

Yapısal hasar bakımından değerlendirmede titreşimlerin frekans içerikleri ise Şekil 4.6. (a)'da tren hattına dik, Şekil 4.6. (b)'de hatta paralel durum için gösterilmiştir.



(a) K-G Doğrultusu

Şekil 4.6. P153 ivmeölçer verisinden oluşturulan Fourier genlik spektrumları



(b) D-B Doğrultusu

Şekil 4.6. (Devamı)

Pamukova/Yenice test sahasında yapılan ölçümlerde tren hattına dik doğrultuda Şekil 4.6. (a)'da baskın frekansın 21 Hz, hatta paralel doğrultuda Şekil 4.6. (b)'de baskın frekansın 27 Hz olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.6. ve Tablo 4.11.'de elde edilen sonuçlar yapısal hasar bakımından birlikte kullanılarak yönetmelikteki eşik değerler (Tablo 4.5.) ile karşılaştırıldığında titreşim seviyesinin bütün yapılar için kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, TCDD'nin taşımacılık hizmetleri için kullandığı YHT'lerin rijitliği düşük zeminlerde -alüvyon dolgu zeminler- oluşturduğu titreşimlerin deneysel ölçümü, oluşum mekanizması, zemindeki dalga yayılım özellikleri ve binalarda sebep olduğu olumsuz etkilerin araştırılmasına odaklanmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında tren hattına olan dik uzaklığın, hendek tipi titreşim bariyerinin, yapı-zemin etkileşimi açısından kinematik etkileşimin, farklı tren geçiş hızlarının, farklı hafriyat (hemzemin-dolgu) profillerinin çevresel titreşimler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tren hatlarına yakın alanlarda meydana gelen çevresel titreşimler, (ABD ve Almanya'da kullanılan) titreşimleri insan sağlığı ve konforu ile yapısal hasar bakımından ele alan yönetmeliklerle (FTA, DIN 4150-2/3) değerlendirilmiştir.

YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşim seviyesinde, tren hattından uzaklaştıkça genel olarak azalmalar gözlenmiştir. Tren hattından uzaklaştıkça titreşim düzeyinde sürekli bir azalım ilişkisi beklenmesine rağmen bazı ölçümlerin sürekli azalım ilişkisi göstermediği tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarda oluşan bu farklılıklar yerel zemin koşullarındaki heterojen yapı nedeniyle yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların varlığını düşündürmüştür.

Sapanca/Kırkpınar test sahasında bulunan hendek titreşim seviyesini hem tren hattına dik doğrultuda hem de hatta paralel doğrultuda azaltmaktadır. Hendekli bölüm ile doğal zemin bölümü ivme tepki spektrum eğrileri önemli derecede benzerlik göstermektedir, bu durum hendeğin titreşim seviyesini düşürse de dalga yayılım karakterizasyonunu değiştirmedikçe düşündürmüştür. Doğal zeminde meydana gelen titreşimlerin maksimum spektral ivme oluşum periyotları ile hendekli zeminde oluşum periyotları birbirinden farklıdır.

Zemin ve bina zemin katına konumlandırılan ivmeölçerlerden elde edilen titreşim seviyeleri karşılaştırıldığında; yapı zemin kinematik etkileşimi nedeniyle, titreşim enerjisinin tren hattına paralel doğrultudaki seviyesi bina zemin katında önemli ölçüde azalmaktadır. Tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesinin değerlendirilmesinde titreşim periyodu önemli hale gelmektedir. Tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi küçük periyotlarda yapı zemin etkileşimli durumda (bina zemin katında) artmaktadır. Tren hattına dik doğrultuda yapı-zemin etkileşimli durum için -aynı zamanda PSA'ların meydana geldiği- küçük bir periyot aralığında artan titreşim seviyesi, bu aralık dışında kalan periyotlar için azalmaktadır. Ayrıca serbest zemin ve bina zemin katında maksimum spektral ivmelerin oluşum periyotları birbirine eşittir.

Test sahalarındaki farklılıkların titreşim düzeyine olan etkileri düşünüldüğünde, Gebze/GTÜ Kampüs test alanında YHT hızının az olması titreşim düzeyini önemli ölçüde azaltmıştır. Pamukova/Yenice test sahasında kullanılan dolgunun titreşim seviyesini büyük ölçüde artırdığı görülmüştür. Gerek hatta dik ve paralel doğrultu, gerekse birinci ve ikinci hat YHT geçişlerinin karşılaştırmaları için; genel olarak Pamukova/Yenice test sahasındaki titreşim seviyesi Sapanca/Kırkpınar test alanından, Sapanca/Kırkpınar test sahasındaki de Gebze/GTÜ Kampüs test alanındakinden fazladır. Hem tren hattına dik doğrultuda hem de hatta paralel doğrultuda oluşan maksimum spektral ivme değerlerinin meydana geldikleri periyotlar test sahalarına göre oldukça farklılık göstermektedir. Saha koşullarının titreşim seviyesi ve dalga yayılım karakterizasyonu üzerinde önemli etkilerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Birinci hat YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşim seviyesi, genel olarak ikinci hat geçişlerinden daha fazladır. Bu durumun oluşmasında titreşim kaynağının ölçüm noktasından uzaklaşmasının, birinci hattın ikinci hatta oluşan titreşimler için dalga yayılım ortamını baskılayarak dalga genliklerini küçülttüğü ve yerel zemin koşullarının etkili olduğu düşünülmüştür. Ayrıca ikinci hat geçişinde, birinci hattın yakın çevresi olan en yakın gözlem noktasında (ikinci hatta olan uzaklık 9.5 m) titreşim seviyesini baskıladığı bu durumun 3. gözlem (ikinci hatta olan uzaklık 23.5 m) noktasında titreşim seviyesini artırdığı ve böylece dalga yayılım karakterizasyonunu -titreşim seviyesinin mesafeye bağlı artım-azalım ilişkisi-

etkilediği düşünülmüştür. Birinci hattın ikinci hat geçişlerinde oluşan dalgaları baskılama durumu bir ip örneği ile açıklanacak olursa; uzunca bir ipin iki ucundan ve ortasındaki bir noktadan tutulması durumunda, ipin bir ucundan dalga enerjisi verildiğinde orta kısımda tutulan noktanın çevresindeki dalga genlikleri küçülürken kendisinden (ortadaki tutulan nokta) belirli mesafedeki noktaların dalga genliklerini artıracığı bilinir. Bu örnekte olduğu gibi birinci tren hattı kendi çevresindeki dalga genliklerini küçültürken belirli mesafedeki dalga genliklerini artırdığı düşünülmüştür.

Tren hattına dik doğrultuda oluşan titreşim seviyesi hatta en yakın gözlem noktasında (birinci hatta olan uzaklığı 5 m), hatta paralel doğrultuda oluşan titreşim düzeyinden küçüktür ancak hattın uzaklaştıkça hatta dik doğrultudaki titreşim seviyesi hatta paralel olandan genel olarak fazladır. Bu durum titreşimlerin tren hattına dik ve paralel yayılma doğrultusunda farklı karakterizasyonlara sahip olduğunu göstermektedir. Tren hattına dik doğrultuda farklı gözlem noktalarında (birinci hatta olan uzaklıkları 5, 12, 19, 26 m) oluşan titreşimlerin maksimum spektral ivme oluşum periyotları, tren hattına paralel doğrultudaki titreşimlerin maksimum spektral ivme oluşum periyotlarından daha düzensizdir, yani hatta uzaklıkları farklı olan noktaların hatta dik doğrultudaki maksimum spektral ivmelerinin meydana geldikleri periyotlar birbirinden çok farklıyken hatta paralel doğrultuda birbirine yakındır. Bir diğer ifade ile, 5, 12, 19, 26 m uzaklıktaki gözlem noktalarının tren hattına dik doğrultudaki maksimum spektral ivme oluşum periyotları gözlem noktasının hatta uzaklığı arttıkça değişirken, tren hattına paralel doğrultuda uzaklıkla çok fazla değişmemektedir.

İvme tepki spektrumları incelendiğinde, yapı periyodu küçüldükçe YHT titreşimlerinin yapılara uygulayacağı ivmenin arttığı görülmektedir. Yapı periyodunu etkileyen en önemli faktör yapının rijitliğidir. Yapı rijitliği arttıkça yapı periyodu da küçülecektir böylece yapının YHT titreşimlerinden etkilenme düzeyinin de artacağı söylenebilir. Elde edilen ivme tepki spektrum eğrilerinin en önemli özelliği yapının periyoduna göre; YHT titreşimlerinin, yapıda oluşturacağı ivmenin belirlenmesine ve yapıda oluşacak titreşimlerin tahmin yöntemlerinin geliştirilmesine yapacağı katkılardır.

YHT titreşimleri ölçülen araziler zemin rijitliği düşük, ince taneli ve yer altı su seviyesi yüksek olan sahalardır. Ayrıca bu bölgelere ait birçok zemin etüt raporunda zemin sıvılaşması riski mevcuttur. Yapılan titreşim düzeyi değerlendirmelerinden YHT titreşimlerine ait dalga oluşum ve yayılım mekanizması ile ilgili olarak, bu titreşimlerin zayıf zemin koşullarında sıvılardaki dalga mekaniği prensiplerine benzer şekilde oluştuğu ve yayıldığı düşünülmüştür. YHT hızı arttıkça dinamik yükün çizgisel bir yük haline geldiği söylenebilir. Gebze/GTÜ Kampüs test sahasında olduğu gibi YHT hızı azaldıkça dinamik yükün noktasal hale geldiği ve dalga yayılımının dairesel şekilde olduğu düşünülmüştür. Bu sahadaki esas sönümün de dingil yüklerinin vagon tekerlerine ve trenin yavaş yerdeğiştirmesi sonucu zemine aktarılan noktasal yükler ile zeminde meydana gelen dalga katarının sebep olduğu düşünülmüştür. Dalga katarında dalgaların birbirine olan girişimi ile büyük bir sönüm meydana getirdiği ikinci test sahasında uzaklığa bağlı sürekli azalım ilişkisinin bu sayede gerçekleştiği düşünülmüştür. Dalga oluşum ve yayılımına ait çıkarımların gerçekliğini bu tez çalışmasına göre tam olarak söylemek mümkün olmasa da ileride yapılacak detaylı çalışmalara konu olabilir. Ayrıca titreşim bariyeri deneyleri için yapılan çalışmalarda, titreşimler dalgalar halinde yayıldığı için dalganın titreşim bariyeri kenarlarından art bölgesini etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu doğrultuda bariyerin tren hattına paralel doğrultudaki boyutunun yeterli uzunlukta olmasına dikkat edilmelidir. Titreşim bariyeri olarak yapısal betonarme bariyerlerin kullanılması durumunda, bu bariyerlerin tasarımı için YHT titreşim tasarım spektrumu oluşturularak bu spektrumdan yararlanılabilir.

Titreşim düzeylerinin Amerika (FTA) ve Almanya'da (DIN 4150-2/3) kullanılan yönetmeliklere göre değerlendirilmesi sonucunda titreşim seviyesinin fazlalığı ortaya konmuştur. Sapanca/Kırkpınar test sahasında bulunan hendeğe rağmen titreşim seviyesi yönetmeliklerde verilen bazı kategoriler için eşik değeri aşmıştır. Çalışma titreşimlerin iki yayılma doğrultusunda yapıldığından yönetmelik değerlendirmeleri her doğrultu için ayrı ayrı yapılmıştır. Değerlendirmeler vektörel (üç doğrultudaki titreşim seviyesinin daha büyük tek doğrultuda ifade edilmesi) işlemle (PPV) yapılsaydı titreşim düzeyi şu an olduğundan daha fazla olacaktır. Yapı zemin etkileşimi uygun periyotlarda bu titreşim düzeyini daha da artırabilir. Yapılan değerlendirmeler

bu haliyle bile titreşim yalıtımının gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca FTA'nın DIN 4150-2/3'e göre daha sınırlayıcı ve hassas bir değerlendirme yaptığı gösterilmiştir. Türkiye'de YHT (YHT titreşimlerini özel olarak ele alan) titreşimlerini sınırlayan bir yönetmeliğin ihtiyaç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] Yüce, A. N., Ülkemizde planlanan, yapılmakta olan ve yapılan yüksek hızlı demiryolu hatlarının incelenmesi ve karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [2] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, “Faaliyet Raporu 2019 ANNUAL REPORT”. Ankara.
- [3] <https://www.japan-guide.com/e/e2018.html>., Erişim Tarihi: 14.11.2020.
- [4] Kızıldaş, M. Ç., Yüksek hızlı demiryolları mevcut durum, gelişme eğilimleri, türkiye ve dünyadaki örneklerin değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [5] <https://livesharetravel.com/33685/how-to-travel-by-train-in-spain-ave-guide/>., Erişim Tarihi: 01.08.2021.
- [6] Özaydın Çat, B., Zaman-mekan sıkışmasının gündelik mekan kullanımına etkisinin yüksek hızlı trenler üzerinden okunması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [7] <https://www.tcdd.gov.tr/projeler/ankara-konya-yuksek-hizli-tren-projesi>., Erişim Tarihi: 02.08.2021.
- [8] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, “Demiryolu Sektör Raporu 2017”. Ankara, Mayıs 2018.
- [9] TCDD Taşımacılık A. Ş. Genel Müdürlüğü, “2019 Faaliyet Raporu”. Ankara.
- [10] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, “2016-2020 İstatistik Yıllığı ANNUAL STATISTICS”. Ankara.
- [11] <https://rayhaber.com/2019/07/yuksek-hizli-tren-setleri-ve-ozellikleri-caf/>., Erişim Tarihi: 04.08.2021.

- [12] <https://www.uab.gov.tr/demiryolu.>, Erişim Tarihi: 04.08.2021.
- [13] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0e1ccf29-d0bf-468e-a9c6-2722aea68261/datasheet-velaro-tr-e.pdf.>, Erişim Tarihi: 04.08.2021.
- [14] Bata, M., Effects on buildings of vibrations caused by traffic. *Building Science*, 6(4): 221-246, 1971.
- [15] Massarsch, K. R., Man-made vibrations and solutions, State-of the-Art Lecture, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, II, 1393-1405, 1993.
- [16] Xia, H., Cao, Y., De Roeck, G., Degrande, G., Environmental problems of vibrations induced by railway traffic. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 1(2): 142-152, 2007.
- [17] Göktepe, F., Küyük, H. S., Çelebi, E., Aktaş, M., Ağcakoca, E., Yüksek Hızlı Trenlerin Serbest Zemin Yüzeyinde Oluşturduğu Titreşimlerin Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(3): 19-24, 2015.
- [18] Göktepe, F., Çelebi, E., Aktaş, M., Yapay Anakaya Kullanılarak Yüksek Hızlı Trenlerin Alüvyon Zeminlerdeki Çevre Yapılarda Oluşturduğu Titreşim Etkilerinin Azaltılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2): 407-416, 2016.
- [19] FTA, Transit Noise and Vibration Impact Assessment, Federal Transit Administration, Washington DC, 2006.
- [20] Yao, J., Zhao, R., Zhang, N., Yang, D., Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125: 105741, 2019.
- [21] Adolfsson, K., Andréasson, B., Bengtson, P-E., Bodare, A., Madshus, C., Massarch, R., Wallmark, G., Zackrisson, P., High speed lines on soft ground. Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line, Technical Report, Banverket, Sweden, 1999.
- [22] Sanayei, M., Maurya, P., Moore, J. A., Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways. *Engineering Structures*, 53: 102-111, 2013.
- [23] Connolly, D. P., Kouroussis, G., Woodward, P. K., Alves Costa, P., Verlinden, O., Forde, M. C., Field testing and analysis of high speed rail vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67: 102-118, 2014.

- [24] Feng, S., Zhang, X., Wang, L., Zheng, Q., Du, F., Wang, Z., In situ experimental study on high speed train induced ground vibrations with the ballast-less track. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 195-214, 2017.
- [25] Zhang, X., Zhou, S., He, C., Di, H., Si, J., Experimental investigation on train-induced vibration of the ground railway embankment and under-crossing subway tunnels. *Transportation Geotechnics*, 26: 100422, 2021.
- [26] Crispino, M., D'apuzzo, M., Measurement and Prediction of Traffic-Induced Vibrations In A Heritage Building. *Journal of Sound and Vibration*, 246 (2): 319-335, 2001.
- [27] Xia, H., Zhang, N., Cao, Y.M., Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings. *Journal of Sound and Vibration*, 280(3-5): 1017-1029, 2005.
- [28] Xia, H., Chen, J., Wei, P., Xia, C., De Roeck, G., Degrande, G., 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, 2009.
- [29] Connolly, P. D., Mrecki, P. G., Kouroussis, G., Thalassinakis, I., Woodward, K. P., The Growth of Railway Ground Vibration Problems -A Review. *Science of the Total Environment*, 568: 1276-1282, 2016.
- [30] Işık, E. M., Yapıların titreşim konforu açısından incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [31] Tao, Z., Wang, Y., Sanayei, M., Moore, J. A., Zou, C., Experimental study of train-induced vibration in over-track buildings in a metro depot. *Engineering Structures*, 198: 109473, 2019.
- [32] Yang, Y., Hung, H., A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40: 3729-3747, 1997.
- [33] Adam M., Estorff O.V., Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers and Structures*, 83: 11-24, 2005.
- [34] Ulgen, D., Toygar, O., Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: A full-scale experimental study. *Construction and Building Materials*, 86: 12-20, 2015.

- [35] Noori, B., Arcos, R., Clot, A., Romeu, J., Control of ground-borne underground railway-induced vibration from double-deck tunnel infrastructures by means of dynamic vibration absorbers. *Journal of Sound and Vibration*, 461: 114914, 2019.
- [36] Gao, G., Bi, J., Chen, J., Vibration mitigation performance of embankments and cuttings in transversely isotropic ground under high-speed train loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141: 106478, 2021.
- [37] Lyratzakis, A., Tsompanakis, Y., Psarropoulos, P. N., Mitigating high-speed train vibrations with EPS blocks for various soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141: 106482, 2021.
- [38] Yang, S. J., Attenuation of Ground Vibration Induced by Dynamical Machinery. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Luoyang, 1981.
- [39] Ju, S. H., Lin, H.T., Experimentally investigating finite element accuracy for ground vibrations induced by high-speed trains. *Engineering Structures*, 30: 733–746, 2008.
- [40] Bian, X., Jiang, H., Chang, C., Hu, J., Chen, Y., Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 76: 29-43, 2015.
- [41] Kouroussis, G., Connolly, D. P., Olivier, B., Laghrouche, O., Costa, P. A., Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration. *Science of the Total Environment*, 557-558: 110-122, 2016.
- [42] Sole, J., Huguenet, P., Good practices in railway vibration prediction using empirical and hybrid models. *X International Conference on Structural Dynamics*, Rome, 2669–2674, 2017.
- [43] Galvin, P., Dominguez, J., 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, 2009.
- [44] Li, T., Su, Q., Kaewunruen, S., Influences of piles on the ground vibration considering the train-track-soil dynamic interactions. *Computers and Geotechnics*, 120: 103455, 2020.

- [45] Tekergul, E., Zulfikar, C. A., Celebi, E., Kirtel, O., Goktepe, F., Effect of Trench Barrier on Free Field Motion Due to The Train and High-Speed Train Passages. 7th Eccomas Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, 862-870, 2019.
- [46] Şahin, M., Göktepe, F., Çelebi, E., Zülfikar, C. A., Kirtel, O., Farklı Frekans İçeriklerine Sahip Tren Geçişlerinde Oluşan Titreşim Enerjisinin Soğurulmasının Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi. 8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, 2019.
- [47] Ates, S., Celebi, E., Kirtel, O., Zulfikar, C. A., Goktepe, F., Measurement of Vibrations Generated by High Speed Railway Traffic and Evaluation According to International Norms. 5th International Conference on New Advances in Civil Engineering, Kyrenia, Volume 800, 2019.
- [48] Faizan, A. A., Kirtel, O., Çelebi, E., Zülfikar, C. A., Göktepe, F., Experimental and numerical study on free field motion due to passage of high-speed train considering different types of soil. International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, 342-349, 2020.
- [49] Faizan, A. A., Çelebi, E., Kirtel, O., Göktepe, F., Zülfikar, C. A., Ateş, S., İstegün, B., Evaluation of the High-Speed Train-Induced Environmental Vibration Data Based on Numerical Studies According to DIN 4150 of German Standard. 3. Conference of the Arabian Journal of Geosciences, Sousse, 2020.
- [50] Madshus, C., Kaynia, A. M., High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed. Journal of Sound and Vibration, 231(3): 689-701, 2000.
- [51] <https://otonomhaber.com/2019/08/ankara-istanbul-hizli-tren-hatti-guzergah-haritasi/>, Erişim Tarihi: 14.08.2021.
- [52] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [53] Tekergül, E., Train induced vibration and its effects on building structures. Gebze Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, A Thesis Submitted for the Degree of Master of Science, 2020.
- [54] Erkal, A., Tren geçişlerinin Küçük Ayasofya Cami üzerinde ve yanındaki serbest zemin yüzeyinde oluşturduğu titreşimlerin deneysel olarak incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22(3): 361-374, 2017.

- [55] Çelebi, E., Fırat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ., Kırtel, O., Yalıtım Araçlarının Titreşim Azaltıcı Etkilerinin Saha Deneyleriyle Değerlendirilmesi. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 145-154, 2007.
- [56] Küyük, H. S., Çelebi, E., Titreşim Azaltıcı Dalga Bariyerlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu. Kocaeli Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 1061-1066, 2005.
- [57] Küyük, S., Sümer, Y., Kırtel, O., Vural, İ., Çelebi E., ve Fırat S., Sismik Bariyer Modellerinin Tabakalı Zemin Ortamındaki Dalga Yayılışına Etkileri. İMO Teknik Kongre, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Antalya, 22-24 Eylül, 2005.
- [58] Ülgen, D., Toygar, O., Durmaz, S., Tutar, A., İçi Boş Hendeklerin Titreşim Yalıtım Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, 741-752, 2017.
- [59] <https://tubitak217m427.sakarya.edu.tr/>, Erişim Tarihi: 16.08.2021.
- [60] Faizan, A. A., Kırtel, O., Çelebi, E., Zülfikar, C. A., Göktepe, F., Experimental validation of a simplified numerical model to predict train-induced ground vibrations. Computers and Geotechnics, Volume 141, 2021.
- [61] Degrande, D., Schillemans, L., Free Field Vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed. Journal of Sound and Vibration, 247(1): 131-144, 2001.
- [62] Oliver, B., Connolly, P. D., Costa, A. P., Kouroussis, G., The effect of embankment on high speed rail ground vibrations. International Journal of Rail Transportation, 4(4): 229–246, 2016.
- [63] Galvin, P., Romero, A., Dominguez, J., Vibrations induced by HST passage on ballast and non-ballast tracks. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(9): 862-873, 2010.
- [64] Şahin, M., Alüvyon zemin ortamındaki dalga soğurulmasının tren geçişleri için deneysel ve analitik olarak değerlendirilmesi. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- [65] Çelebi, E., Fırat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ., Kırtel, O., Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(5): 824-833, 2009.

- [66] Çelebi, E., Kırtel, O. Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations. *Construction and Building Materials*, 42: 122-131, 2013.
- [67] Göktepe, F., Yüksek hızlı trenlerin çevre yapılarında oluşturduğu titreşimlerin önlenmesi için bariyer sistemlerin etkinliğinin parametrik olarak incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2020.
- [68] Işık, E. M., Kuruşcu, O. A., Titreşimlerin yapılardaki kullanıcı konforuna etkisinin incelenmesi. *Harran University Journal of Engineering*, 2: 68-81, 2018.
- [69] <https://blog.dta.com.tr/kare-kok-ortalama-rms-ve-toplam-seviye-overall-nedir/>, Erişim Tarihi: 07.11.2021.
- [70] Hancock Prospecting Pty Ltd., “Alpha Coal Project (Rail) Noise and Vibration Assessment”. September 2010.
- [71] SLR Consulting Australia Pty Ltd., “Technical Report C Surface noise and vibration Environment Effects Statement”. Melbourne, 2019.
- [72] DIN 4150-3, Structural Vibration - Effects of Vibration on Structures, Germany, 1999.
- [73] Goktepe, F., Kuyuk, S. H., Celebi, E., In-situ measurement of railway-traffic induced vibrations nearby the liquid-storage tank. *Earthquakes and Structures*, 12 (5): 583-589, 2017.
- [74] Schillemans, L., Impact of sound and vibration of the North–South high-speed railway connection through the city of Antwerp Belgium. *Journal of Sound and Vibration*, 267: 637–649, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sami ATEŞ

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Sağlık Bilimleri Enstitüsü / İş Sağlığı ve Güvenliği	2020
Lisans	Anadolu Üniversitesi / İşletme Fakültesi / İşletme	Devam Ediyor
Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Mühendislik Mimarlık Fakültesi / İnşaat Mühendisliği	2016
Lise	Öğretmen Mukadder Akaydın Anadolu Lisesi	2010

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER

1. Measurement of vibrations generated by high speed railway traffic and evaluation according to international norms (ICNACE 2019, Kyrenia)
2. Evaluation of the High-Speed Train-Induced Environmental Vibration Data Based on Numerical Studies According to DIN 4150 of German Standard (CAJG-3 2020, Sousse)
3. 217M427 nolu “Saha Koşullarında Yüksek Hız Trenlerinin Oluşturduğu Çevresel Titreşimlerin Belirlenmesi ve Yapısal Titreşimlerin Azaltılması” adlı TÜBİTAK 1001 projesinde araştırmacı bursiyer olarak görev aldı.

HOBİLER

Doğa yürüyüşü