T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI TREN KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN ZEMİN VE YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMA

DOKTORA TEZİ

Abdul Ahad FAIZAN

Enstitü Anabilim Dalı	**:**	**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı	**:**	**Doç. Dr. Osman KIRTEL**
Ortak Danışman	**:**	**Prof. Dr. Maciej DUTKIEWICZ**

Aralık 2023

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI TREN KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN ZEMİN VE YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMA

DOKTORA TEZİ

Abdul Ahad FAIZAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28/12/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Osman KIRTEL	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Yusuf SÜMER	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Abdullah Can ZÜLFİKAR	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. İsa VURAL	BAŞARILI

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.

Abdul Ahad Faizan

16/12/2023

TEŞEKKÜR

Doktora 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 Doç. Dr. Osman KIRTEL'e ve tezimin ikinci danışmanlığını yürüten hocam Prof. Dr. Maciej DUTKIEWICZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel anlamda bilgi, görüş ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 217M427) teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **v**
SİMGELER ..... **vii**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xiv**
ABSTRACT ..... **xvi**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**
1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 7
1.2. Tezin Yapısı 9

BÖLÜM 2.
ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI **10**
2.1. Zemin Titreşimlerinin Esasları 11
2.1.1. Zemin ortamında dalga yayılma olayı ve tipleri 11
2.1.1.1. Cisim dalgaları 12
2.1.1.2. Yüzey dalgaları 16
2.1.1.3. Geometrik azalım 23
2.1.1.4. Yansıma ve kırılmam 23
2.1.2. Zeminin dinamik özellikleri 26
2.1.2.1. Yapısal bağlantılar 27
2.1.2.2. Homojenlik 28
2.1.2.3. Sönüm 29
2.2. Hızlı Tren Geçişinin Oluşturduğu Titreşim Etkilerinin Zemin Ortamından Yapılara İletilmesi 34
2.2.1. Titreşim kaynağı 34
2.2.2. Dalga yayılımı 37
2.2.3. Alıcı 39
2.3. Titreşim Etkileri 42
2.3.1. Yapı üzerindeki etkileri 43
2.3.2. İnsanların titreşim algıları 46

BÖLÜM 3.
HIZLI TREN GEÇİŞLERİNİN OLUŞTURDUĞU TİREŞİM ETKİLERİNE AİT SAHA ÖLÇÜMLERİ 49
3.1. Ölçüm Sahası 49
3.2. Test Sahasının Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi 51
3.2.1. Sismik kırılma yöntemi 51
3.2.2. Yüzey dalgasının çok-kanallı analizi yöntemi (MASW) 53
3.2.3. Test sahasında sismik kırılma ve MASW yöntemleriyle zemin özelliklerini belirlenmesi 54
3.3. Hızlı Tren Geçişine Ait Serbest Zemin Titreşimlerinin Ölçülmesi 58
3.3.1. Saha koşulları ve yüksek hızlı trenin genel özellikleri 58
3.3.2. Titreşim ölçümünde kullanılan cihazlar 60
3.3.3. Ölçüm noktalarının düzenlenmesi ve titreşim verileri 61
3.3.4. Saha ölçüm sonuçları 64

BÖLÜM 4.
SONLU ELEMAN MODELİNİN SAYISAL SİMÜLASYONU VE DOĞRULANMASI 70
4.1. Sonlu Eleman Modellemesi 72
4.1.1. Demiryolu üstyapı platformunun özellikleri 74
4.1.2. Zemin ortamının sınır koşulları ve malzeme özellikleri 76
4.1.2.1. Zeminin malzeme özellikleri 76
4.1.2.2. Zemin modelinin sınır koşulları 77
4.1.3. Titreşim kaynağının simülasyonu 80
4.1.4. Sonlu eleman ağının oluşturulması 83
4.1.5. Hesaplama aşamaları 86
4.1.6. Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin boyutlarının belirlenmesi 87
4.1.7. Hızlı tren-demiryolu-zemin modelinin doğrulanması 93

BÖLÜM 5.
PARAMETRİK ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 100
5.1. Tren Hızının ve Zemin Özelliklerinin Titreşim Davranışına Etkisi 100
5.1.1. Titreşim genliğinin değişimi 105
5.1.2. Parçacık hız değerlerinin değişimi 110
5.2. Demiryolu Titreşimlerinin Üstyapı Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Incelenmesi 115
5.2.1. Yapı-tren-zemin sisteminde bina modeli 115
5.2.2. Yapı modelinin doğrulanması 117
5.2.3. Sayısal uygulama ve sonuçlar 119
5.2.3.1. Bir katlı yapı için dinamik analiz sonuçları 120
5.2.3.2. Beş katlı yapı için dinamik analiz sonuçları 125
5.2.3.3. On katlı yapı için dinamik analiz sonuçları 131
5.2.3.4. Farklı periyotlara sahip yapılar için kesme kuvvet sonuçları 137
5.2.4. Bina titreşimlerinin dünya standartlarına göre değerlendirilmesi 140
5.2.4.1. Amerikan yönetmeliğine (FTA 2006) göre titreşim değerlendirmeleri 140

5.2.4.2. Alman yönetmeliğine (DIN 4150-2/3) göre titreşim değerlendirmeleri 143

BÖLÜM 6.
TREN KAYNAKLI YAPISAL TİTREŞİMLERİN İLERİ DÜZEY SAYISAL MODELLEME YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ 147
6.1. Sonlu Eleman Modellemesi 147
6.1.1. Sonlu eleman modelinin geometrisi ve sınır koşulları 147
6.1.2. Zemin modelinin malzeme özellikleri 148
6.1.3. Sonlu eleman modelinin doğrulanması 149
6.1.4. Sayısal analiz için yapı-zemin modeli 151
6.1.5. Parametrik çalışma ve analiz sonuçları 154

BÖLÜM 7.
SONUÇ VE ÖNERİLER 164

KAYNAKLAR 169

KISALTMALAR

ADC	: Analog Dijital Dönüştürücü
BEM	: Sınır Elemanı Yöntemi
BS	: İngiliz Standardı
dB	: Desibel
DIN	: Alman Standardizasyon Enstitüsü
E-W	: Doğu-Batı
EC 8	: Euro kodu 8
FDM	: Sonlu Farklar Yöntemi
FE	: Sonlu Eleman
FEM	: Sonlu Eleman Yöntemi
FTA	: Federal Transit İdaresi
GPS	: Küresel Yer Belirleme Sistemi
HST	: Yüksek Hızlı Tren
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
MASW	: Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi
N-S	: Kuzey-Güney
P-wave	: Birincil dalga
PGA	: Pik Yer İvmesi
PPV	: Pik Parçacık Hızı
PV	: Parçacık Hızı
RMS	: Kök Ortalama Kare

S-wave : İkincil Dalga

SAP2000 : Yapısal Analiz Programı2000

SRT : Sismik Kırılma Tomografisi

SUBÜ : Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

TCDD : Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları

U-D : Yukarı-Aşağı

UBC : Tekdüze Bina Kodu

YHT : Yüksek Hızlı Tren

1D : Tek-Boyutlu

2D : İki-Boyutlu

3D : Üç-Boyutlu

SİMGELER

a	: Genlik
a_x, a_y, a_z	: Hatta dik, paralel ve düşey doğrultulardaki ivme
B	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin genişliği
c_1	: Viskoz sınırlar için basınç gerilmesine karşı gelen soğurma katsayısı
c_2	: Viskoz sınırlar için kayma gerilmesine karşı gelen soğurma katsayısı
C_{rad}	: Sönüm katsayısı
E	: Elastisite modülü
f	: Zemin ortamı için hakim frekans değeri
f_a	: Dingil geçişi için baskın frekansı
f_b	: Boji geçişi için baskın frekans
f_c	: Vagon geçişi için baskın frekans
f_s	: Travers geçiş frekansı
F_z	: Trenin dingil yükü
G	: Kayma modülü
H	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin yüksekliği
K	: Bulk modülü
L	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin uzunluğu
L_i	: Tren geçiş uzunlukları
n	: Geometrik sönümleme katsayısı
P1	: Binanın çatı katı
P2	: Binanın temel tabanı

Q	: Kolon kesme kuvveti
r	: Dalga kaynağına olan uzaklık
T	: Doğal titreşim periyodu
T	: Periyot
U_x, U_y, U_z	: Hatta dik, paralel ve düşey doğrultulardaki yerdeğiştirme
v	: Dalga yayılma hızı
V	: Trenin hareket hızı
V_L	: Love dalgası yayılma hızı
V_p	: Basınç dalgası yayılma hızı
V_R	: Rayleigh dalgası yayılma hızı
v_{ref}	: Referans hızı
V_s	: Kayma dalgası yayılma hızı
V_x, V_y, V_z	: Hatta dik, paralel ve düşey doğrultulardaki hız
W	: Döngüsel yükleme
α	: Rayleigh malzeme sönümü için kütle matrisi katılım katsayısı
β	: Rayleigh malzeme sönümü için rijitlik matrisi katılım katsayısı
ΔW	: Çevrimsel yükleme
ε	: Şekildeğiştirme
λ	: Zemin ortamında yayılan dalga boyu
ν	: Poisson oranı
ξ	: Sönüm oranı
ρ	: Zeminin yoğunluğu
σ	: Gerilme
σ_1	: Maksimum asal gerilme
ψ	: Dalga açısı
σ_3	: Minimum asal gerilme

[C] : Malzeme sönüm matrisi

[K] : Rijitlik matrisi

[M] : Kütle matrisi

Δh : Sonlu elaman boyutu

Δt : Hareket denkleminin çözümünde zaman adım aralığı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 : Hacim ve yüzey dalgalarının genel özellikleri. 21
Tablo 2.2 : Konsolide killerin G_{max}, G/G_{max}, ve sönüm oranını değerlerini etkileyen faktörler. 32
Tablo 2.3 : Yapısal hasar bakımından FTA'daki eşik titreşim hız seviyeleri. 45
Tablo 2.4 : Yapısal hasar bakımından DIN 4150-3'teki eşik titreşim hız seviyeleri..46
Tablo 2.5 : İnsan algısı bakımından FTA'daki eşik titreşim hız seviyeleri. 47
Tablo 2.6 : İnsan algısı bakımından DIN 4150-2'deki eşik titreşim hız seviyeleri... 48
Tablo 3.1 : Serim boyu, ofset, jeofon aralığı, örnekleme aralığı ve kayıt süresi çizelgesi. 55
Tablo 3.2 : Sismik Hızlar ve zemin elastik parametreleri. 57
Tablo 3.3 : HT65000 yüksek hızlı trenin özellikleri. 60
Tablo 3.4 : Maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri (cm/s^2). 68
Tablo 4.1 : FEM, BEM ve FDM yöntemlerinin karşılaştırılması. 71
Tablo 4.2 : Sayısal simülasyonda kullanılan malzeme parametreleri. 75
Tablo 4.3 : Sayısal simülasyonda kullanılan ray mekanik özellikleri. 75
Tablo 4.4 : Zemin malzeme özellikleri. 76
Tablo 4.5 : HT65000 yüksek hızlı trenin özellikleri. 81
Tablo 4.6 : Farklı geçiş frekansları. 83
Tablo 4.7 : Mesafeye bağlı olarak maksimum yerdeğiştirmelerin değişimi. 91
Tablo 4.8 : Maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri. 96
Tablo 4.9 : Karşılaştırmalı maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri (cm/s^2)..... 96
Tablo 5.1 : Yerel zemin sınıfları (TBDY-2018). 102
Tablo 5.2 : Zemin mekanik özellikleri. 102
Tablo 5.3 : Farklı kayma dalgası hızına sahip zeminlerin baskın frekansları. 103
Tablo 5.4 : Sonlu elemanlar analizi için işlem hacmi. 104
Tablo 5.5 : Zemin mekanik özellikleri. 117
Tablo 5.6 : Yapıya ait modal periyot değerlerinin karşıastırılması. 119
Tablo 5.7 : FTA'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları. 141
Tablo 5.8 : DIN'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları. 143
Tablo 6.1 : Sayısal modellemede kullanılan zemin özellikleri 149
Tablo 6.2 : FTA değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları 162
Tablo 6.3 : DIN'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları 163

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Tren kaynaklı titreşimin iletim süreci. 6
Şekil 2.1 : Demiryolunun neden olduğu yer titreşimlerine genel bakış. 10
Şekil 2.2 : Zemin titreşiminin yayılma şekilleri. 12
Şekil 2.3 : Birincil dalgası (P-dalgası) yayılma şekli. 13
Şekil 2.4 : Rayleigh dalgası ve cisim dalgası yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi. 13
Şekil 2.5 : Kayma dalgası (S-dalgası) yayılma şekli. 15
Şekil 2.6 : SV-dalgası ve SH-Dalgası yayılma şekli. 16
Şekil 2.7 : Love dalgası yayılma şekli. 17
Şekil 2.8 : Love dalgalarında partikül yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi. 18
Şekil 2.9 : Elastik yarı sonsuz ortam üzerine gelen yumuşak yüzey katmanının ($G_1/\rho_1 < G_2/\rho_2$) şematik gösterimi. Love dalgalarının var olabileceği en basit şartlar. 18
Şekil 2.10 : Rayleigh dalgası yayılma şekli. 19
Şekil 2.11 : Rayleigh Dalgalarının yatay ve düşey hareketi. 20
Şekil 2.12 : Rayleigh Dalgalarının yatay ve düşey hareketi. 22
Şekil 2.13 : Cisim dalgaları ve yüzey dalgaları için geometrik azalım. 23
Şekil 2.14 : Bir dalganın yansıması ve kırılması. 24
Şekil 2.15 : Bir arayüz boyunca dalga yayılmasının kırılması. 25
Şekil 2.16 : Bir arayüz boyunca dalga yayılmasının kırılması. 25
Şekil 2.17 : Yansıyan ve kırılan dalgalar için yayılma yolları. 25
Şekil 2.18 : Kırılan bir dalganın geçiş yolu. 26
Şekil 2.19 : Gelen (a) P dalgasından, (b) SV dalgasından ve (c) SH dalgasından yansıyan ve kırılan ışınlar. 26
Şekil 2.20 : E_0 ve E_{50} elastisite modüllerinin tanımlanması. 27
Şekil 2.21 : (a) Homojen, (b) anizotropik ve (c-d) malzeme, ana gerilme yönünü ve büyüklüğünü etkilenmesi. 29
Şekil 2.22 : Bir SDOF sisteminde sönüm. 30
Şekil 2.23 : Histerez döngüsü ve sönümleme oranı arasındaki ilişki. 31
Şekil 2.24 : Yüzey noktasal yükü için farklı dalga türleri için geometrik sönümü. 33
Şekil 2.25 : Demiryolunun neden olduğu yer titreşimleri için iletim süreci. 34
Şekil 2.26 : Tipik bir demiryolu hattı yapısının şematik görünümü. 35
Şekil 2.27 : Yarı sonsuz zemin yüzeyinde hızlı tren geçişi. 36
Şekil 2.28 : Vagon, bojiler, tekerlekler, raylar, traversler ve temel zemin üzerindeki balastın dinamik sisteminin şeması. 37
Şekil 2.29 : Tekerlek ve ray arasındaki dikey ve yatay temas kuvveti. 37
Şekil 2.30 : Tekerlek Zemin titreşimleri için yayılma sürecinin gösterimi. 38
Şekil 2.31 : Tren kaynaklı titreşimlerin zeminden yapıya iletilmesi. 41
Şekil 2.32 : Tren Bir bina yapısının mod şekiller, düşük frekanslı ilk üç mod (1 ila 5 Hz). Daha yüksek modlar, döşeme açıklıklarının titreşimlerinden kaynaklanır. 42

Şekil 3.1 : İncelenecek sahanın genel bakışı. 50
Şekil 3.2 : Sismik Kırılma ve MASW arazi deneyleri. 52
Şekil 3.3 : Yüzey dalgasının MASW yönteminin sistematik veri toplama aşamalarını içeren gösterim. 54
Şekil 3.4 : Jeofizik deneyler için arazi ölçümleri. 55
Şekil 3.5 : Tren yoluna dik MASW profili. 56
Şekil 3.6 : Tren yoluna paralel MASW profili. 56
Şekil 3.7 : Sismik kırılma yöntemi ile oluşturulmuş model. 57
Şekil 3.8 : Test sahasının a) konumu ve b) kuş bakış görünüşü ve hızlı tren geçişi... 59
Şekil 3.9 : HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları. 60
Şekil 3.10 : DAC-3HDG GPS senkronizasyonlu veri kaydedici ivmeölçer ve teknik özellikleri. 61
Şekil 3.11 : İncelenecek test sahasının 2D ve 3D görünüşü. 62
Şekil 3.12 : İncelenecek test sahasının plan ve kesit görünüşü. 63
Şekil 3.13 : HT65000 yüksek hızlı trenin 200-250 km/h hızla 1. hat (L1) üzerinde geçişi (Kırkpınar-Sakarya). 64
Şekil 3.14 : Demiryolu hattına paralel doğrultuda ivme-zaman grafiği. 65
Şekil 3.15 : Demiryolu hattına dik doğrultuda (N-S) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman ve Fourier genliği grafikleri. 66
Şekil 3.16 : Demiryolu hattına paralel doğrultuda (E-W) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman ve Fourier genliği grafikleri. 66
Şekil 3.17 : Düşey doğrultuda (U-D) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman ve Fourier genliği grafikleri. 67
Şekil 3.18 : Demiryolu hattına (a) dik doğrultuda (b) paralel doğrultuda ve (c) düşey doğrultuda ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait en büyük yer ivmeleri. 69
Şekil 4.1 : Demiryolu kaynaklı zemin titreşim modellerinin sınıflandırılması. 72
Şekil 4.2 : Sonlu eleman modeli. 74
Şekil 4.3 : Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modelin kesiti ve 3D görünümü. 75
Şekil 4.4 : PLAXIS 3D'da sönüm parametreleri. 77
Şekil 4.5 : Viskoz sönümleyici yutucu sınırlar. 78
Şekil 4.6 : PLAXIS 3D modelindeki sınır koşulları. 80
Şekil 4.7 : HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları ve şematik diyagramı. 81
Şekil 4.8 : Hareketli yükü simüle etmek için geliştirilmiş üç boyutlu sonlu eleman modeli. 82
Şekil 4.9 : Tren ve demiryolu hattının geometrik parametreleri. 83
Şekil 4.10 : PLAXIS 3D'da kullanılan elemanların düğüm ve gerilme noktaları. 84
Şekil 4.11 : (a) Sonlu eleman ağı ve (b) demiryolu-zemin siteminde gerilme dağılımı. 85
Şekil 4.12 : PLAXIS 3D'da fazların tanımlanması. 86
Şekil 4.13 : 3D Geometrisi ve tanımlanmış aşamaları. 87
Şekil 4.14 : Ayrıklaştırılan zemin bölgesini belirlemek için geliştirilmiş üç boyutlu sayısal model. 88
Şekil 4.15 : Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin genişliğinin belirlenmesi. 90
Şekil 4.16 : Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin derinliğinin belirlenmesi. 92
Şekil 4.17 : İncelenecek test sahasının doğal saha koşullarındaki (a) saha ve (b) 3D model görünüşü. 94
Şekil 4.18 : Sonlu eleman modelinin deformasyon ve gerilme dağılımı. 94

Şekil 4.19 : Demiryolu hattına dik doğrultuda (x bileşeni) zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği. 95
Şekil 4.20 : Demiryolu hattına paralel doğrultuda (y bileşeni) zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği. 95
Şekil 4.21 : Düşey doğrultuda (z bileşeni) zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği. 96
Şekil 4.22 : Yayılan titreşim etkilerinin karşılaştırmalı azalım eğrileri (a) hatta dik, (b) hata paralel ve (c) düşey doğrultuda. 98
Şekil 4.23 : Balast üzerindeki titreşimlere ait ivme, hız, yerdeğiştirme ve Fourier genlik grafikleri 99
Şekil 5.1 : Problemde ele alınan sayısal model (a) 3D görünüşü ve (b) gerilme dağılımı. 101
Şekil 5.2 : Simüle edilmiş yüksek hızlı trenin çeşitli hızlarda geçişi. 104
Şekil 5.3 : Farklı zemin koşullarında tren hızlarının hatta dik doğrultuda yayılan titreşime etkisi. 105
Şekil 5.4 : Farklı zemin koşullarında tren hızlarının hatta paralel doğrultuda yayılan titreşime etkisi. 106
Şekil 5.5 : Farklı zemin koşullarında tren hızlarının düşey doğrultuda yayılan titreşime etkisi. 106
Şekil 5.6 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 100 km/h). 108
Şekil 5.7 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 150 km/h). 108
Şekil 5.8 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 200 km/h). 109
Şekil 5.9 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 250 km/h). 109
Şekil 5.10 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 250 km/h)..... 110
Şekil 5.11 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 100 km/h). 111
Şekil 5.12 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 150 km/h). 112
Şekil 5.13 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 200 km/h). 112
Şekil 5.14 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 250 km/h) : Altıncı bölümde örnek şekil. 113
Şekil 5.15 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 300 km/h). 113
Şekil 5.16 : Yumuşak zeminde farklı tren hızları için demiryoluna en yakın ve uzak mesafedeki maksimum parçacık hızı. 114
Şekil 5.17 : Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modelin 2D ve 3D görünümü. 116
Şekil 5.18 : Bina kat sayısına bağlı periyot değişimi (a) Plaxis 3D ve (b) SAP2000 programında. 118
Şekil 5.19 : Bina kat sayısına bağlı periyot değişiminin karşılaştırılması. 119
Şekil 5.20 : Demiryolu-yapı-zemin modelinin 2D ve 3D geometrik gösterimi..... 120
Şekil 5.21 : Gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı yapı-zemin sistemin davranışı (a) gerilme ve (b) deformasyon..121

Şekil 5.22 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 122
Şekil 5.23 : Tek katlı yapı içerisinde hız değişimi. 123
Şekil 5.24 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 124
Şekil 5.25 : Tek katlı yapı içerisinde yerdeğiştirmenin değişimi. 124
Şekil 5.26 : Demiryolu-yapı-zemin modelinin 2D ve 3D geometrik gösterimi..... 126
Şekil 5.27 : Gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı yapı-zemin sistemin davranışı (a) gerilme ve (b) deformasyon. 127
Şekil 5.28 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 128
Şekil 5.29 : Beş katlı yapı içerisinde hız değişimi. 128
Şekil 5.30 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 130
Şekil 5.31 : Beş katlı yapı içerisinde yerdeğiştirmenin değişimi. 130
Şekil 5.32 : Demiryolu-yapı-zemin modelinin 2D ve 3D geometrik gösterimi..... 132
Şekil 5.33 : Gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı yapı-zemin sistemin davranışı (a) gerilme ve (b) deformasyon. 133
Şekil 5.34 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 134
Şekil 5.35 : On katlı yapı içerisinde hız değişimi. 134
Şekil 5.36 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 136
Şekil 5.37 : On katlı yapı içerisinde yerdeğiştirmenin değişimi. 136
Şekil 5.38 : Yap-zemin sonlu eleman modeli. 138
Şekil 5.39 : Farklı yükseklikteki binalar için maksimum kesme kuvvetleri. 139
Şekil 5.40 : Binaların hatta paralel ve dik doğrultularda maksimum kesme kuvvetleri. 140
Şekil 6.1 : Üç boyutlu sonlu eleman modeli 148
Şekil 6.2 : Geliştirilen sonlu elemanmodelinin şematik gösterimi 149
Şekil 6.3 : (a) Demiryolu hattına dik, (b) demiryolu hattına paralel ve (c) düşey doğrultuda zemin yüzeyi ivmelerinin karşılaştırılması..... 151
Şekil 6.4 : Yapı-zemin sisteminin ve uygulanan yükün şematik görünümü..... 152
Şekil 6.5 : Yapı-zemin sisteminin üç boyutlu sonlu eleman modeli..... 153
Şekil 6.6 : Dinamik yük altında gerilim dağılımı..... 153
Şekil 6.7 : Üst ve zemin kat için şekil değiştirme eğrilerinin değişimi..... 155
Şekil 6.8 : Üst ve zemin kat için hız eğrilerinin değişimi 155
Şekil 6.9 : Üst ve zemin kat için ivme eğrilerinin değişimi 156
Şekil 6.10 : Problemde ele alınan sayısal model..... 158
Şekil 6.11 : Problemde (a) toplam yerdeğiştirme (b) toplam hız ve (c) eşdeğer gerilme..... 159
Şekil 6.12 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu..... 160
Şekil 6.13 : Farklı zemin sınıfı için hız-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu. 161

YÜKSEK HIZLI TREN KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN ZEMİN VE YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMA

ÖZET

Yüksek hızlı trenlerin (YHT) neden olduğu yer kaynaklı titreşimler, güzergâh boyunca çevre yapılarda insan konforu açısından istenmeyen titreşimler oluşturabileceği gibi hassas aletlerde işlevsel bozukluklara ve özellikle parlayıcı-patlayıcı madde bulunduran tesislerde istenmeyen sonuçlara sebep olabilir. Demiryolu hatlarının artmasıyla oluşan yer titreşimi gibi sorunlar ve bunların yakınındaki yapılar üzerindeki dinamik etkileri, yoğun nüfuslu kentsel alanlarda önemli bir çevresel sorun haline gelmiştir. Mühendisler için bu tür alanlarda yapı inşa etmek büyük bir zorluk teşkil etmekte ve mevcut demiryolu hatlarına yakın yeni binaların inşası dikkatli tasarım gerektirmektedir. İlk aşamada, YHT kaynaklı çevresel titreşimlerin etkisini değerlendirmekte ve geliştirilen sayısal modelleri kullanarak tam ölçekli saha koşullarında deneysel sonuçlarını doğrulamaktadır. İstanbul-Ankara yüksek hızlı demiryolu güzergâhının Sapanca-Kırkpınar bölgesinde, tren kaynaklı titreşimlerin çevredeki yerleşim alanları üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deneysel incelemeler ve serbest zeminde ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada, üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak demiryolu hattına dik doğrultuda belirli mesafelerde hızlı tren geçişi esnasında oluşan titreşimler ölçülmüştür. 200-250 km/h hıza sahip YHT kaynaklı dikey ve yatay serbest zemin titreşimlerine ait ivme verileri analiz edilmiştir. İkinci aşamada, hızlı tren geçişi kaynaklı çevresel titreşimlerin, serbest zemin ve yakındaki betonarme binalar üzerindeki etkisini parametrik olarak incelemek amacıyla hızlı tren-demiryolu-zemin sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Sonlu eleman analizleri için PLAXIS 3D Ultimate yazılımı kullanılmıştır. Yapay yansımaları en aza indirmek ve titreşim enerjisini sınırlarda dağıtmak için, sonsuz alanın yanal uzantısı viskoz soğurucu sınırlar kullanılarak modellenmiştir. Yapılan saha çalışmalarından elde edilen titreşim verileri ile doğrulanan gelişmiş sayısal model kullanılarak, yüksek hızlı trenlerin farklı dinamik özelliklerdeki yapılar üzerindeki etkilerini incelemek için kapsamlı parametrik analizler yapılmıştır. Son olarak, ANSYS programı kullanılarak yığma yapı tipindeki binaların dinamik davranışını ele almak ve aynı zamanda demiryolu titreşimlerinin yakındaki betonarme yapılar üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik analizler soncunda elde edilen titreşim verileri, yapı hasarı ve insan konforu açısından, Amerikan (FTA, 2006) ve Almanya (DIN 4150–2/3) standartlarına göre incelenmiştir. Deneysel ve parametrik çalışmalardan elde edilen titreşim ölçüm verileri, YHT kaynaklı çevresel titreşimlerin olumsuz etkilerinden kaçınmak için, demiryollarına yakın konumlardaki konut ve endüstriyel tesislerin planlanmasında özellikle yararlı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Hızlı tren, çevresel titreşimler, yerinde zemin titreşim ölçümleri, sonlu elemanlar yöntemi, deneysel doğrulama, yapısal titreşimler, insan konforu.

EVALUATING THE IMPACT OF HIGH-SPEED TRAIN-INDUCED VIBRATIONS ON GROUND AND STRUCTURES: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY

ABSTRACT

Vibrations caused by high-speed trains (HSTs) may affect the service life of structural components, resulting in malfunctions of sensitive instruments located inside buildings and potentially leading to undesirable consequences, especially in facilities containing explosive materials. Excessive ground-borne vibrations induced by HSTs not only can cause damage to the nearby buildings but also affect the human comfort by undesired induced vibrations. These vibrations pose significant challenges for engineers to build structures in such areas and construction of new buildings close to existing railway lines requires careful design. In the first part of the study, the impact of HST-induced environmental vibrations is assessed and experimental results are validated under full-scale field conditions using developed numerical models. Experimental investigations and measurements on free-field were conducted to examine the impact of train-induced vibrations on surrounding residential areas in the Sapanca-Kırkpınar region of the Istanbul-Ankara high-speed railway line. In this study, vibrations generated during the passage of high-speed trains at specific distances perpendicular to the railway line were measured using triaxial accelerometers. Acceleration data related to vertical and horizontal ground vibrations at speeds of 200-250 km/h generated by HSTs were analyzed. Subsequently, a finite element model of the HST-railway-ground system was developed to parametrically examine the effects of HST-induced environmental vibrations on free-field and nearby reinforced concrete buildings. PLAXIS 3D Ultimate software was used for finite element analyses. To minimize artificial reflections and dissipate vibrational energy at the boundaries, the lateral extension of an infinite domain was modeled with viscous absorbing boundaries. Comprehensive parametric analyses were conducted to investigate the effects of high-speed trains on structures with different dynamic characteristics using the validated numerical model. Additionally, vibration analyses were conducted using the ANSYS program to examine the effects of railway vibrations on nearby masonry and reinforced concrete buildings. The vibration data obtained from parametric studies were evaluated according to American (FTA, 2006) and German (DIN 4150-2/3) standards in terms of structural damage and human comfort. The vibration measurement data obtained from experimental and parametric studies could be particularly useful in planning residential and industrial facilities in proximity to railways to avoid the adverse effects of HST-induced environmental vibrations.

Keywords: High-speed train, environmental vibrations, in-site measurement, finite element method, experimental verification, structural vibrations, human comfort

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda, hızlı trenler için demiryolu ağlarının gelişimi, Türkiye dahil birçok ülkede hızla artmaktadır. Türkiye'deki yüksek hızlı trenler maksimum 250–300 km/h hıza sahip olacak şekilde ve yolcu ve yük taşımacılığındaki dingil yükleri 180-225 kN olarak tasarlanmıştır. Yüksek hızlı trenler için demiryolu ağlarının genişlemesi ile birlikte, demiryolu hatları boyunca zeminden kaynaklanan titreşim, yoğun olarak inşa edilmiş kentsel alanlarda dikkate alınması gereken bir problem haline gelmiştir. Trenin neden olduğu yer titreşimlerinin çevreleyen zemin katmanları boyunca yayılması, yakındaki binaları ve bu binalarda yaşayan insanları etkileyebilmektedir. Demiryolu hatlarına yakın yaşayan insanlar söz konusu olduğunda, tren geçişinin neden olduğu titreşimler bir pasif etki olarak insanların konforunu ve sağlığını etkiler. Zeminde tren kaynaklı titreşim etkilerinin değerlendirilmesi ve yakın yapılara aktarılması inşaat mühendisliği alanında dikkate değer bir konudur. Bu değerlendirmenin ana faktörlerinden biri, insan konforu ve bina hasarı açısından demiryollarında yüksek hızlı trenlerin geçişinden kaynaklanan aşırı titreşim seviyeleridir. Üretilen titreşimler, yeterli değerlendirme ve metodolojileri tanımlayan uluslararası titreşim standartlarına göre değerlendirilmelidir.

Türkiye'de, birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi yüksek hızlı demiryolu taşımacılığı ve yük/banliyö trenleri gibi tren hizmetleri sunulmaktadır. Bu bağlamda, deprem yer hareketi dışındaki farklı frekans içeriğine sahip insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu titreşimlerin oluşum mekanizması ve bu titreşimlerin yumuşak zemin koşullarında nasıl yayıldığı konuları, önemli araştırma konuları olarak ortaya çıkmıştır. Zemin ortamındaki titreşim yayılımı, titreşim kaynaklarına yakın büyüyen yapı ve insanların yaşam koşulları konusundaki dikkatleri nedeniyle popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Demiryolu ulaşım sistemi tarafından üretilen yer kaynaklı titreşim ve gürültünün çevresel etkisi kentsel alanlarda giderek artan bir endişe kaynağıdır. Aynı zamanda demiryolu platformlarına yakın yapılardaki titreşimler de, seyehat eden yolcular için rahatsızlık yaratabilecek etkiler oluşturabilir. Aslında, bu

sorun gittikçe önem kazanmaktadır. Titreşim rahatsızlığı sadece insanları (konfor ve sağlık) değil, aynı zamanda binaları da (ana ve ilk hasar olarak çatlaklar) etkiler.

Yüksek hızlı tren (YHT) teknolojisi üzerine yapılan araştırmaların önemli bir kısmı, sadece yolcuların konforunu artırmakla kalmayıp aynı zamanda demiryolu ağının geçtiği yoğun yerleşim bölgelerinde yaşayan bireylerin maruz kalabileceği gürültü kirliliği ve büyük genlikli titreşimlerden korunma çabalarını da içermektedir. Yüksek hızlı trenin olumsuz çevresel yan etkisi, üretilen yer kaynaklı titreşimin yüksek seviyeleridir. Serbest alanda bu titreşimler yerel çevreyi olumsuz etkileyebilir ve eşya veya araç-gereçlerin sallanmasına ve duvarların/zeminlerin iç mekan gürültüsü üretmesine neden olabilir. Bu nedenle, birçok ülkede, yeni bir hat inşa edilmeden önce, olumsuz yan etkiler yaşayabilecek paydaşları belirlemek için bir titreşim değerlendirme uygulaması yapmak zorunludur. Bu paydaşları olabildiğince erken belirlemek için, yeni bir hattın titreşim seviyeleri tasarım aşamasında hesaplanmalıdır.

Kentsel alanlardaki artan ulaşım hızının etkisi, yerleşim bölgelerinde genişleme ve ilerleme olarak gözlemlenmektedir. 19. yüzyılın başlarından itibaren gelişen ve kamusal kullanım için açılan demiryolu hatları, birçok kullanıcı için ulaşım hızının önemli ölçüde arttığı ilk altyapı örneğini temsil eder. Kentleri birbirine bağlayan demiryolları, öncelikle buhar motorlarının, daha sonraları ise ilerleyen teknoloji ve farklı enerji kaynaklarının kullanımıyla daha yüksek hızlarda ulaşım ağlarına dönüşmüştür. İnsanların yaşam standartlarının ekonomik büyüme ile ilişkili olarak artması, modern kent topluluklarının yoğun yerleşim bölgelerinde daha yüksek kalitede ve güvenli bir yaşam arzusunu beraberinde getirmekte ve çevresel etkenlerin sebep olduğu sorunlara karşı duyarlılıklarını hızla artırmaktadır. Deprem dışındaki insan kaynaklı yüksek frekansta titreşimlerin (örneğin ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik akış yükleri, büyük inşaat faaliyetleri, patlamalar vb.) yumuşak zemin ortamlarında nasıl yayıldığının incelenmesi, çevresel titreşim sorunlarına mühendislik çözümleri geliştirmek açısından büyük bir öneme sahiptir (Bata, 1971; Massarsch, 1993, 2004; Xia vd., 2007).

Çağdaş dünyada hızlı bir şekilde ilerleyen modern sanayi, ticaret merkezlerinin gelişimi ve buna bağlı olarak modern kentlerin sürekli genişlemesi, insanların günlük yaşam ve çalışma ortamları üzerindeki ulaşım sistemlerinin neden olduğu titreşim etkilerini gündeme getirmiştir. Bu durum, büyük şehir yöneticileri, ulaşım sistemleri planlayıcıları, trafik sistem tasarımcıları ve dünya genelinde çevre sorunlarıyla ilgilenen mühendis araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Yüksek hızlı demiryolu hatlarında sürekli

tren geçişlerinden kaynaklanan güçlü titreşimlerin ölçülmesi, demiryolu üstyapısında, çevre zeminde ve yapılarda meydana getirdiği etkilerin uluslararası standartlara göre karşılaştırılması ve analiz edilmesi, bu titreşimlerin yapı temellerinde meydana getirdiği hasar ve insanlarda rahatsızlıkların değerlendirilmesi, titreşimlerin yayılma alanında veya korunacak yapı çevresinde azaltılması ve en uygun demiryolu üstyapı tasarımının gerçekleştirilmesi gibi konular, inşaat mühendisliğinde ulaşım sistemlerinin planlanması açısından önemli bir alanı kapsamaktadır. Trafik sistemleri tarafından üretilen titreşimlerin kentsel yaşam ve çalışma ortamı üzerindeki etkisi, titreşimin dünyanın yedi büyük çevresel tehlikesinden biri olarak listelendiğinden beri kamuoyunun dikkatine sunulmuştur (Gupta vd., 2009). Bu nedenle, tren kaynaklı titreşimlerden etkilenebilecek yakındaki binalarda olası sorunları önlemek için bu etkilerin kapsamlı bir analizi gereklidir. Sonuç olarak, titreşimlerin etkileri değerlendirilmeli ve üretilen titreşim seviyesinin bina hasarına neden olmaması ve insanların gerekli konforunu tehlikeye atmaması sağlanmalıdır. Çevresel titreşim değerlendirmeleri genellikle iki faktörü dikkate alır: binanın hasar riski ve insan tepkisi. Üretilen titreşimler, yeterli değerlendirme ve metodolojileri tanımlayan uluslararası titreşim standartlarına göre değerlendirilmelidir. Yeterli prosedürleri ve değerlendirmeleri tanımlayan çeşitli standartlar mevcuttur. En önemlileri; Alman (DIN 4150-2/3), uluslararası (ISO 2631-2), İsviçre (SN 640 312a), İngiliz (BS 7385) ve Amerikan (FTA 2006) standartlarıdır.

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının neden olduğu çevresel titreşim etkileri, trafik yoğunluğuna, tren seti yüklerine, etkime sürelerine ve seyahat hızlarına bağlı olarak incelenmiş; dalga yayılımı problemi anlaşılabilmesi için bir dizi çalışma yürütülmüş ve bu çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlar literatürde paylaşılmıştır. Bu araştırma çalışmaları analitik, sayısal ve deneysel çalışmalar olarak sınıflandırılabilir.

Tren kaynaklı yer titreşimlerini değerlendirmek için çok sayıda sayısal ve analitik model oluşturulmuştur (Auersch, 1994; Metrikine ve Vrouwenvelder, 2000; Hall, 2003; Liao vd., 2005; Forrest ve Hunt, 2006; Wanming vd., 2010; Ropars vd., 2018). Ayrıca, birkaç yazar ve araştırmacı, teorik analiz yoluyla tren kaynaklı titreşimleri araştırmıştır (Vostroukhov and Metrikine, 2003; Takemiya and Bian, 2005; Senalp vd., 2010). Sheng vd. (1999), bir demiryolu hattındaki tek bir harmonik yükün hareketiyle üretilen yer titreşimini tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Kaynia vd. (2000), Green fonksiyonları kullanarak bir kamyon-zemin yapısı üzerindeki yükün tabakalı bir zemine taşınmasından oluşan sonlu bir eleman modelinin geliştirilmesini sunmuşlardır. Yang

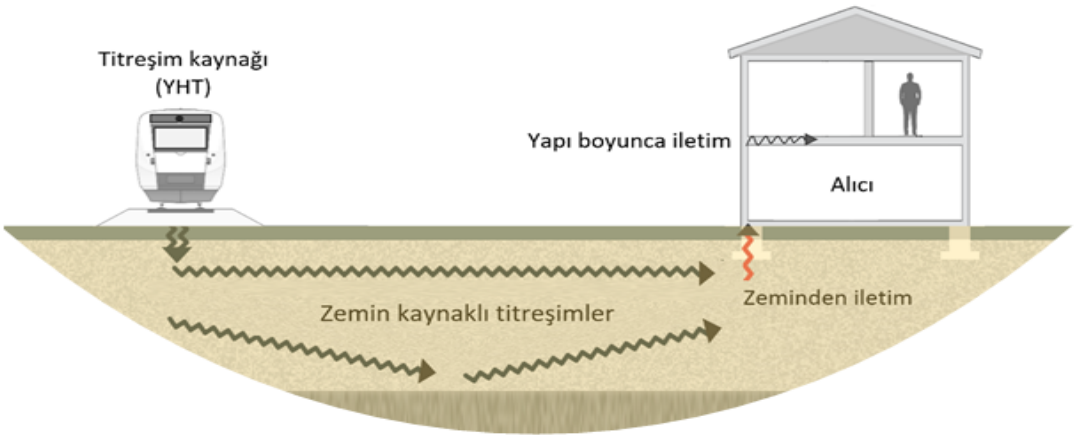
vd. (2003), farklı hızlarda hareket eden trenlerin neden olduğu katmanlı zeminlerde dalga yayılımını incelemişlerdir. Shen (2009), bitişik bir hareketli kamyonun rastgele düzensizlikleri geçmesinin, sonlu eleman modelini kullanarak bina titreşimlerinin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Gao vd. (2012), farklı mesafelerdeki tren geçişinden dolayı çok tabakalı bir zemindeki titreşimi dikkate almak için sonlu bir eleman yöntemi geliştirmişlerdir. Triepaischajonsak ve Thompson (2015), tren-ray etkileşimini dikkate alan hibrit bir yaklaşım kullanarak trenlerden kaynaklanan zemin titreşimini değerlendirmişlerdir. Ribes vd. (2017), tren kaynaklı titreşimlerin demiryolu hattına yakın bir binaya yayılmasını analiz etmek için doğrulanmış bir 3D sonlu eleman modeli kullanılmışlardır. Yang vd. (2018), metro kaynaklı titreşimi incelemek için harmonik analizle ABAQUS yazılımına dayalı bir sonlu eleman-sonsuz eleman modeli oluşturmuşlardır. Faizan vd. (2020), zeminden kaynaklanan titreşimleri incelemek ve deneysel sonuçları doğrulamak amacıyla iki boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Doğrulanan model, farklı zemin koşulları için tren kaynaklı titreşimlerin etkisini incelemek için kullanılmıştır. Zou vd. (2020), zeminden yakındaki binaya trenin neden olduğu titreşim iletimini değerlendirmek için bir tahmin yöntemi önermişlerdir.

Bahsedilen çalışmalara ek olarak, tren kaynaklı titreşimi araştırmak için çeşitli saha çalışmaları yapılmıştır (Çelebi vd., 2022, Galvín and Domínguez, 2009; Zhang vd., 2018; Faizan vd., 2022; Xu vd., 2019). Ayrıca, tren özelliklerinin demiryolu hattı üzerindeki etkisini ve demiryollarından kaynaklanan zemin titreşimlerini incelemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Thompson, 2009; Kouroussis vd., 2011; Zhai vd., 2015). Bunlarla birlikte, Auersch (2005), ICE tipi yüksek hızlı yolcu trenlerinin Almanya'da sergilediği performans, 100 ila 300 km/h arasındaki değişen hızlarda elde edilen ölçüm sonuçlarını içeren bir raporla kamuoyuna duyurulmuştur. Anderson (1994), temellerde demiryolu titreşim girdisine maruz kalan iki binada titreşim ölçümleri yapmış ve 5-50 Hz arasında baskın frekanslara sahip algılanabilir titreşimin zeminden yakındaki binalara yayılabildiğini bulmuştur. Diğer taraftan, Branderhorst (1997), Hollanda'nın Amsterdam-Utrecht şehirleri arasında seyahat eden aynı türdeki yüksek hızlı yolcu trenlerinin 40-160 km/h arasındaki hızlarda meydana getirdiği çevresel titreşimleri ölçerek, bu veri setini sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmak üzere araştırmacılara sunmuştur. Adolfsson vd. (1999), İsveç'in batı sahil hattında Göteborg ile Malmö arasında faaliyet gösteren X2000 tipi trenlerin 200 km/h

üzerindeki hızlarda meydana getirdiği çevresel titreşimleri kaydetmiştir. Bu çevresel değerlendirme sonuçları, yeni ulaşım sistemlerinin tasarım ve planlama aşamalarında önem kazanmıştır. Crispino ve D'apuzzo (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışma, İtalya'nın Napoli bölgesindeki kültürel miras koruması altındaki tarihi yapılar üzerinde karayolu trafiğinin neden olduğu titreşim etkilerini ölçmeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, İngiliz standardı BS 6472 - 2008'de belirlenen kriterlere göre tespit ettikleri maksimum partikül hızını karşılaştırarak bu titreşim etkilerini değerlendirmişlerdir. Degrande ve Schillemans (2001) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, Brüksel ile Paris arasında test sürüşü yapan Thalys HST tipi yüksek hızlı yolcu treninin 223 ila 314 km/h arasındaki geçiş hızlarında demiryolu ve çevresinde oluşan serbest zemin titreşimleri incelenmiştir. Bu çalışma, 4 ila 72 metre arasındaki 14 farklı gözlem noktasında yapılmıştır. Xia vd. (2005) tarafından yürütülen ayrı bir çalışma ise Çin'in Kuzey-Doğu bölgesindeki Shenyang-Harbin demiryolu hattında faaliyet gösteren yük ve yolcu trenlerinin 20 ila 80 km/h arasındaki geçiş hızlarında ürettikleri titreşimleri incelemiştir. Titreşimler, ana istasyona 12 metre uzaklıktaki seçilmiş yerlerde, 2-3 katlı betonarme binalarda, belirlenmiş bir köprü ayağı (Daqinghe Köprüsü) üzerinde ve köprüye yakın çevresindeki serbest zemin bölgesinde incelendi (köprüden 20 metre aralıklarla 3 ölçüm noktası) incelemişlerdir. Xia vd. (2009), tren kaynaklı titreşimlerin çevredeki zemin ve bina üzerindeki etkilerini araştırmak için bir takım deney gerçekleştirmişlerdir. Çevredeki yerin ve yakındaki binanın hız seviyeleri, tren hızlarının ve tren yüklerinin etkisi dikkate alınmışlardır. Zhang ve Feng (2011), Hu-Ning Demiryolunda deneysel bir yöntem kullanarak yüksek hızlı trenin neden olduğu yer titreşiminin özelliklerini incelemişlerdir. Sanayei vd. (2013, 2014), Boston bölgesindeki farklı yerlerde tren ve metroların neden olduğu zeminden kaynaklanan titreşimi incelemişlerdir. En alt kattan 4 katlı bir binaya titreşim aktarımlarının da tasarımcıların binalar içindeki hassas konumlardaki titreşim seviyelerini tahmin etmelerine olanak tanıyan temeli sağladığı bildirilmiştir. Zou vd. (2015), ayrıca Çin'in Guangzhou kentindeki bir metro deposundaki metro trenleri nedeniyle yerdeki ve 3 katlı bir binanın içindeki titreşimleri de araştırmışlardır. Test hattı ve boğaz bölgesindeki tren operasyonları metro deposundaki ana titreşim kaynaklarıydı. Sonuçlar, metro deposundaki titreşimleri azaltmak için hafifletilen önlemlerin dikkate alınması gerektiğini öne sürmüştür. Trenin neden olduğu titreşimin etkilerini araştırmak için üç ağır yük demiryolu sahasında farklı dolgu zeminde deneyler yapılmıştır (Li vd., 2017). Göktepe vd. (2017), Adapazarı şehir merkezinde faaliyet gösteren banliyö trenlerinin

çeşitli geçiş hızlarının neden olduğu titreşim etkilerini araştırmak amacıyla serbest zemin yüzeyi ve su deposu yapısındaki ivmeölçerleri kullanarak kapsamlı ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Hu vd. (2018), Shenshan Köyü'nde bulunan demiryolu viyadüğü civarında saha ölçümlerine dayanarak kömür taşımacılığı için yük vagonlarının geçişi nedeniyle zeminden kaynaklanan titreşimin zayıflamasını incelemişlerdir. Ren vd. (2019), Çin-Şanghay şehrindeki yumuşak zemin bölgelerinden geçen yüksek hızlı trenlerin meydana getirdiği titreşimleri serbest zemin yüzeyi ve temel yapısında ölçerek, bu titreşim etkilerinin yayılma ve azalma özelliklerini incelemişlerdir.

Bina hasarı ve insan konforu açısından titreşim seviyeleri çok yüksek tahmin edilirse, tren kaynaklı titreşimi azaltmak için titreşim azaltma yöntemleri uygulanabilir. Bu azaltma önlemleri titreşim kaynağı, yayılma yolu ve bina temeli dahil olmak üzere her iletim sürecinde uygulanmaktadır (Bahrekazemi, 2004; Vogiatzis ve Kouroussis, 2015b). Zemin tabakası boyunca titreşim aktarım sürecinin grafiksel bir gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Dalga bariyeri olarak açık veya içi dolu hendekler kullanılarak titreşim yalıtımı, çoğunlukla tercih edilen basit, maliyet açısından rekabetçi ve hızlı bir yöntem olabilir. Sayısal simülasyonlar kullanılarak tren kaynaklı titreşimi azaltmak için izolasyon bariyerleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır (Adam vd., 2000; Yang ve Hung, 2001; Yang vd., 2003; Adam ve Estorff, 2005; Lombaert vd., 2006; Çelebi vd., 2009; Çelebi ve Kırtel, 2013; Bose vd., 2018).



Şekil 1.1 : Tren kaynaklı titreşimin iletim süreci

Türkiye'de Yüksek Hızlı Tren (YHT) yolcu taşımacılığının yakın zamanda başlamış olması ve ulaşım sistemlerinin henüz yeni olması, olası çevresel sorunların önceden tahmin edilememesine neden olmuştur. Ayrıca, mevcut araştırmaların genellikle demiryolu üstyapı titreşimleri ve gürültü kirliliğine odaklanmış olması, bu çalışmayı çevresel titreşimlerin yerinde incelenmesi üzerine odaklanmaya yönlendirmiştir. Bu

çalışmanın amacı ilk olarak, tren kaynaklı titreşimlerin etkisini araştırmak amacıyla, 200-250 km/h tren hızına sahip İstanbul-Ankara yüksek hızlı demiryolu çevresinde, zemin yüzeyinde titreşim ölçümleri yapılmlştır. İlk olarak, demiryolu hattına oldukça yakın bir alanda serbest zemin titreşimleri kaydedilecek ve YHT trafiğinin neden olduğu zemin titreşimlerinin mesafe ile nasıl azaldığı incelenecektir. İkinci olarak, titreşim ölçümlerinden elde edilen veriler sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayalı kurulacak sayısal modeli doğrulamak için kullanılacaktır. Zemin kaynaklı titreşimleri incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayalı üç boyutlu bir sayısal model oluşturulacaktır. Daha sonra, doğrulanmış model kullanılarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) tanımlanmış olan farklı zemin sınıfları için tren kaynaklı titreşimlerin (farklı tren hızlarında) etkisi serbest zemin ve bina üzerinde incelenecektir. Son olarak, doğrulanmış model kullanılarak yüksek hızlı trenin neden olduğu çevresel titreşimlerin etkisi insan konforu ve yapısal hasar açısından Alman (DIN 4150-2/3, 1999) ve Amerikan (FTA, 2006) yönetmeliklerine göre kabul edilebilecek titreşim seviyeleri için karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır.

Son olarak, ANSYS yazılımı kullanılarak yığma yapı tipindeki binaların dinamik davranışı incelenecek ve aynı zamanda demiryolu titreşimlerinin yakındaki betonarme yapılar üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla parametrik çalışmalar gerçekleştirilecektir.

1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada, YHT demiryolu hattına yakın noktalardan alınacak ivme kayıtlarından yararlanarak davranış spektrum eğrilerinin farklı tren hızı ve farklı zemin sınıflarına göre elde edilmesi ve bu hız tasarım eğrilerine bağlı olarak dünya standartlarıyla uyumlu titreşim etkilerinin değerlendirilebileceği bir Türk standardının hazırlanmasına temel teşkil edecek kaynak bilgilerin oluşturulması amaçlanmaktadır. Yeni sanayi tesislerinin ve buna bağlı olarak yerleşim yerlerinin demiryolu trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde açılması istenmesi durumunda, yapı güvenliğinin, konutlarda yaşayacak sakinlerin, endüstriyel yapılarda çalışanların ve titreşime duyarlı cihazlara bağlı imalatın çevresel titreşimlerden olumsuz etkilenmemesi için kent yönetimleri ve şehir planlayıcıları fizibilite çalışmalarında bu kaynak bilgiye başvurabileceklerdir.

Çalışmanın ilk aşamasında, YHT trenlerinin geçişi sırasında demiryolu üstyapısının yakın çevresinde ortaya çıkan titreşim etkilerini yerinde inceleyebilmek adına, alüvyon

zemin koşullarındaki (zemin kayma dalga hızı < 200 m/s) serbest zemin titreşimleri ölçülmüştür. Yapılan bu çalışmada, parametrik çalışmaların yapılmasına temel teşkil edecek sayısal modelin kurulması ve doğrulanması için bu saha ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için seçilen saha, Sakarya'nın Sapanca ilçesinde konumlanan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (SUBÜ) Kırkpınar Turizm Meslek Yüksekokulu'nun uygulama oteli ve sosyal tesislerinin bulunduğu yerleşkedir. Bu alanın seçilmesinin en önemli nedeni yüksek hızlı demiryolu hattına yakın olması ve başka çevre titreşimlerinden uzak olmasıdır. Demiryolu hattına dik ve paralel olarak konumlandırılacak ivmeölçerler vasıtasıyla hızlı tren geçişleri sırasında oluşacak serbest zemin titreşimleri kayıt edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, sonlu eleman analizlerinin yapılacağı sayısal modelin kurulması ve doğrulanması yapılmıştır. Bu amaçla sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 3D Ultimate yazılımı kullanılarak hızlı tren-hızlı tren hattı-zemin ortamı modellenmiş ve modelin doğrulanması da saha ölçümlerinden alınan titreşim kayıtları ile yapılmıştır. Bu bölümün sonunda ölçüm yapılan ortamı ve hızlı tren etkisi en iyi ifade edecek sayısal model kurulmuştur.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, zemin özelliklerinin ve tren hızlarının tren kaynaklı titreşimler üzerindeki etkisini araştırmak için doğrulaması yapılan sayısal model kullanılarak serbest zemin için titreşim analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, farklı zemin özelliklerine sahip ortamlardan ve farklı hızla geçen tren etkilerinin oluşturduğu serbest zemin titreşimleri sonlu eleman analizleri ile elde edilmiştir. Elde edilen ve zamana bağlı değişen bu titreşimler kullanılarak ilgili kayıtlara ait davranış spektrum eğrileri hesaplanmıştır.

Çalışmanın dördüncü aşamasında, farklı serbest titreşim özelliklerine sahip olan betonarme yapı modellerinde farklı zemin özellikleri için, hızlı tren etkisi altındaki tepkileri elde edilerek uluslararası standartların (DIN 4150-2/3, 1999 ve FTA, 2006) tanımlamış olduğu eşik seviyeler ile değerlendirme yapılmıştır. Yapılacak olan değerlendirmeler doğrultusunda Türkiye'deki hızlı tren geçişleri için bir değerlendirme ve yorumlama yapılabilecek ulusal bir norma altyapı hazırlayacak bir sonuç ortaya konmuştur.

Çalışmanın beşinci aşamasında, ANSYS yazılımı kullanılarak yığma yapı tipindeki binaların dinamik davranışı incelenmiş ve aynı zamanda demiryolu titreşimlerinin

yakındaki betonarme yapılar üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla parametrik çalışmalar yapılmıştır.

1.2. Tezin Yapısı

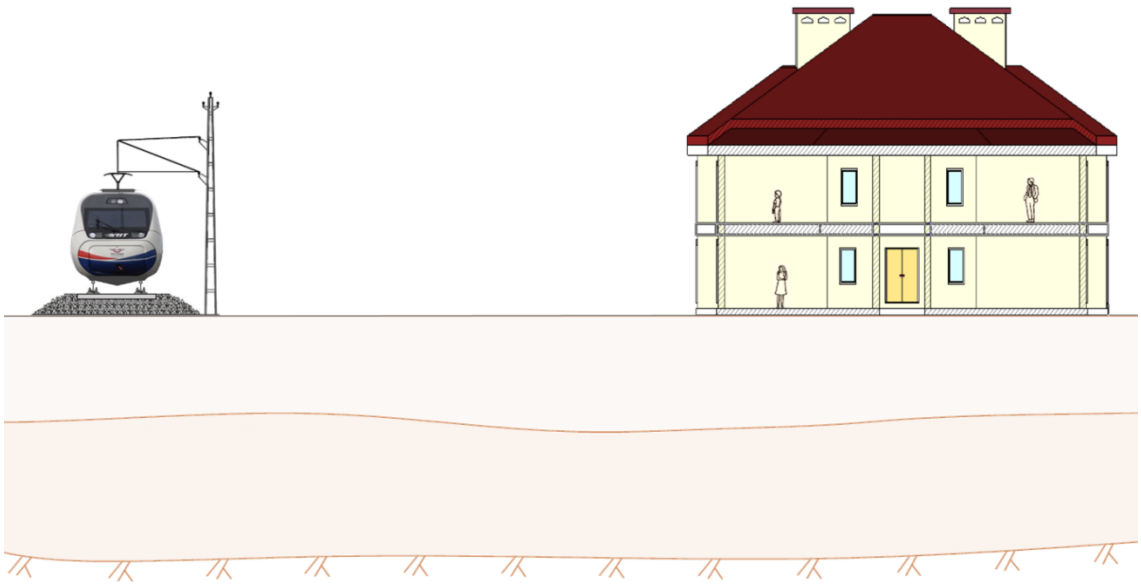
Bu tez, giriş bölümü de dahil olmak üzere yedi bölüme ayrılmıştır.

- Bölüm 2, demiryolu kaynaklı zemin titreşimlerine genel bir bakış sunmaktadır. Bu bölümde, zemin titreşimleri ve dalga yayılımı ile ilgili bazı kavramlar ve temel teoriler anlatılmıştır.
- Bölüm 3, kullanılan yöntem ve ekipman biçiminde saha ölçümlerini ve elde edilen sonuçları sunmaktadır.
- Bölüm 4, gerçekleştirilen sayısal simülasyonları içerir. Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 3D Ultimate yazılımı kullanılarak hızlı tren-demiryolu platformu-zemin ortamı modellenmiştir ve modelin doğrulanması saha ölçümlerinden alınan titreşim kayıtları ile yapılmıştır.
- Bölüm 5'te, doğrulanmış sayısal model kullanılarak farklı zemin özelliklerine sahip ortamlardan değişken hızla geçen, hızlı tren etkilerinin serbest zeminde oluşturduğu titreşimler sonlu eleman analizleri ile elde edilmiştir. Daha sonra, farklı serbest titreşim özelliklerine sahip betonarme yapı modellerinde hızlı tren etkisi altında meydana gelen tepkilerin uluslararası standartların tanımlamış olduğu eşik seviyeler ile karşılaştırması yapılmıştır.
- Bölüm 6'da, ANSYS programı kullanarak yapı davranışını daha detaylı ele alan kapsamlı bir sayısal analiz ile tren kaynaklı titreşimlerin yakındaki binalar üzerindeki etkisi incelenmiştir.
- Bölüm 7, bu tezin ana bulgularını ve sonuçlarını özetlemekte ve araştırma katkılarını vurgulamaktadır. Tez boyunca kullanılan kaynakların bir listesi 7. bölümden sonra sunulmuştur.

BÖLÜM 2. ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI

Yer titreşimi terimi genellikle zemini iletim ortamı olarak kullanan insan yapımı faaliyetlerin neden olduğu titreşimi ifade eder ve bu, depremler ve diğer sismik olaylar gibi doğal titreşimlerin tersidir. Zemin kaynaklı titreşimin, zeminin kendisi için herhangi bir sorun oluşturması gerekmez. Zemin, titreşimi yakındaki binalara götüren bir yol olabilir.

Yer titreşim kaynaklarının örnekleri, patlamalar, inşaat faaliyetleri ve trafiktir. Bu tezde, demiryolu trafiğinin neden olduğu titreşimlere odaklanılmaktadır (Şekil 2.1). Demiryolu kaynaklı titreşim çalışmaları, yüksek hızlı trenlerin tanıtılmasıyla birlikte titreşimlerle ilişkili çevresel sorunların daha fazla bilinmesi nedeniyle son yıllarda daha önemli hale gelmiştir. Bu bölüm, yer titreşimleriyle ilgili bazı temel teorileri detaylandırmakta ve demiryolu kaynaklı yer titreşimlerinin iletim sürecini daha ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Ayrıca, zemin kaynaklı titreşimler, hem zeminde hem de bir binaya nasıl yayıldıkları ve zemin kaynaklı titreşim ölçümleri için uluslararası standartlara göre nasıl ölçüldükleri bir fenomen/olay olarak açıklanmaktadır.



Şekil 2.1 : Demiryolunun neden olduğu yer titreşimlerine genel bakış.

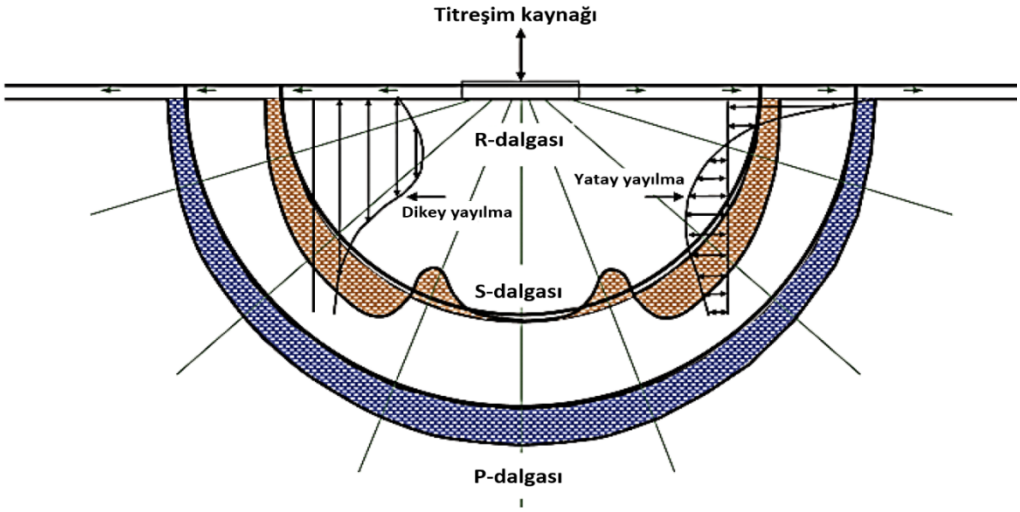
2.1. Zemin Titreşimlerinin Esasları

Yerdeki titreşimler, farklı mekanik dalgalar kullanarak hareket eder. Zemin dinamiğinde, dalga yayılımının incelenmesi bu nedenle önemlidir. Bu bölümde, dalgaların yayılmasını etkileyen fenomenlerle birlikte yer titreşimleriyle ilgili farklı dalga türleri açıklanacaktır. Yayılan dalgaların özellikleri büyük ölçüde malzemeye bağlı olduğundan, dinamik zemin özellikleri de tartışılacaktır.

2.1.1. Zemin ortamında dalga yayılma olayı ve tipleri

Hızlı tren geçişi esnasında meydana gelen titreşimleri zemin ortamında kaynaktan uzağa yayılacaktır. Dalganın hızı, içinden geçtiği malzeme özelliklerine bağlıdır. Dalgalar farklı şekillerde meydana gelir: malzeme içinde var olan cisim dalgaları (basınç dalgası ve kayma dalgası) ve yüzey dalgaları (Rayleigh ve Love dalgaları).

Dinamik yük kaynaklarının (ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik akış yükleri, büyük inşaat faaliyetleri, patlamalar vb.) oluşturduğu enerji dalgaları, zemin ortamında meydana gelen deformasyonlara bağlı olarak iletilir. Yer içinde ilerlerken, farklı türdeki sismik dalgalar, zemin katmanlarının sınırlarında yansıma, kırılma ve difraksiyon gibi etkileşimler nedeniyle dalga yayılma doğrultusunda değişiklik gösterirler. Bu kırılma ve yansıma olaylarıyla ilgili yapılan çalışmalarda, her zemin katmanının kendine özgü niteliklere sahip olduğu vurgulanmıştır. Hız kayacın yoğunluğuna ve elastikliğine bağlıdır. Dalgalar yoğun ve rijit materyallerde hızlı; daha az yoğun ve plastik olanlarda daha yavaş ilerler. Dalga hızı, derinde kayaçların yoğun olması nedeniyle derinlerde artar. Sismik dalgalar bir ortamadan diğerine geçerken dalganın geçtiği yolda yön değiştirir. Yansır da kırılır. Zemin ortamında yayılan sismik dalgalar, cisim dalgalarını ve arazi yüzeyinde yayılan yüzey dalgalarını içermektedir. Geçen bir trenin sonucu olarak zeminde yayılan başlıca dört tür dalga vardır; bunlar cisim dalgaları (P-dalgaları ve S-dalgaları) ve yüzey dalgalarıdır (Rayleigh dalgaları ve Love dalgaları). Bu dalgaların özellikleri mevcut literatürde detaylıca tanımlanmıştır (Achenbach 1973; Richart ve diğ., 1970; Kramer 1996; Haupt 1977, 1978).



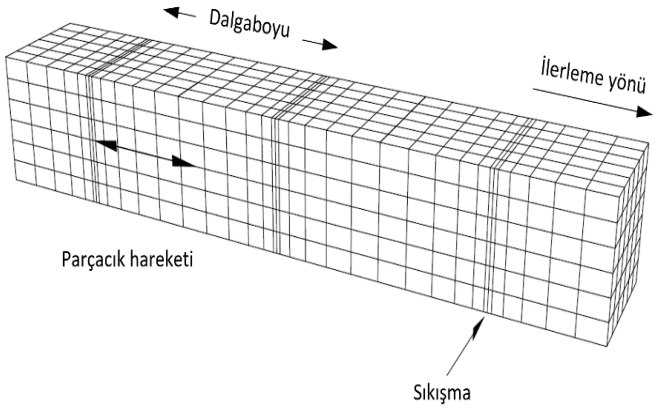
Şekil 2.2 : Zemin titreşiminin yayılma şekilleri (Leonardi ve Buonsanti, 2014).

2.1.1.1. Cisim dalgaları

Cisim dalgaları, kaynaktan bütün yönlere doğru yayılarak, yer kabuğu içerisinde seyahat ederler. Bu dalgalar, yerin derinliklerinde yüzeyine kıyasla daha hızlı bir şekilde yayılır ve zemin içindeki hareketlerine bağlı olarak basınç dalgaları (P-dalgaları) ve kayma dalgaları (S-dalgaları) olarak iki kategoriye ayrılır.

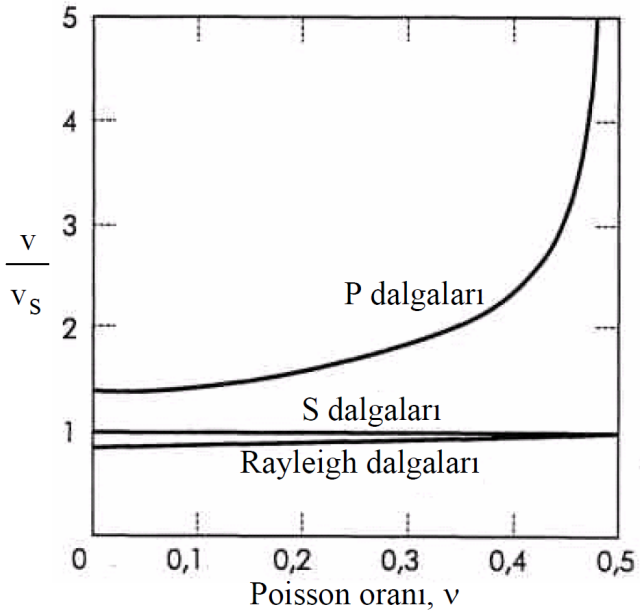
P-dalgaları

Zemin ortamında en hızlı yayılan ve sismograflar tarafından ilk tespit edilen dalgalar, birincil (Primer) olarak bilinen, basınç veya boyuna dalgalardır. Hızları, yayıldıklan zemin ve kaya ortamının yoğunluk ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu dalgalar nedeniyle, dalganın yayılma doğrultusundaki parçacıkların ileri-geri hareketi sonucunda yer basıncına ve çekmeye maruz kalınmaktadır (Şekil 2.3). Hareketi ses dalgasıyla aynıdır. Basınç-çekme hareketi nedeniyle, P-dalgaları geçtikleri ortamlarda hacim değişikliğine neden olurlar. P-dalgasının genel yapısı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Birincil dalgası (P-dalgası) yayılma şekli.

Bu dalgaların en önemli özelliklerinden biri, her türlü ortamda (katı, sıvı ve gaz) ilerleyebilme yetenekleridir.Hızları diğer dalga türlerine göre büyüktür (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Rayleigh dalgası ve cisim dalgası yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi (Kramer, 1996).

P-dalgaları (birincil veya basınç dalgaları), kısmen yüksek yayılma hızına ve uzun dalga uzunluklarına sahip uzunlamasına dalgalardır. Bu dalgalar esas olarak aşağı doğru zemin ortamına yayılır. Yayılma hızı zeminin yoğunluğuna bağlıdır ve daha yüksek yoğunluklar için daha yüksek hızlar meydana gelir. Basınç dalgasının yayılma hız aralığı zemin ortamlarında 300 m/s - 2700 m/s arasındadır (Karslı ve diğ., 2020).

P-dalgasının yayılma hızı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\upsilon)}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)\rho}} \tag{2.1}$$

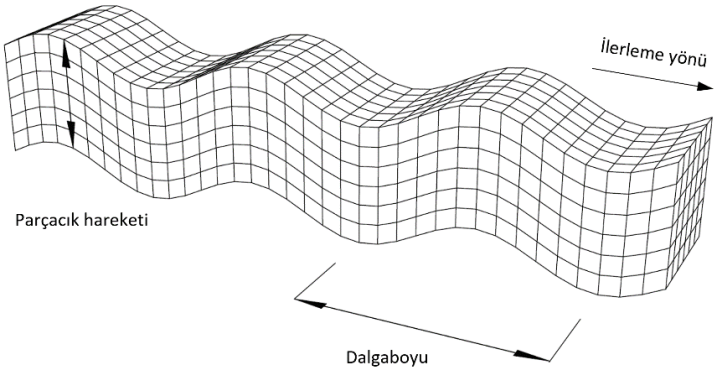
Burada, E elastisite modülünü, ρ yoğunluğu ve ν Poisson oranını ifade etmektedir. Formülasyonda yer alan G kayma modülü için aşağıdaki bağıntı kullanılır:

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{2.2}$$

S-dalgaları

Ikincil (sekonder), kayma veya enine dalga olarak da tamınlanır. Hızları, P dalgasının %60 ile %70'i kadardır ve P dalgaları gibi yayıldıkları zemin ve kaya ortamının yoğunluk ve elastik özelliklerine bağlıdır. S dalgaları yayılırken, tanecikler Şekil 2.5'te gösterildiği gibi yayılma doğrultusuna dik, aşağı-yukarı veya sağdan-sola doğru titreşirler. Bu yayılma özellikleri, kesme ve burulma hareketi gibi ortamdaki şekil bozukluğuna neden olabilir. S dalgaları, sıvılar ve gazlar gibi kesme kuvvetlerine karşı direnci olmayan, yani rijitliği sıfır olan ortamlarda yayılamazlar. Bu nedenle sadece, katı ortam içerisinde ilerlemektedirler.

İki bileşeni bulunan bu dalgalar, yatay ve düşey düzlemlerde hareket eder. Yayılma doğrultusuna dik olan düşey düzlemdeki bileşene "SV," yatay düzlemdeki bileşene ise "SH" adı verilmektedir. SV bileşeni sismografların düşey bileşeninde, SH bileşeni ise diger iki yatay bileşende (kuzey-güney ve doğu-batı) rahatlıkla gözlenebilmektedir. Yer kabugundaki kaya tabakalarında hareket ederken, bu dalgalar kaya tabakaları arasında yansıyabilmekte veya kırlabilmektedir. Dalgalar, yansıdıklarında veya kırıldıklarında, enerjinin bir kısmı diğer dalga tiplerine dönüşmektedir. Yaygın bir örnek olarak, bir P dalgasının yukarı yönde ilerleyerek alüvyon bir tabakanın altına çarpmasıyla enerjisinin bir kısmı P dalgası olarak alüvyonlu tabakanın üst kısmına ve bir kısmı da S dalgasına dönüşerek yukarıya geçmektedir. Geri kalan kısmı da P ve S dalgası olarak geri yansımaktadır. S dalgası hareketinin genel yapısı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : Kayma dalgası (S-dalgası) yayılma şekli.

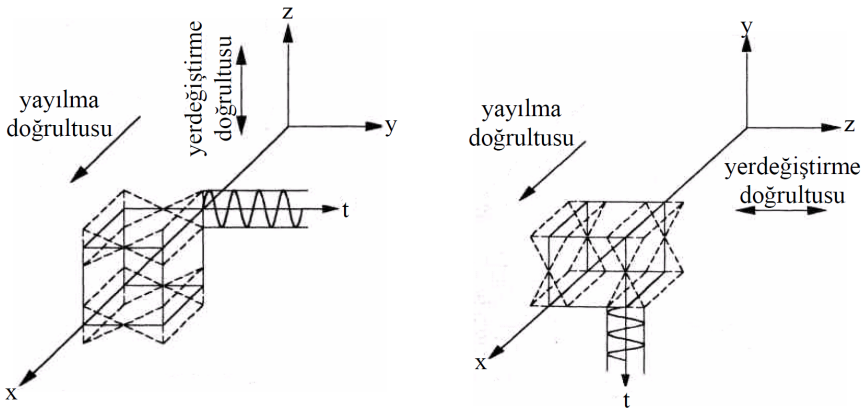
S-dalgaları veya ikincil dalgalar, P-dalgalarından biraz daha yavaş hareket ederler ve sadece katı malzemeler içinde yayılabilirler, sıvılarda ise ilerleyemezler. S-dalgaları, malzemenin içinde hareket yönüne dik bir şekilde kayarak kayma birim değişikliklerine neden oldukları için kayma dalgaları olarak bilinirler.

S-dalgaları, genellikle ortama eğik olarak yönlendirilen, P-dalgalarından daha kısa dalga boylarına ve zemin ortamları için kabaca 800 m/s seviyelerine kadar değişen hızlara sahip dalgalardır (EC 8, 2004). Kayma dalgaların farklı frekansları farklı hızlarda yayılır.

S-dalgasının yayılma hızı aşağıdaki bağıntısı ile ifade edilmektedir:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{2.3}$$

Verilen ilişkilerden anlaşıldığı üzere, P-dalgasının sonsuz bir ortamda yayılma hızı, S-dalgasının yayılma hızından en az √2 kat daha hızlıdır (Geniş ve Gerçek, 2000). Bu dalga hareketinin özel durumlarında, yatay ve düşey düzlemlerde meydana gelen Yatay Kayma Dalgası (SH-Dalgası) ve Düşey Kayma Dalgası (SV-Dalgası) adını verdikleri farklı dalga türleri ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.6).



a) SV dalgası b) SH dalgası

Şekil 2.6 : SV-dalgası ve SH-Dalgası yayılma şekli (Kramer, 1996).

2.1.1.2. Yüzey dalgaları

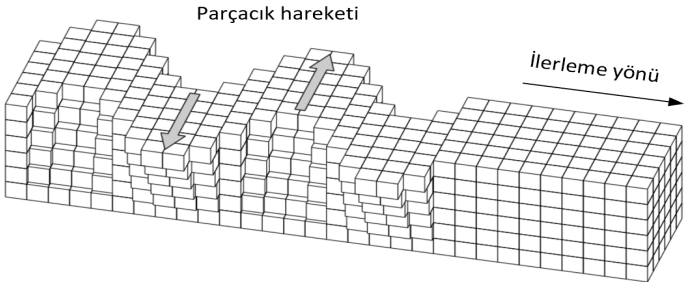
Yüzey dalgaları, yeryüzünde veya yüzeyin hemen altında hareket eder ve cisim dalgalarından daha yavaş bir hızla ilerlerler. Cisim dalgalarının neden olduğu ani sarsıntı ve salınmanın aksine, yüzey dalgaları genellikle bir kayıkta hissettiğimiz gibi bir yalpalama veya ileri geri sallanma hareketi yaratırlar. Yüzey dalgalarının birkaç türü tanımlanmıştır, ancak en önemli ikisi Rayleigh dalgaları (R-dalgaları) ve Love dalgaları (L-dalgaları) olarak adlandırılır ve bu isimler, bu dalgaları keşfeden kişilerin adlarından gelir.

Sismik bir kaynaktan çıkarak yer kürenin serbest yüzeyi boyunca yayılan yüzey dalgaları, cisim dalgalarından daha yavaş olarak ilerler. Deprem veya patlatma gibi yüzeye yakın herhangi bir sismik kaynaklı enerji, yüzeyin hemen altında bulunan neredeyse sonsuz bir ortamda dalgalar halinde yayılır. Bu tip dalgaların hareketi, suyun bir gölde yayılan dalgalarına benzer bir dalgalanma şeklini alır. Yüzey dalgaları, cisim dalgalarına kıyasla daha düşük frekans içeriğine sahiptir. Bu düşük frekanslı ve büyük genlikli dalgalar, birçok depremde yapıların zarar görmesine neden olan bir tür olarak bilinir. Love ve Rayleigh olmak üzere başlıca iki tür yüzey dalgası bulunmaktadır.

Love dalgaları

Love dalgaları, Rayleigh dalgalarından daha hızlı bir seyahat hızına sahiptir. Bu nedenle, sismograflarda genellikle Rayleigh dalgalarından önce kaydedilir ve genellikle "L" harfi ile gösterilir. Ancak, bu iki dalga arasındaki hız farkı, sismograflar üzerinde gözlenemeyecek kadar küçüktür. Love dalgalarının oluşabilmesi için elastik ve

neredeyse sonsuz bir yüzey katmanının bulunması gereklidir, ve bu görevi yer kabuğu üstlenmektedir. Love dalgaları, yerin serbest yüzeyi ile yer kabuğunun alt sınırı arasında meydana gelen ardışık yansımalar sonucu oluşan SH dalgalarıyla ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, bu dalgalarının geçtiği ortamda tanecikler, tamamen yayılma doğrultusuna dik, yani x- veya y-düzleminde titreşmektedirler (Şekil 2.7).



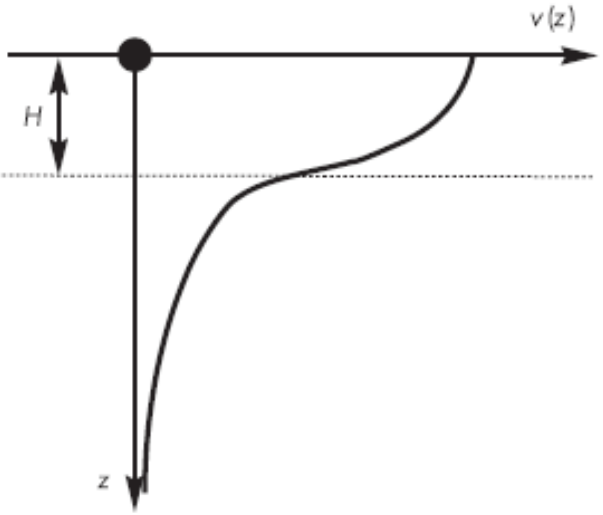
Şekil 2.7 : Love dalgası yayılma şekli.

Love dalgası çok daha karmaşık bir dalgadır. Daha yüksek kayma dalgası hızına sahip bir malzemenin, daha düşük kayma dalgası hızına sahip bir diğer malzemenin üzerinde bulunduğu yüzeyin yakınında bir Love dalgası oluşturulabilir. Love dalgası hızı aşağıdaki çözüm ile ifade edilmektedir:

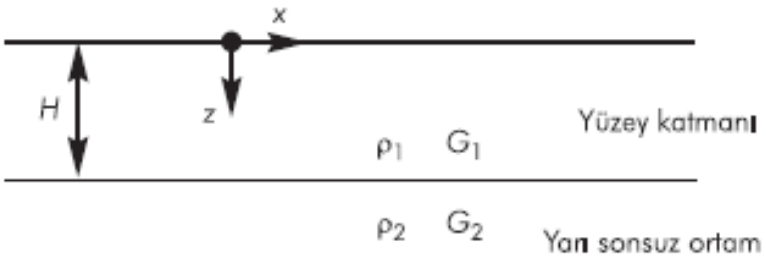
$$\tan \omega H \left(\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2} \right)^{1/2} = \frac{G_2}{G_1} \frac{\sqrt{\frac{1}{v_L^2} - \frac{1}{v_{s2}^2}}}{\sqrt{\frac{1}{v_{s1}^2} - \frac{1}{v_L^2}}} \tag{2.4}$$

Burada, V_{s1} ve V_{s2} sırayla 1 ve 2 No'lu malzemenin kayma dalgası hızları ve V_L: Love dalgası hızıdır.

Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, Love dalgası yerdeğiştirme genliğinin yüzeydeki katmanda sinüsoidal olarak değiştiğini ve alttaki yarı sonsuz ortamda derinlikle birlikte üssel olarak sönümlendiğini gösterir. Bu sebepten dolayı Love dalgaları genellikle yüzey katmanı içinde kapanlanmış SH dalgaları olarak tanımlanmaktadır.



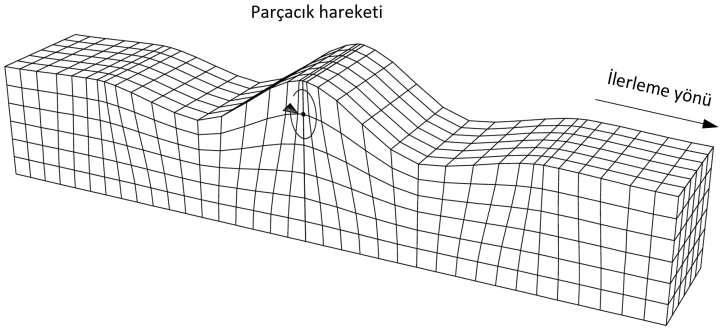
Şekil 2.8 : Love dalgalarında partikül yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi (Kramer, 1996).



Şekil 2.9 : Elastik yarı sonsuz ortam üzerine gelen yumuşak yüzey katmanının ($G_1/\rho_1 < G_2/\rho_2$) şematik gösterimi. Love dalgalarının var olabileceği en basit şartlar (Kramer, 1996).

Rayleigh dalgaları

Rayleigh dalgaları, tıpkı bir su birikintisinde (göl, deniz) yayılan dalgalar gibi, yerin yüzeyinde yuvarlanarak ilerleyen dalgalardır (Bkz. Şekil 2.10). Yerkürenin yüzeyi boyunca yayıldıkları sırada Rayleigh dalgaları, bir tür yuvarlanma hareketi gerçekleştirirler. Bu nedenle, bu dalgaların geçtikleri ortam içindeki tanecikler, yayılma doğrultusunda ters bir elips hareketi yaparlar. Rayleigh dalgaları genellikle daha yavaş ilerler ve su dalgalarına benzer bir davranış sergiler; bu dalgalar, malzemenin taneleri dalga hareketi yönünde dikey bir düzlem içinde elips şeklinde bir yol izleyerek su dalgalarına benzer bir şekilde hareket ederler.



Şekil 2.10 : Rayleigh dalgası yayılma şekli.

Rayleigh tipi yüzey dalgaları, parçacık hareketinin düzlemi boyunca yayılan dalgalardaki yatay ve dikey bileşenlerin birleşimini temsil eder. Bu dalgalar, P ve S dalgalarının birleşimine benzetilebilir. Bu özel türdeki dalgalar, ortamdaki parçacıkları eliptik bir hareketle etkiler veya bu harekete dik olarak zeminde giderek artan frekansta salınım oluşturur. Bu dalga tipinde yerdeğiştirmeler, yüzeye yakın bölgelerde çevrimsel bir harekete sebep olurken, serbest yüzeyden derinlere inildikçe azalmaktadır. Parçacıklar yayılma yönünde ve yayılmaya dik olarak hareket ederler. Yayılma hızı, kayma dalgalarının hızından biraz daha düşüktür (genellikle %10 daha yavaş).

Rayleigh dalgasının yayılma hızı (V_R), cisim dalgaları (V_P ve V_S) ve Poisson oranı (ν) ile ilişkilendirilerek aşağıda belirtildiği gibi hesaplanabilir (Alzawi, 2011).

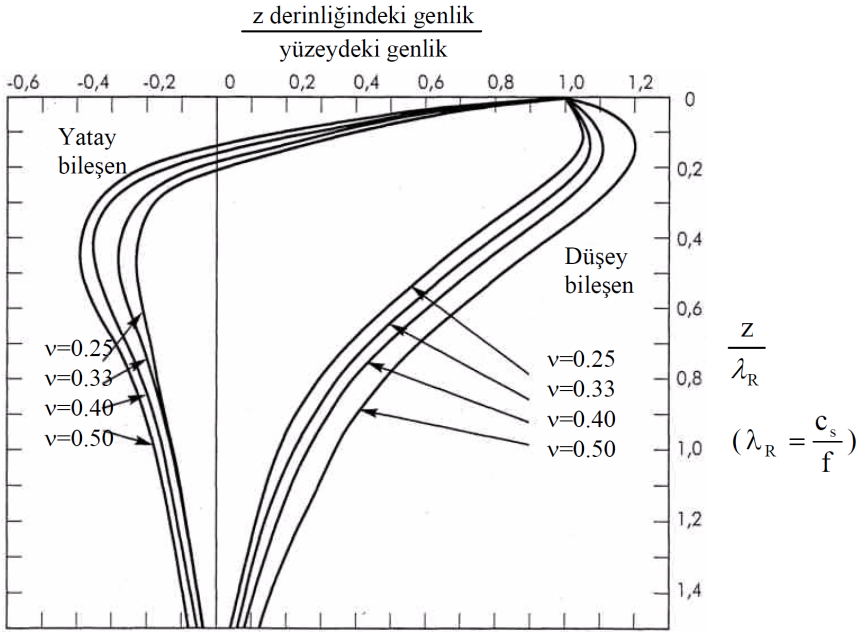
$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \tag{2.5}$$

Burada; $K = V_R / V_S$ ve $\alpha = V_S / V_P$ ile ifade edilmektedir.

Bu tip dalgalar, S dalgalarına kıyasla dalga yayılma doğrultusunda biraz daha yavaş hareket ederler. Rayleigh dalgasının hızını hesaplamak için genellikle aşağıdaki denklem kullanılır (Alzawi, 2011).

$$V_R = \frac{0.862 + 1.14\upsilon}{1 + \upsilon} V_s \tag{2.5}$$

Bu dalga türlerini diğerlerinden ayıran temel özellik, titreşim genliklerinin derinlikle hızla azalmasıdır. Rayleigh dalga hareketinin titreşim genlikleri, derinlikle olan ilişkisi Poisson oranına bağlı olarak Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Rayleigh Dalgalarının yatay ve düşey hareketi (Kramer, 1996).

Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, düşey yerdeğiştirme maksimum değere ulaştığında, yatay yer değiştirme sıfır konumundadır. Aynı biçimde, ν=0.25'e sahip kohezyonsuz bir zeminde, z/λR=1 derinliğindeki serbest yüzeyde dikey titreşim genliği %20 seviyesine erişir. Bu durumdan anlaşılıyor ki z/λR=2 derinliğinde, düşey titreşim belirgin bir şekilde gözlemlenmeyecek düzeydedir. Dalga hareketinin düşey yer değiştirme bileşeni, belirli bir derinlikten sonra sürekli olarak azalırken, yatay yer değiştirme bileşeni derinliğe bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Yüzeyde Rayleigh dalgalarının genliği, elastik bir ortamda dairesel bir temel plağının harmonik dış yükle sarsılması sonucu ortaya çıkan enerjinin dağılımı göz önüne alındığında %67 olarak belirlenmiştir. Bu durum, lineer elastik izotrop bir yarı uzay zemin ortamında bulunan rijit dairesel temel plağının Poisson oranının ν=0.5 olduğu bir senaryoyu içermektedir. Geri kalan enerjinin %26'sının kayma dalgaları tarafından, %7'sinin ise basınç dalgaları tarafından taşındığı dikkate alındığında, yüzeyde Rayleigh dalgalarının taşıdığı enerjinin oranı bu belirli koşullar altında %67'dir.Yüzeyde Rayleigh dalgalarının genliği:

$$\frac{1}{\sqrt{r}} \tag{2.6}$$

P ve S dalgalarının genliği ise;

$$\frac{1}{r} \tag{2.7}$$

ile azalmaktadır. Burada, r ifadesi, dalga kaynağına olan mesafeyi simgeliyor. Diğer bir ifadeyle, yüzey dalgaları, cisim dalgalarına kıyasla önemli ölçüde daha yavaş bir şekilde sönümlenirler (Kramer, 1996).

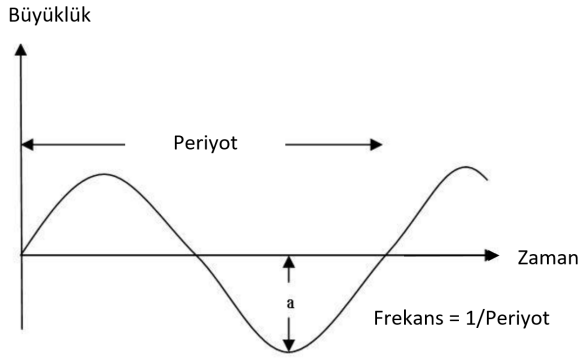
Tablo 2.1' de cisim ve yüzey dalgalarının temel özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 2.1 : Hacim ve yüzey dalgalarının genel özellikleri (URL-1, 2023).

Dalga Türü	Partikül Hareketi	Tipik Hızı	Temel Özellikleri
P: Sıkışma, (Compressional), Birincil (Primary), Boyuna (Longitudinal) isimleriyle bilinir.	Yayılım doğrultusunda sıkıştırma genişleme şeklinde hareket sergiler. Bu nedenle, ilerleme doğrultusu her noktada dalga cephesine diktir.	üst kabukta V_P ~ 5–7km/h,manto ve çekirdekte V_P>~8km/h,suda V_P 1.5km/h, havada 0.3km/h	Dalga türleri içerisinde en hızlı hareket eden. Bu nedenle kayıtlarda ilk görülen fazdır. Kayıtlarda diğer dalga türlerinden daha küçük genlikli (düşük enerjili) fakat yüksek frekanslarda bulunur. Sıvılarda basınç ve gazlarda ses dalgası (akustik) olarak görülür.
S: Kayma (shear), ikincil (secondary), enine (transverse) isimleriyle bilinir.	Partikül hareketi, yayılım doğrultusuna diktir. Yayılım doğrultusuna dik iki doğrultuda kutuplaşma gösterir. Düşey düzlemde kutuplaşan bileşeni SV, ve yatay düzlemde kutuplaşan bileşeni, SH olarak bilinir.	üst kabukta,V_S ~ 3–4km/h, mantoda>~4.5km/h, iç çekirdekte ~2.5-3.0km/h	S-dalgaları sıvılar içerisinde hareket edemez. Bu nedenle, dış çekirdekte (likit demir özelliği gösterir), havada, erimiş magma veya suda görülmez. S dalgası P dalgasından daha düşük bir hızla hareket eder. Bu nedenle, kayıtlarda ikincil olarak görülür. Love dalgaları yeryüzeyi boyunca bulunurlar.
L: Love türü yüzey dalgası (surface wave), büyük dalgalar (long waves) isimleriyle bilinir.	Love dalgalarında partikül hareketi, yayılım doğrultusuna dik yatay düzlemdedir ve genel olarak yeryüzeyine paraleldir.	kabukta, yayılan dalganın frekansına bağlı olarak V_L~ 2.0-4.5km/h	Yeryüzeyinde en büyük genlikli dalgadır ve genlikleri derinlikle üstel azalır. Love dalgaları tabakalı ortamlarda dispersif özelliği gösterir, Diğer bir ifadeyle, Yayılım hızı frekansa bağlı olarak değişir. Genel olarak, düşük frekanslarda yüksek

			hızla yayılır. Love dalgalarının penetrasyon derinliği' de frekansa bağlıdır. Düşük frekanslarda büyük derinliklere iner. Hızları S dalgalarından küçük fakat oldukca yakın bir hızla seyehat ederler (V_L 0.87~0.92V_S)
R: Rayleigh türü yüzey dalgası (surface wave) büyük Dalgalar (long waves), ground roll isimleriyle bilinir.	Rayleigh dalgalarında partikül hareketi, dalga yayılım doğrultusunda ve dalga yayılım doğrultusuna dik düzlemde bileşenleri mevcuttur. Bu nedenle, partikül hareketi eliptik şekildedir. Bu tür harekete retrograde hareketi (düşey düzleme göre ters yönde dönme) denir.	kabukta yayılan dalganın frekansına bağlı olarak V_R ~ 2.0-4.5km/h	Rayleigh dalgaları Love dalgaları gibi tabakalı ortamlarda dispersif özellik gösterirler. Genlikleri derinlikle üstel azalır. Görünüşleri ve partikül hareketleri su dalgalarına oldukca benzerlik gösterir.

Dinamik etkiye bağlı olarak oluşan dalgalara dair özellikleri tanımlamak için periyot (T), genlik (a) ve frekans (f) gibi terimler yaygın olarak kullanılır (Bkz. Şekil 2.12). Bir tam dalga oluşması için geçen süre periyot olarak adlandırılırken, dalganın denge konumundan maksimum sapmasına genlik ve bir saniyede üretilen dalga sayısına frekans denir. Cisim dalgalarının genellikle yüksek periyot içeren yüzey dalgalarından daha hızlı yayıldığı gözlemlenir. Bu nedenle, aynı parçacık hızına sahip cisim dalgalarına kıyasla, yüzey dalgaları zemin ortamında daha büyük deformasyonlara neden olabilir.



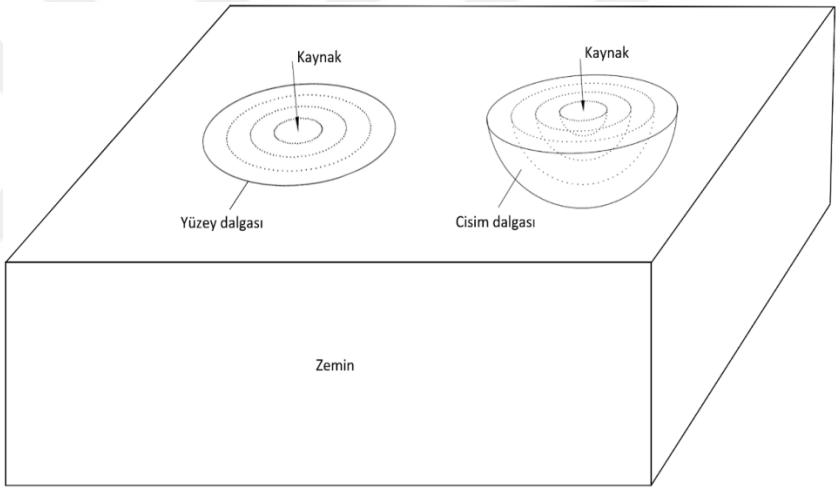
Şekil 2.12 : Rayleigh Dalgalarının yatay ve düşey hareketi (Yıldıray, 2000).

Kaynakta titreşim oluştuktan sonra dalgaların yayılması başlar. Dalga yayılması genellikle üç boyutlu bir sorundur, çünkü dalgalar birçok yönde yayılabilir, ancak

zeminin bir yüzeye sahip olması gerçeğiyle sınırlıdır. Matematiksel modellerde, bu tip geometri genellikle yarıuzay olarak adlandırılır. Yarıuzayda yayılan dalgaların genel özelliklerini etkileyen birkaç parametre vardır, bunlardan bazıları bu bölümde tartışılacaktır.

2.1.1.3. Geometrik azalım

Dalgalar bir kaynaktan yayıldığında, kaynaktan olan mesafe arttıkça titreşimler azalacaktır. Azalma kısmen geometrik zayıflamadan kaynaklanır, yani kaynaktan uzaklık arttıkça dalga cephesi daha geniş bir alana yayılır ve bu da yoğunlukta bir azalmaya neden olur. Şekil 2.13'te gösterildiği gibi, cisim dalgaları ve yüzey dalgaları geometrik zayıflama açısından farklı davranır. Cisim dalgaları zeminde her yöne yayılır ve bu nedenle yüzey dalgalarına göre daha fazla geometrik zayıflamaya maruz kalır.

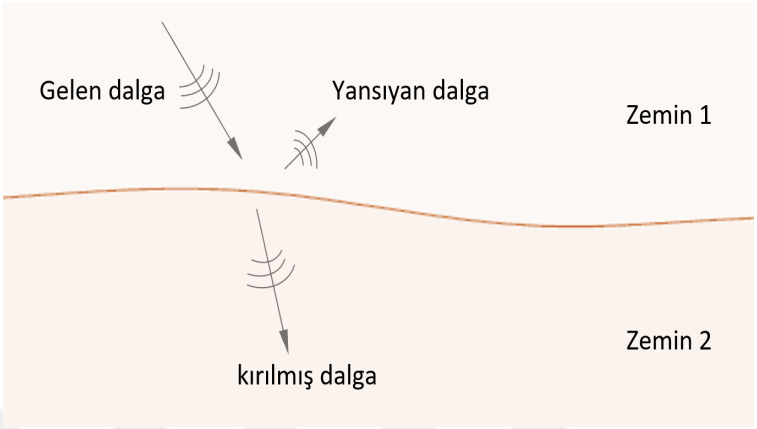


Şekil 2.13 : Cisim dalgaları ve yüzey dalgaları için geometrik azalım (Nils, 2016).

2.1.1.4. Yansıma ve kırılma

Dalgaların yayıldığı zemin, genellikle ana kayanın üstünde bir veya daha fazla zemin tabakasından oluşur. Bir dalga cephesi iki malzeme arasında bir arayüz ile karşılaştığında, yansıma ve kırılma yaşar (Şekil 2.14). Bazı dalgalar geri yayılır (yansıtılır) ve bazıları yeni malzemede devam eder (kırılır). Bir dalga, bir ortamdan diğerine geçerken, gelen dalganın bir kısmı yansırken diğer bir kısmı ise iki ortam arasındaki sınırdan geçerek yoluna devam eder. Bu ikinci ortama geçen dalgaya "kırılmış dalga" adı verilir. Yansıyan ve kırılan dalgaların genlikleri ve açıları, geliş açısına ve iki malzemenin empedansına bağlı olarak değişiklik gösterir. Empedans, dalga hızı ile zemin ortamının yoğunluğunun çarpılması ile elde edilir ($z = \rho v$).

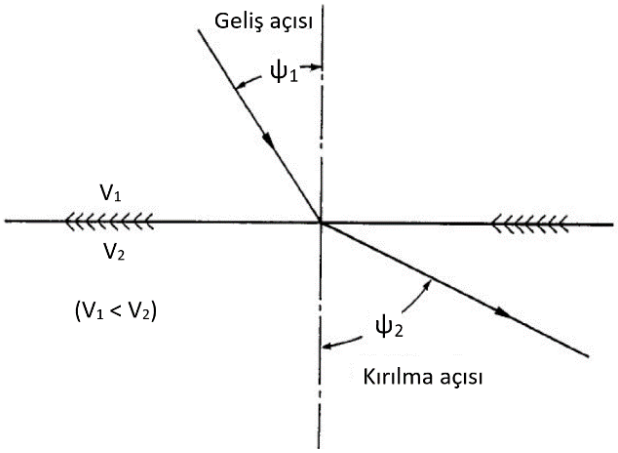
Herhangi bir tür dalga, farklı özelliklere sahip iki malzeme arasında bir arayüzle karşılaştığında, dalganın bir bileşeni, farklı bir dalga uzunluğu ve genliği ile kaynak malzemeye geri yansıtılacaktır. Kalan bileşen sınırın üzerinden geçecek ve farklı dalga uzunlukları ve genliklere sahip farklı türlerdeki dalgalara kırılabilir.



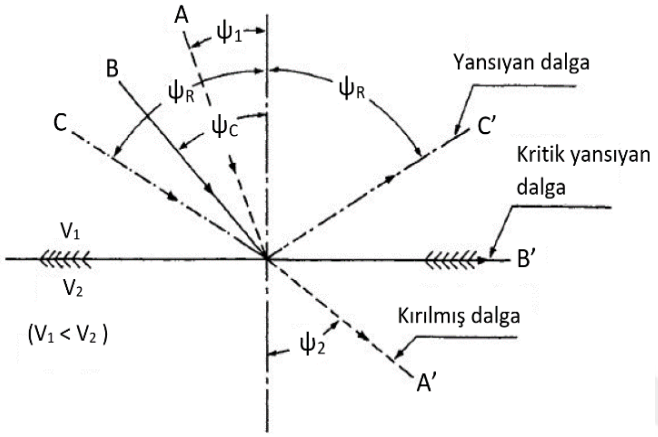
Şekil 2.14 : Bir dalganın yansıması ve kırılması.

Bir cisim dalgası, Snell kuralına göre farklı rijitliğe sahip iki ortamın arayüzüyle karşılaştığında kırılır veya yansır. Dalgaların gelen açısı (ψ_1) kritik açıdan (ψ_c) daha küçükse, dalga kırılır ve yayılır. Kırılma açısı (ψ_2) geliş açısından daha büyükse, Şekil 2.15'te gösterildiği gibi dalganın ikinci ortamda daha hızlı hareket ettiği varsayılmaktadır ($V_2>V_1$). Ancak, gelen dalga kritik açıdan daha büyük bir açıya sahipse, dalga, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi aynı açı (ψ_R) ile ilk ortama yansıtılır (Yeşim, 2016).

Ishihara (1996) kırılma koşulu çalışmalarına göre, yüzey tabakası boyunca dalga yayılma hızı V_1, alt tabaka boyunca V_2 ve H, yüzey tabakasının kalınlığıdır. A noktasında bir titreşim verildiğinde, en önemli dalgalar, biri yüzeyden geçen (doğrudan dalga) ve diğeri B noktasına inen, arayüz boyunca ilerleyen ve C 'noktasına ulaşan dalgalardır (kırılmış dalga). Şekil 2.15'te gösterildiği gibi, gelen ve kırılan dalganın açısı sırasıyla ψ_1 ve ψ_2 olarak gösterilmektedir.

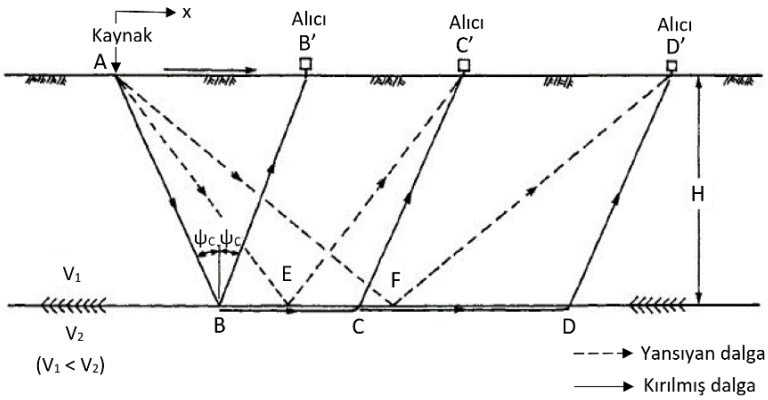


Şekil 2.15 : Bir arayüz boyunca dalga yayılmasının kırılması (Ishihara, 1996).



Şekil 2.16 : Bir arayüz boyunca dalga yayılmasının kırılması (Ishihara, 1996).

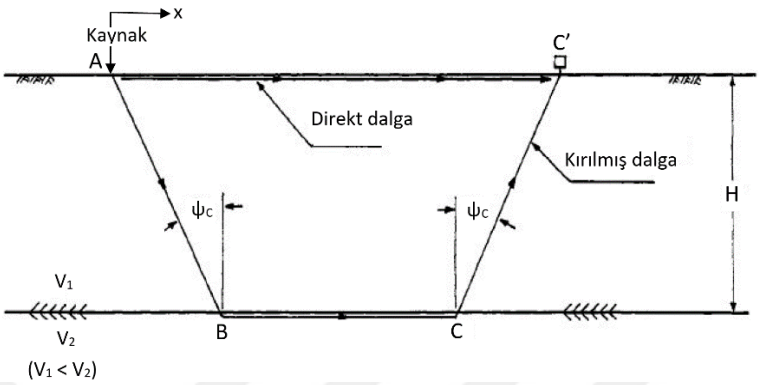
P dalgası en hızlı olanıdır ve önce gelir, böylece zemin yüzeyindeki bir izleme noktasında kolayca gözlemlenebilir ve tanımlanabilir. Bu bilgi ve yukarıdaki teori kullanılarak zemin ortamındaki dalga yayılma hızları hesap edilebilir. Şekil 2.17'de olayın şeklini göstermektedir (Ishihara, 1996).



Şekil 2.17 : Yansıyan ve kırılan dalgalar için yayılma yolları (Ishihara, 1996).

Eğer t_d, A kaynağından B', C' veya D' gibi (Şekil 2.18) bir noktaya doğrudan P dalgasının varış zamanı ise, yayılma hızı şu şekilde hesaplanabilir:

$$V_1 = \frac{x}{t_d} \tag{2.8}$$

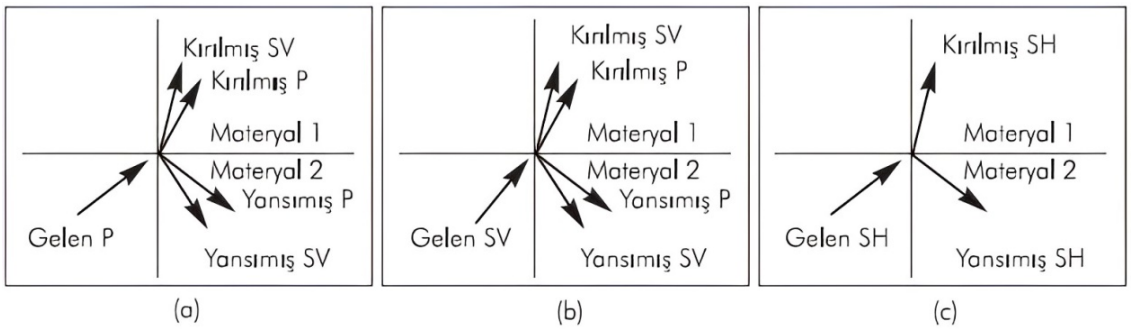


Şekil 2.18 : Kırılan bir dalganın geçiş yolu (Ishihara, 1996).

Snell kuralına göre, dalga yayılma hızı ile açılar arasındaki oran aşağıdaki gibidir:

$$\frac{Sin\psi_1}{Sin\psi_2} = \frac{V_1}{V_2} \tag{2.9}$$

Ortamda gelen dalga türüne göre yansıyan ve/veya kırılan dalgalarda da çeşitlilik görülebilir. P, SV ve SH dalgalarından türeyen dalga çeşitleri Şekil 2.19'de gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : Gelen (a) P dalgasından, (b) SV dalgasından ve (c) SH dalgasından yansıyan ve kırılan ışınlar (Kramer, 1996).

2.1.2. Zeminin dinamik özellikleri

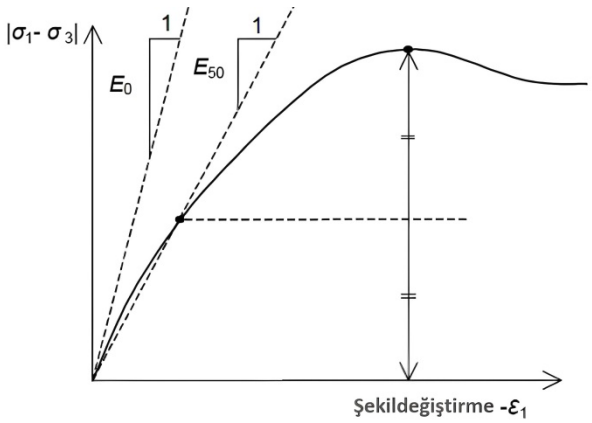
Zemin ortamındaki dalgaların yayılması büyük ölçüde zemin koşullarına bağlıdır. Bu bölümde, dinamik problemlerle ilgili bazı zemin özellikleri tartışılacaktır.

2.1.2.1. Yapısal bağlantılar

Zemin malzemesini matematiksel modellerde tanımlamak için, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi önemli bir ölçüdür. Elastisite modülü (E), gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimidir ve doğrusal bir elastik malzeme için bu sabit bir değer alır.

Elastisite modülü değerlendirmelerinde iki ayrı yaklaşım mevcuttur. İlk yöntem, üç eksenli deneylerden elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıç eğiminden hesaplanan başlangıç elastisite modülü olan E_0'ı içerir. Diğer bir yöntem ise deviatorik gerilmenin ($|\sigma_1-\sigma_3|$) maksimum değerinin %50'sine denk gelen gerilme değerinden türetilen ve E_{50} olarak adlandırılan sekant elastisite modülüdür (Şekil 2.20). Konsolide kil ve bazı kayaçlarda, elastik davranış aralığı geniş olduğu için E_0'nin tercih edilmesi daha gerçekçi bir seçenektir. Kum ve normal konsolide kil zeminlerde, yüklemenin başlamasının hemen ardından doğrusal olmayan bir gerilme-deformasyon ilişkisi gözlendiğinden, bu tip zeminler için E_{50}'nin kullanılması daha doğru bir yaklaşım sunacaktır.

Zemin gerçekte doğrusal elastik bir malzeme değildir. Örneğin depremler sırasında şekil değiştirme büyükse, plastisite ihmal edilemez. Bununla birlikte, küçük gerilmelerle uğraşırken, tipik olarak insan kaynaklı oluşan titreşimler için geçerli olan doğrusal bir elastik malzeme modeli yeterli olabilir. Demiryolunun neden olduğu yer titreşimleri için deformasyonlar belirli noktalarda doğrusal olmayabilir, örneğin rayın hemen altında veya çok yakınında, ancak titreşim kaynaktan daha uzak mesafelerde belirgin bir etkiye sahip değildir.



Şekil 2.20 : E_0 ve E_{50} elastisite modüllerinin tanımlanması (Gabriella ve Zoltán, 2004).

2.1.2.2. Homojenlik

Zemin, mineral tanelerden oluşan bir agrega ve su içinde ayrışabilir. Ancak kaya, minerallerin güçlü ve kohezyonlu bağlarla birbirine bağlı olduğu ve kolayca ayrışmayan bir yapıya sahiptir. Zemin, tek parçacıklardan oluşan tanecikli bir malzeme olup ve gerçekte katı (solid) değildir. Artan derinliklerle birlikte, zeminler genellikle giderek daha fazla sıkışır ve sertleşir. Zemin ayrıca farklı özelliklere sahip birkaç zemin tabakasından oluşabilir. Ayrıca, bazı zeminler çok çeşitli parçacık (partikül) boyutlarını içerebilir. Katı homojen bir malzeme varsayılabilirse, sayısal modeller ve hesaplamalar büyük ölçüde basitleştirilir. Zemin dinamiğinde, bu varsayım, heterojenlikler dalgaların dalga boylarına kıyasla küçükse kullanılabilir. Demiryolunun neden olduğu yer titreşimleri için, özellikle düşük frekanslar ilgi çekicidir. Örnek olarak, birçok zeminin kayma dalgası hızları genellikle 100 m/s üzerindedir. 50 Hz'lik bir frekans değeri için dalgaboyu 2 m olarak hesaplanır ise, bu değerin zemin ortamındaki tekil parçacıklardan daha büyük olduğu ve bu nedenle zemin ortamlarının homojen bir malzeme olarak ele alınması uygun olabilir (Nils, 2016).

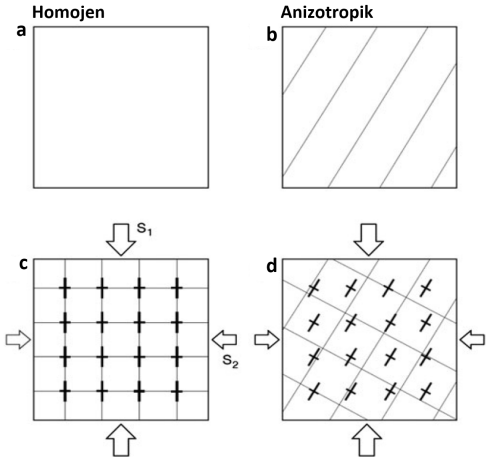
Dalga boyu, herhangi bir dalga örüntüsünün tekrarlanmış birimleri arasında yer alan mesafeye denilmektedir. Dalga boyu genel anlamda frekans ile ters orantılı olup dolayısı ile de dalga boyu uzadıkça frekans azalmaktadır. Dalga boyu hesaplama formülü aşağıdaki gibidir:

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{2.20}$$

Burada; λ dalga boyu, v dalga yayılım hızı ve f dalganın frekansı olarak bilinmektedir.

Homojenlik, "bileşimin tek biçimliliği"dir (Khatibi, 2013). Bu, malzemenin tamamının aynı özelliğe sahip olması gerektiği anlamına gelir, bu da düzenli bir kütle oluşturur. İzotropi, malzemenin her yönde eşit fiziksel özellik veya eylem sergilemesidir (Khatibi, 2013). Yön farkı, anizotropi anlamına gelir. Jeofizik, jeoteknik ve jeolojide pratik olarak farklı anlamları olduğu için teknik olarak jeofizikteki tanım olarak dikkate alınmaktadır. Neredeyse, tüm doğal zeminler, özelliklerinde oldukça değişkendir ve nadiren homojendir. Zemin heterojenliği iki ana kategoriye ayrılabilir. Birincisi, daha sert/daha yumuşak bir ortama gömülü ince yumuşak/sert tabakalar şeklinde veya farklı litolojiye sahip ceplerin daha muntazam bir zemin kütlesine dahil edilmesi şeklinde ortaya çıkabilen litolojik heterojenliktir. İkinci heterojenlik kaynağı, farklı çökelme koşulları

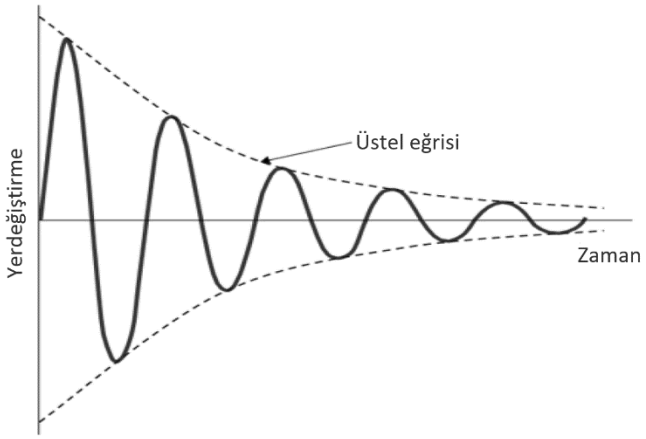
ve farklı yükleme geçmişleri nedeniyle zemin özelliklerinin uzayda bir noktadan diğerine değişimi olan içsel mekansal zemin değişkenliğine atfedilebilir.



Şekil 2.21 : (a) Homojen, (b) anizotropik ve (c-d) malzeme, ana gerilme yönünü ve büyüklüğünü etkilenmesi (Stephansson ve Zang, 2012).

2.1.2.3. Sönüm

Titreşimlerin azalmasına katkıda bulunan bir diğer faktör de zemindeki enerji kaybıdır. Zemin titreştiğinde, örneğin bireysel zemin parçacıkları arasındaki sürtünme nedeniyle enerji dağılır. Zeminlerin sönüm özelliklerini anlamak, dinamik sorunların çözümü açısından, özellikle de zeminlerde dalga yayılımı ve deprem yükleriyle karşılaşıldığında zemin davranışı konusunda büyük bir öneme sahiptir. Titreşim kaynağından yayılan enerji, zemin tabakalarını geçerek yapıyı titreştirir. Bu titreşim, yerin serbest yüzeyinden yansır, binanın içinde yukarı doğru ilerler, en üst kattan yansıyarak geri döner ve zemin içindeki neredeyse sonsuz ortamda geriye doğru yayılır. Bu süreçte enerjinin bir kısmı kalıcı olarak kaybolur. Bu sönüm, enerjinin büyük bir ortamda yayılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkar ve ortamın elastik sabitleri, kütle yoğunluğu ve yapı özelliklerine bağlıdır. Yapı sertleştikçe, mesnet ortamı yumuşadıkça ve zemindeki dolgu ana kayaya yaklaştıkça, enerjinin mesnet ortamında yayılması sebebiyle sönüm artar.



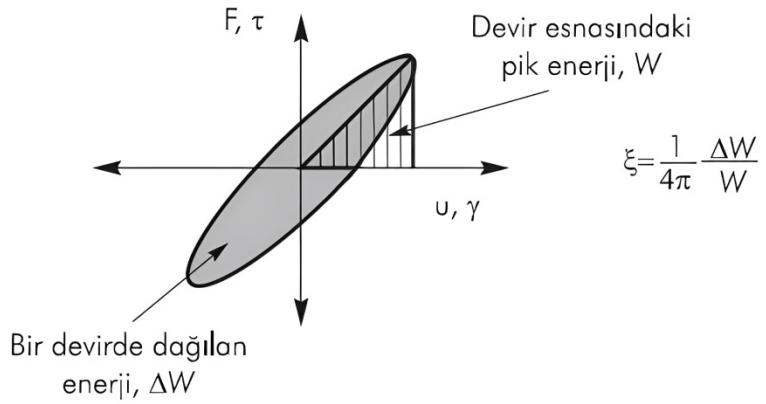
Şekil 2.22 : Bir SDOF sisteminde sönüm (Abílio, 2015).

Histeretik sönümü (Malzeme sönümü)

Titreşimler kaynaktan uzağa yayılma yönünde ilerler. Dalga kaynaktan uzaklaştıkça dalganın genliği azalır. Genlikteki bu düşüş hem malzeme sönümünden hem de geometrik sönümünden kaynaklanır. Malzeme sönümü, parçacık dalgalarla birlikte hareket ederken malzeme içindeki sürtünme yoluyla mekanik enerji kaybıdır. Mekanik enerji ısı enerjisine aktarılır. Bu sönüm, dalga hızına (başka bir malzeme özelliği) ve dalganın frekansına (yükleme senaryosuna bağlı olarak) göre değişen bir malzeme özelliğidir.

Histeretik sönümü, zemin elemanlarındaki sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybının neden olduğu bir iç sönüm şeklidir. Enerji dağılımı sırasında, zemin elementlerinde depolanan elastik enerjinin bir kısmı, zemin tanelerinin kenarlarını ve yapılarını tahrip etmek veya ses, ısı vb. enerjiye dönüştürmek için tüketilir (Tatsuoka ve diğ., 1978a). Bu tür sönüm, frekansa bağlı değildir ve hız ile aynı fazda olup sistemin yer değiştirmesiyle orantılıdır.

Histeretik sönümü, bir sönüm oranı biçiminde ölçülür. Bu oran, çevrimsel yükleme (ΔW) bir zemin elemandaki sönüm enerjisi veya yayılma enerjisinin elastik enerjiye veya döngüsel yükleme (W) zemin elementinde depolanan enerjiye oranı olarak tanımlanır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 : Histerez döngüsü ve sönümleme oranı arasındaki ilişki (Kramer, 1996).

Zemin için sönüm oranı, genliklerinin aralığına bağlı olarak laboratuar testlerinden elde edilir. Kayma birim şekildeğiştirme genliğine bağımlılık, kayma gerilmesinin artmasıyla zeminin kayma modüllerinin azalması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. 10^{-4} değerinden daha düşük kayma gerilmemi için kesme modülü değerleri, Rezonans-Kolon yöntemi ile doğru bir şekilde yakalanabilir. 10^{-4} değerinden büyük kayma gerinim seviyesinde, zemin elastik olmayan malzeme gibi davranır ve daha büyük sönümüne sahiptir (Priyanka, 2016).

Deney laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda (Vucetic ve Dobry, 1991), zemin rijitliğinin; devirli deformasyon genliğine, boşluk oranına, ana eksensel etkili gerilmeye, plastisite indeksine, aşırı konsolidasyon oranına ve yükleme devir sayısına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.Kayma modülü, düşük değerdeki birim şekil değiştirme genliklerinde yüksek değerler alırken, artan birim şekil değiştirme genliği değerleri ile azalma gösterir. Histeritik döngü üzerindeki bu gezinme iskelet eğrisini oluşturur. Tablo 2.1'de, değişik faktörlerin G_{max}, G_{max}/G ve sönüm oranı ξ üzerindeki etkileri özetlenmiştir.

Tablo 2.2 : Konsolide killerin Gmax, G/G_{max}, ve sönüm oranını değerlerini etkileyen faktörler (Vucetic ve Dobry, 1991).

Değerleri Artan Faktörler	G_{max}	G/G_{max}	ξ
Çevresel basınç	Artar	Sabit kalır/artar	Sabit kalır/düşer
Boşluk oranı	Düşer	Artar	Düşer
Jeolojik yaş	Artar	Artar	Düşer
Çimentolaşma	Artar	Artar	Düşer
OCR	Artar	Etkilenmez	Etkilenmez
Plastisite indisi	OCR>1 ise artar; OCR=1 ise sabit kalır	Artar	Düşer
Devirli birim şekil değiştirme	-	Düşer	Artar
Birim şekil değiştirme	Artar	Etkilenmez	Sabit kalır/artar
Yükleme sayısı	Düşer	Düşer	Etkilenmez

Radyasyon sönümü (Geometrik sönümü)

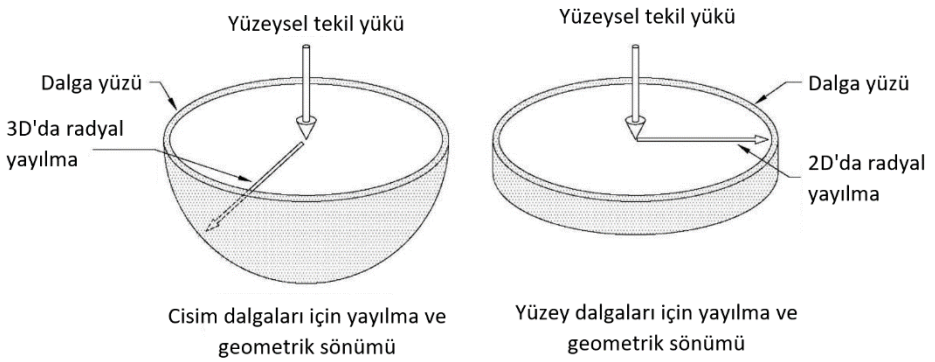
Radyasyon, dağılım veya geometrik sönüm olarak da ifade edilen ve bir ortamda dalga yayılımıyla enerjinin yayılması olarak adlandırılarak en kolay anlaşılan sönüm şeklidir. Geometrik ve malzeme sönümünü ayırt etmek çok önemli ve zordur ve bu sınırlama, sahadaki sönüm ölçümünü daha az güvenilir hale getirir (Park, 1998). Temel ve zemin arayüzünde gerilme dalgaları üretilir. Bu stres dalgaları sıkıştırma (P dalgaları) ve kayma dalgaları (S dalgaları) şeklinde yayılırken, bu dalgalardaki enerji zemin ortamının büyüyen hacmine dağılır. Bu fenomen, Radyasyon Sönümü olarak adlandırılır ve aynı zamanda Geometrik Sönüm olarak da bilinir.

Geometrik sönüm, dalganın enerjisinin kaynaktan uzaklaştıkça daha büyük bir zemin hacmine yayılmasıdır. Bu, herhangi bir konumdaki dalganın yoğunluğunu azaltır, ancak dalganın yayıldığı zemin hacmini artırır. Bir zemin ortamının yüzeyindeki bir tekil yük kaynağından dolayı ortaya çıkan geometrik sönümünü göstermek için Şekil 2.24'te iki durum sunulmuştur. Geometrik sönümünü cisim dalgaları ve yüzey dalgaları üzerindeki etkisi büyük ölçüde değişir. Bu, 2.11 denklemindeki dalgaların ilettiği parçacık hızının azalmasında görülebilir.

$$\vec{v} = r^{-m} \tag{2.31}$$

Burada $\vec{v}$, dalgalar tarafından iletilen en yüksek parçacık hızının fraksiyonudur ve r, kaynaktan uzağa gidilen mesafedir. İletilen dalganın türü faktörü de m değeri ifade edilmektedir. Cisim dalgaları için m değeri 2'ye eşitken, yüzey dalgaları için 0.5'tir. Bu da, dalgalar kaynaktan uzaklaştıkça geometrik sönüme bağlı olarak yüzey dalgası pik

parçacık hızındaki düşüşe kıyasla cisim dalgası pik parçacık hızındaki çok daha büyük düşüşü göstermektedir (Hall, 2000).



Şekil 2.24 : Yüzey noktasal yükü için farklı dalga türleri için geometrik sönümü (Hall, 2000).

Radyasyon sönümü üzerine araştırmalar, büyük ölçüde makine temeli ve sismik analiz alanında yapılmıştır. Daha önceki araştırmacılar, elastik bir uzayda tek boyutlu dalga yayılımı ile viskoz bir sönümleyici arasındaki ilişkiyi kullanarak frekanstan bağımsız radyasyon sönüm katsayısı (C_{rad}) kavramını ortaya koymuşlardır.

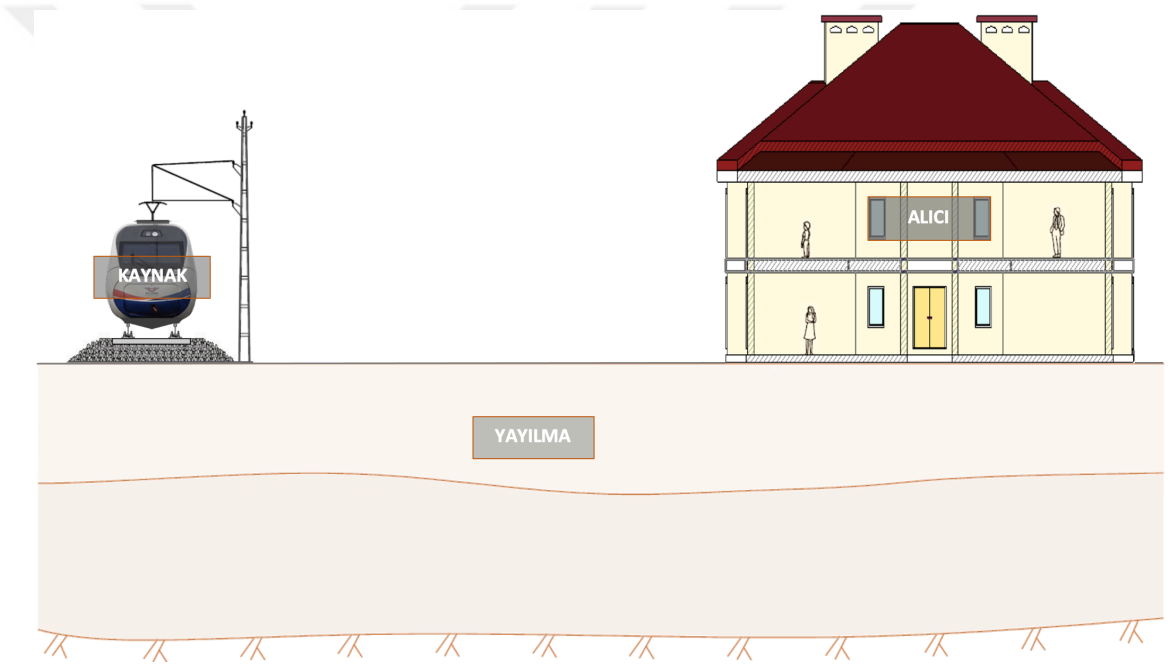
Elastik bir homojen sonsuz uzay için, cisim dalgaları kaynaktan radyal olarak yayılır. Titreşim dalgasının enerjisi ve genlikleri, dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça, mesafeye bağlı olarak azalma gösterir. Bu azalma oranı (w_2/w_1), 1931 yılında Bornitz tarafından formüle edilen aşağıdaki denklemle ifade edilebilir. Denklem, geometrik (radyasyon) sönüm $(r_1/r_2)^n$ ve malzeme sönüm $(e^{(\alpha(r1-r2))})$ olmak üzere iki ana bileşene dayanmaktadır (Bornitz, 1931).

$$\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^n e^{\alpha(r_1 - r_2)} \tag{2.42}$$

r_1 ve r_2, ölçüm noktalarının titreşim kaynağına olan uzaklığı temsil eder. n, geometrik sönüm katsayısı olarak bilinir; α ise malzeme sönüm katsayısıdır. Geometrik sönümleme mekanizması, titreşim kaynağından uzaklaştıkça ortaya çıkan enerji yoğunluğunun frekans bağlamında değişerek azalması şeklinde mesafeye bağlı bir etkileşim gösterir (Kim ve Lee, 2000).

2.2. Hızlı Tren Geçişinin Oluşturduğu Titreşim Etkilerinin Zemin Ortamından Yapılara İletilmesi

Genel olarak tren trafiğine bağlı yer kaynaklı titreşim probleminin üç bölümden oluşur. Bunlar, kaynak, güzergâh ve alıcıdır. Demiryolunun neden olduğu yer titreşiminin analizi, ilk dalga oluşumundan alıcıya kadar farklı faktör nedeniyle karmaşıktır. Sorunun karmaşıklığını kavramak için, tüm aktarım sürecinin anlaşılması gerekmektedir. Bu aktarım sürecinin Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Sorunun belirlenmsi için, bu üç bağlantının her birinin titreşim durumunu nasıl etkilediğini anlamak çok önemlidir. Bu bölümün geri kalanında bu üç bağlantının her biri tartışılacaktır.



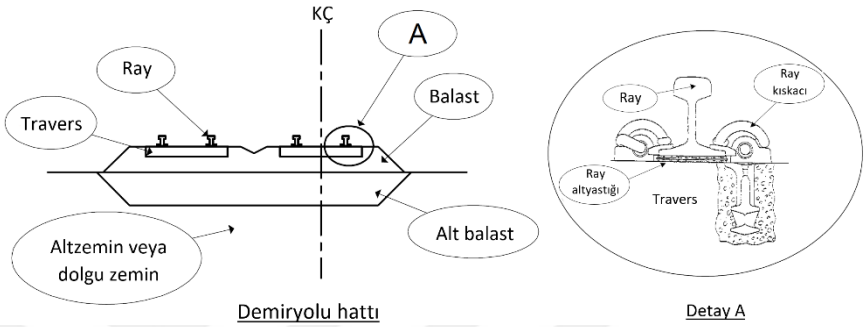
Şekil 2.25 : Demiryolunun neden olduğu yer titreşimleri için iletim süreci.

2.2.1. Titreşim kaynağı

İletim işleminin ilk aşaması, titreşimlerin oluştuğu kaynaktır. Titreşimlerin kaynak bölgesi, tümü ilk titreşim oluşumunda rol oynayan tren, ray yapısı, destekleyici yapı ve çevreleyen zemini içerebilir. Demiryolu hattı, raylar, ray altı yastığı ve ray bağlantı elemanları, traversler, balast ve alt balasttan oluşur. Trafiğin türüne bağlı olarak, demiryolu hattının farklı elemanları farklı özelliklere sahip olabilir. Kaynak oluşturulduktan sonra, titreşimler ray yapısı üzerinden zemine aktarılır (Şekil 2.26). Kaynağın tanımlanması ve ölçülmesi çok karmaşık olabilir, çünkü birçok fenomeni ve

etkileşimi içerir. Madshus vd. göre (1996), ölçümler, demiryolu kaynaklı titreşimlerin doğası gereği stokastik olduğunu göstermiştir.

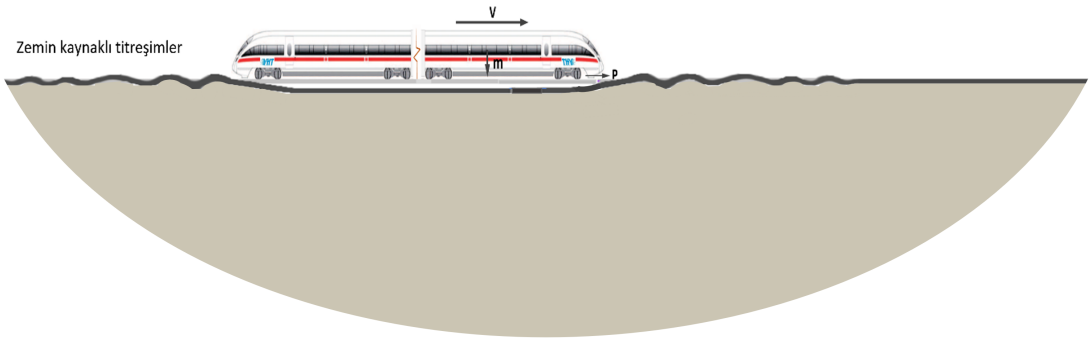
Leonardi ve Buonsanti (2014), tekerlekler ve raylar arasındaki daha büyük kuvvetlerin demiryolu titreşimlerine neden olduğunu belirtmiştir. Kim ve Lee (2000), 125 km/h hızla hareket eden sekiz yolcu vagonlu bir trenin yol açtığı titreşimi ölçmüştür. Balastın etkisiyle titreşim genliğinin 2 cm/s düştüğünü, traversde ise 10 cm/s olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.26 : Tipik bir demiryolu hattı yapısının şematik görünümü (Andersson ve diğ., 2002).

Titreşim oluşumuyla ilgili birkaç mekanizma vardır. Tren tekerlekleri ve ray arasındaki temas, tekerleklerdeki ve ray yapısındaki çeşitli düzensizliklerle birlikte dinamik hareketlendirmeye ve uyarmaya neden olur. Ek olarak, tren hızı belirli kritik hızları geçerse/aşarsa, titreşimlerde daha da fazla artış gözlemlenebilir.

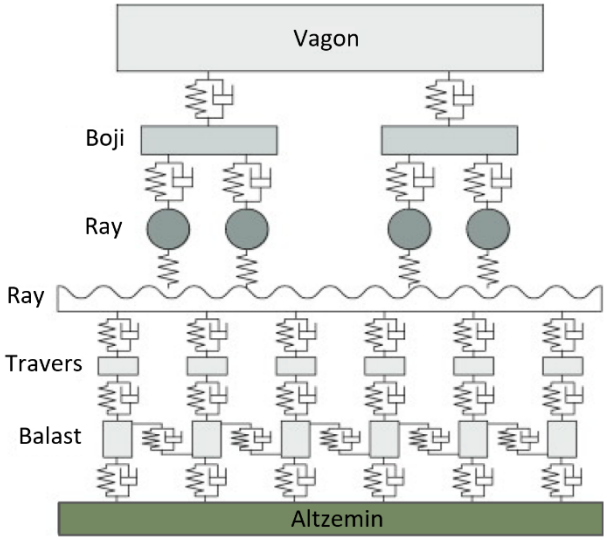
Genel olarak, titreşimin, hareket eden trenin, alttaki zemin üzerinde uzanan ray ile etkileşimi nedeniyle oluştuğuna inanılmaktadır. Bir tren, zemini aşağı doğru iterek bir oluk/çukur oluşturarak kütlesiyle altındaki zemini etkiler (Lindberg, 1992). Tren demiryolu boyunca ilerlediğinde, bu oluk/çukur yerdeki bir kuvvet gibi hareket eder, trenin önünden ve dışarıya doğru yönlendirilir ve yerden kaynaklanan titreşimlere neden olur. Bir tren, altındaki zemini aşağı iterek, trenin altındaki zeminde bir geçişe neden olan bir ray boyunca hareket eder. Bu, trenin önüne itilir ve zemin kaynaklı titreşimlerin yayılmasına neden olan bir kuvveti ortaya çıkar. Tren geçtikten sonra zemin ortamındaki kütle hareketi yerden kaynaklanan titreşimlere neden olabilir. Her iki olay da Şekil 2.27'de gösterilmektedir.



Şekil 2.27 : Yarı sonsuz zemin yüzeyinde hızlı tren geçişi.

Aynı şey tren setindeki tüm vagonlar için de olmakta, bu da titreşen dalgaların birbirini engellemesine, artırmasına ve/veya azaltmasına neden olabilir. Tren setinin yakınında hem P ve hem de S-dalgaları mevcut olabilir ve bu da titreşim modelini dengesiz hale getirir. Demiryolunun ötesinde, titreşimler daha sinüzoidal bir modele sahiptir, çünkü yalnızca Rayleigh dalgaları vardır ve en yüksek frekanslar zemin tarafından filtrelenir. Bu olay, vagonların ve lokomotifin ağır olduğu yük trenleri için daha yaygındır, yolcu trenleri için ise lokomotif ağırdır ve vagonlar genellikle daha hafiftir.

Bir ray boyunca hareket eden bir tren, hem tekerleklerde hem de rayda titreşim üretir. Tekerleğin titreşimi, boji, yayları ve amortisörleri gibi tekerleğin üzerindeki sisteme ve ayrıca aracın yüküne bağlıdır. Rayın titreşimi, rayın altındaki sisteme, yani demiryolu hattına, temel zeminine ve zemine bağlıdır. Titreşim oluşturma açısından trenin ana bölümleri/ parçaları şematik olarak Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Vagon gövdesi, genellikle modern yolcu trenlerinde hava yastığından oluşan ikincil süspansiyon yoluyla bojiye bağlanır. Vagon gövdesinin ağırlığı, birincil süspansiyon sistemi ile tekerleklere bağlanan bir boji çerçevesi aracılığıyla tekerleklere aktarılır. Sırayla tekerlekler, yükü Şekil 2.29'de gösterildiği gibi raylara aktarır. Traversler sırayla balast yatağı tarafından yerinde tutulur. Bununla birlikte, balast yatağının altındaki temel zemin genellikle farklı tabakalardan (homojen olmayan) oluşur ve bu nedenle zeminin esnekliği yol boyunca değişebilir. Böylece, tren vagonu ve demiryolu hattı, ray altyapısı ve zemin ile birlikte birbiriyle etkileşime girmekte ve birçok farklı rezonans frekansında titreşmektedir. Bireysel (individual) elemanların tepkisi (tekerlek, ray, travers, zemin, vb.) genel/bütün bağlı sisteme bağlıdır. Tek bir elemanın belirli bir durum için tam olarak nasıl tepki vereceğini tahmin etmek çok zor olabilir, çünkü etkileyen faktörlerin özellikleri genellikle tam olarak bilinmemektedir.



Şekil 2.28 : Vagon, bojiler, tekerlekler, raylar, traversler ve temel zemin üzerindeki balastın dinamik sisteminin şeması (Connolly ve diğ., 2015).



Şekil 2.29 : Tekerlek ve ray arasındaki dikey ve yatay temas kuvveti (Andersson ve diğ., 2002).

Sonuç olarak, titreşim kaynağı karmaşık bir interaktif/etkileşimli sistemdir ve bu da titreşim oluşumunu doğru bir şekilde tahmin etmeyi çok zorlaştırır, çünkü esas olarak tüm ilgili parametreleri yeterli kesinlikte bilmek zordur.

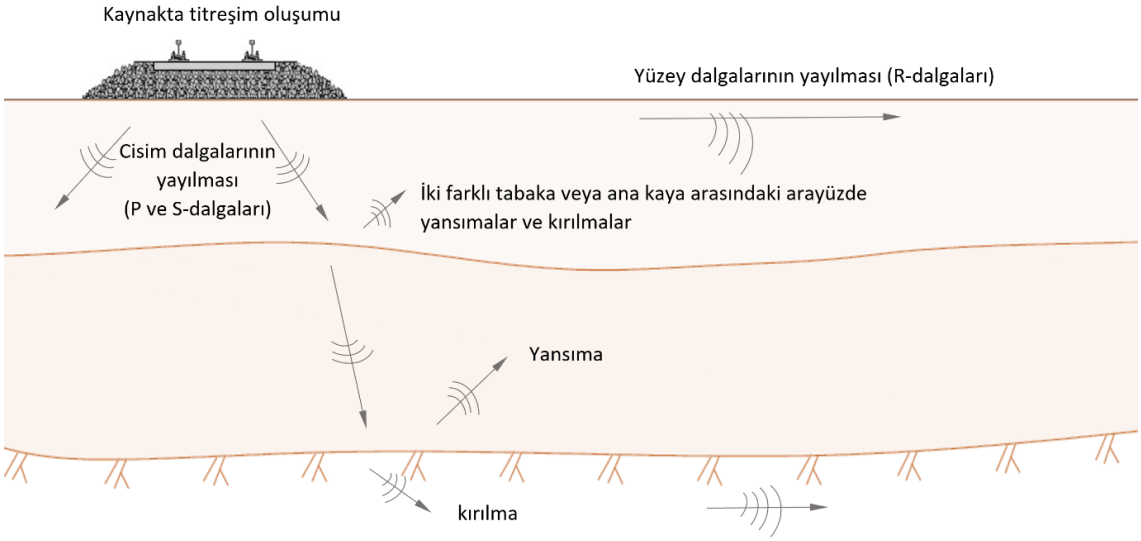
2.2.2. Dalga yayılımı

Demiryolundan kaynaklanan titreşimler için iletim işleminin ikinci bölümü yayılma bölgesidir. Yayılma bölgesi, zemin profilini, yani zemin ve ana kaya katmanlarını ve demiryolu ile alıcı cisim arasına tanımlar. Titreşim oluştuktan sonra zemin harekete geçer ve bu hareket zemin ortamı yoluyla çevreye yayılır. Titreşim enerjisi, cisim ve yüzey dalgaları kullanılarak zemin yoluyla aktarılır. Cisim dalgaları (P ve S-dalgaları) zeminde her yöne hareket ederken ve yüzey dalgaları ise yüzeyde oluşur. Yüzey dalgaları, demiryolunun neden olduğu titreşimlerin analizinde önemlidir, çünkü

kaynağın alanı yayılma bölgesine göre küçük olduğunda, enerjinin çoğu bunlar tarafından aktarılacaktır (Heckl ve diğ., 1996).

Kaynaktan uzaklık arttıkça genellikle titreşimlerin genliği azalır. Bu hem zeminin sonsuzluğunun (geometrik sönüm) ve hem de zemindeki enerji kaybının (sönümleme) bir sonucudur. Yüzey dalgaları, cisim dalgalarına kıyasla daha az geometrik zayıflamaya maruz kalır. Şekil 2.30'de gösterildiği gibi, titreşimlerin mutlaka en kısa mesafeyi kullanarak gitmesi gerekmez. Zemin tabakaları arasındaki veya zemin ile ana kaya arasındaki arayüzdeki yansımalar ve kırılmalar, yayılma yolunu etkileyebilecek olaylardır. Yansımalar ve kırılmalar, cisim dalgalarının alıcıya doğru farklı ve belki de olası olmayan yollardan geçme olasılığı olduğu anlamına gelir. Her dalga türünün yayılma hızı, zemin koşullarına göre belirlenir.

Kaynağın tanımlanmasına kıyasla, yayılma yoluna ilişkin mekanizmaları açıklamak daha kolaydır. Zemin dinamiği alanında daha fazla araştırma yapılmıştır ve bu genellikle daha basit bir yöntemdir. Bununla birlikte, dalgaların yayılması büyük ölçüde zemin özelliklerine bağlı olduğundan, işleri zorlaştıran şey, zemin özelliklerinin alanlar arasında ve hatta alanlar içinde büyük ölçüde değişiklik gösterebilmesidir. Bu nedenle, belirli bir konumdaki mutlak titreşim seviyelerini tahmin etmek zor olabilir.



Şekil 2.30 : Tekerlek Zemin titreşimleri için yayılma sürecinin gösterimi.

Trenleri bir modele dahil ederken, bunlar bir nokta kaynağı olarak (uzak mesafede), ölçüm noktası demiryoluna yakınsa hat kaynağı olarak veya bir hattaki birçok nokta kaynağıyla her ikisinin bir kombinasyonu olarak modellenebilir (Jonsson, 2000). Noktasal kaynaklar için dalgalar yarım-küre olarak ve bir hat kaynağı için yarım-silindir

olarak yayılır. Her durumda, zemin kaynaklı titreşimler, hem yarıuzay veya yarım silindirin genişleyen yayılma alanından hem de zemin malzemesinin iç sönümlemesinden kaynaklanan etkiler ile sönümlenir (Lindberg, 1992). P ve S-dalgaları, mesafe ile birlikte azalırken, Rayleigh dalgaları ise titreşim enerjisini daha uzun bir yayılma mesafesine taşıyabilir. P ve S-dalgaları yalnızca demiryoluna yakın (yaklaşık 20 m veya daha yakın) yapıları etkilerken, Rayleigh dalgaları 200 m veya daha fazla mesafedeki yapıları etkileyebilir (Lindberg, 1992). Rayleigh dalgaları yüzeye yakın yerlerde daha güçlüdür ve derinlikle daha da zayıflar. Trenlerden gelen titreşimleri modele göre daha da karmaşık hale getiren şey, zemin kaynaklı titreşimlerin bir noktanın gerçek geçişinden çok daha ilerisine yayılmaya başlayabilmesi ve geçişten sonra zemin özelliklerine bağlı olarak zeminin uzun süre titreşmeye devam edebilmesidir. Zemindeki titreşim seviyesi ile demiryoluna olan mesafe arasında açık bir ilişki vardır (Öhrström vd., 2011). Ayrıca problemin sırasıyla iki veya üç boyutta dalga yayılımı olarak ele alınmasında da bir fark olduğunu bilinmektedir (Jonsson (2000). Zemin kaynaklı titreşimler, yumuşak zeminlerde hem daha ileri hem de daha yüksek genlikli hız seviyelerinde yayılır (Hall ve Wersäll, 2013).

2.2.3. Alıcı

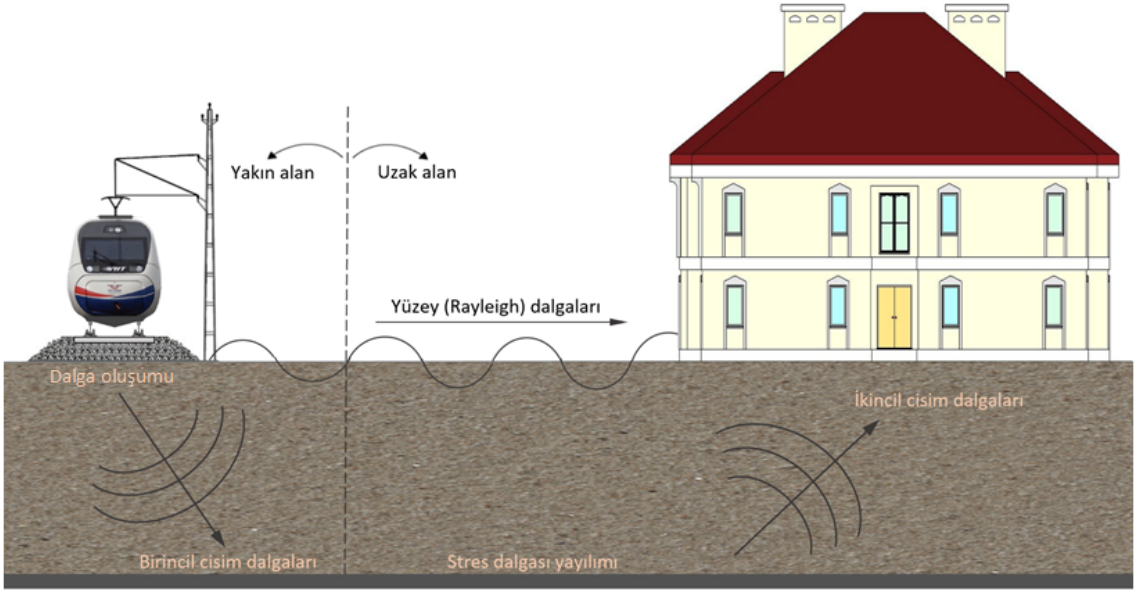
Demiryolu kaynaklı titreşimler için iletim işleminin üçüncü ve son kısmı alıcıdır. Alıcı bölge; yapıyı, temelini ve çevresindeki zemini içerir. Titreşimler temele zeminden aktarılır ve daha sonra bina içinde iletilirek ve katların ve duvarların titreşmesine neden olur. Yapıdaki tepki, zeminin özellikleri, temel tipi, yapının genel geometrisi ve yapısal sistemdeki malzeme gibi faktörlere bağlı olarak değişecektir. Yapının içine eşya ve araç-gereç yerleştirilmesi bile etkili olabilir (Dawn ve Stanworth, 1979).

Yapı-zemin etkileşimi için önemli olan, yapının kapladığı alanın boyutuna bağlı olarak titreşimin dalga boyudur. Dalga boyu yapının genişliği ile karşılaştırıldığında uzunsa, o durumda titreşimler yapıda sadece öteleme hareketine neden olacaktır (Dawn ve Stanworth, 1979). Tersine, daha kısa dalga boylarındaki titreşimler de dönmeler neden olacaktır. Diğer önemli parametre, yapının ve kat döşemeleri gibi çerçevedeki bireysel elemanların doğal frekanslarıdır. Bir yapıyi bir rezonans frekansında uyarmak için, bu belirli frekansın titreşimlerde mevcut olması gerekir. Bir tren geçişinin neden olduğu titreşim seviyesini etkileyen birçok faktör vardır; yapı ile demiryolu arasındaki mesafe, yapının geometrisi, demiryolunun altındaki zemin koşulları ve ayrıca yapı ve temel

arasındaki zemin koşullarıdır (Lindberg, 1992). Ayrıca trenin ağırlığı ve hızı, tekerleğin geometrisi ve kusurları da titreşim seviyesini ve frekans içeriklerini etkiler tren geçişi sırasında yapı temellerinde kuvvetli titreşimler oluşurken, geçişten çok sonra bile temele bağlı üst yapıda önemli seviyede titreşimler gözlemlenir (Jonsson, 2000).

Birinci titreşim türü, zemin veya yapı sallanırken 2 ile 80 Hz arasındaki titreşimler için hissedilir. İkinci titreşim türü, yapı kaynaklı gürültüdür. Gürültü, bir binanın yapısına iletilen ve duvarların, zeminin ve tavanın titreşmesine neden olan titreşimler tarafından üretilir. Bu titreşimler daha sonra iç mekanlarda gürültü yayar. Yapı kaynaklı gürültü, 30-250 Hz frekans aralığındaki zemin kaynaklı titreşimlerden kaynaklanır. Yapı kaynaklı gürültü bazen kaya üzerinde oturan binalarda veya demiryoluna çok yakın yapılarda meydana gelir (Banverket ve Naturvårdsverket, 2006). Jonsson (2000), demiryolu trafiğiyle ilgili düşük frekanslı zemin ve yapısal titreşimleri karakterize etmek ve açıklamak için yapılan deneysel ve teorik araştırmaları sunmuştur. Sonuç olarak, titreşimlerin düşük frekanslı içeriğinin etkin bir şekilde yapı temeline iletildiği sonucuna varılmıştır.

Yakın ve uzak alanlar genellikle, yer titreşimlerinin esas olarak Rayleigh dalgalarının hakim olduğu titreşim kaynağından uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Yüksek hızlı trenler gibi titreşim kaynağına yakın alanlarda meydana gelen zemin kaynaklı titreşimler, yakın alan titreşimleri olarak adlandırılırken, titreşim kaynağından uzakta üretilen titreşimler uzak alan titreşimleri olarak tanımlanmaktadır. Tren kaynaklı titreşimlerin zeminden bir yapıya iletimi Şekil 2.31'de gösterilmektedir.



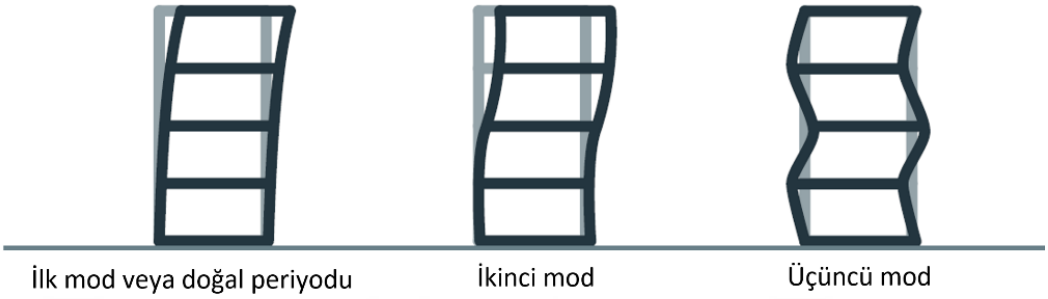
Şekil 2.31 : Tren kaynaklı titreşimlerin zeminden yapıya iletilmesi.

Yüzey dalgaları (Rayleigh dalgaları) yapıların uyarılmasıyla en ilgili dalgalarıdır. Homojen bir zeminin ideal durumunda, P ve S-dalgaları kaynaktan uzağa her yönde yayılır. Bu nedenle, hem geometrik yayılma hem de zeminin sönümlenmesi ile önemli ölçüde azaltılırlar. Rayleigh dalgaları yüzey dalgaları oldukları için aynı geometrik sönüme maruz kalmazlar.

Geçen tren tarafından zemine yayılan titreşimin küçük bir kısmı yakındaki yapıların temeline ulaşabilir. Temel tipine bağlı olarak, bina uyarıma tepki verebilir ve böylece titreşim yapı boyunca iletilir. Yapılardaki titreşimler hem zemine paralel (yani yatay bir düzlemde) hem de zemine dik (yani dikey) yayılır. Özellikle ahşap döşemeler düşük frekanslı titreşime karşı hassastır. Çok katlı yapılarda, zemin kattan üst katlara giden titreşimin artması mümkün olabilir. Titreşim mukavemetinin değerlendirilmesi genellikle temelde ya da daha yüksek katların ortasında/merkezinde gerçekleşir çünkü bir zemindeki en yüksek titreşim mukavemeti tipik olarak merkezinde gözlemlenir.

Zeminden kaynaklı titreşim, demiryolu hattına yakın yapıların temellerine ulaşabilir. Daha uzak mesafelerdeki yapılar için, titreşim genellikle sönümlenir ve bu nedenle temellerdeki titreşim hissedilmez. Bununla birlikte, titreşen bir temel, çeşitli rezonans frekanslarında titreşerek tepki veren yapıyı harekete geçirir. Rezonans frekansı ve dinamik büyütme ölçüde binanın yapısına ve malzeme özelliklerine bağlıdır.

Hannelius'a (1974) göre binaların rezonansı genellikle 10 Hz altında meydana gelirken, duvar ve döşemelerin rezonans frekansları 10-60 Hz aralığındadır. Jones (1994), yapının titreşimlere tepkisini incelerken, tipik olarak temellerin yaklaşık 4 Hz, döşemelerin yaklaşık 20-30 Hz ve duvarlar ve pencerelerin 40 Hz üzerinde rezonans frekanslarının olduğunu özetlemektedir.



Şekil 2.32 : Tren Bir bina yapısının mod şekiller, düşük frekanslı ilk üç mod (1 ila 5 Hz). Daha yüksek modlar, döşeme açıklıklarının titreşimlerinden kaynaklanır (UIC-ETF, 2017).

2.3. Titreşim Etkileri

Titreşimler, sahip oldukları değerlere bağlı olarak yapının çeşitli düzeylerde etkilenmesine neden olurlar. Yapı temelleri bir kere titreşim aldığında, bu titreşimler diğer yapı elemanlarına yayılır. Dış kaynaklı titreşimlerde, zeminden başlayarak temele ve ardından taşıyıcı sistem aracılığıyla yapı elemanlarına ulaşır. İç kaynaklı titreşimlerde ise, başlangıçta döşemeye etki eder ve oradan tüm yapıya iletilir. Titreşimin yapı içerisindeki kişiler üzerinde ne gibi etkileri olabileceği, titreşime duyarlı ekipmanların nasıl etkileneceği ve son olarak binada herhangi bir hasar riski olup olmadığı bu bağlamda ortaya çıkan sorulardır. BTüm titreşimler, yapıya iletilirken aynı şekilde kullanıcılara da ulaşarak farklı etkiler yaratacaktır.

İnsan algılama eşiklerini, yapılardaki ortam seviyelerini, araştırma çalışmalarında tanınan hasar seviyelerini anlamak ve yaygın olarak atıfta bulunulan kaynakların temeli ve temini, titreşim sınırlarını belirlemek için gereklidir. Aksi takdirde, bilgi eksikliğinden dolayı gereksiz maliyet ve yüksek titreşim izleme çabalarına neden olur (Johnson ve Hannen, 2015). Kriterlerin; yapısal hasarı, titreşime duyarlı faaliyetlerdeki rahatsızlığı ve insan rahatsızlığını ele alması gerekir. Yıllar boyunca, titreşim kriterleri ve standartları devletler ve kurumlar tarafından yayınlanmıştır.

2.3.1. Yapı üzerindeki etkileri

Zemin kaynaklı titreşim nedeniyle yapıların hasar görmesinden sıklıkla korkulur, ancak pratikte neredeyse hiç görülmez. Yapıların titreşime bağlı hasarları incelendiğinde, yapıların 50 mm/s'den daha düşük parçacık hızlarından dolayı yapısal hasar alma olasılığının yalnızca % 5 olduğu ve daha düşük parçacık hızları için (25 mm/s) yapısal hasar bildirilmediğini göstermiştir. İncelemeye göre, normal yapılarda 15 mm/ s'den düşük titreşimler için mimari hasar riski yoktur (Nelson ve Saurenman, 1983). Yeni demiryolu hatları için inşaat çalışmaları sırasında zeminin oturmasına bağlı küçük kozmetik/yüzeysel hasar (ince çatlak), meydana gelebilir. Bu durumda bile, yerleşim yerinin trafikle hiçbir ilgisi yoktur, ancak örneğin suyun drenajından kaynaklanıyor olabilir. Buna en uygun yaklaşım, inşaattan sorumlu şirketin, işe başlamadan önce binaların durumuna ilişkin bir uzman raporu hazırlamasıdır. İnşaat işine atfedilebilecek çatlaklar veya diğer kozmetik/yüzeysel hasarlar meydana gelirse, inşaatçı onarım maliyetinden sorumlu olacaktır. Bu, örneğin kazık çakma faaliyetleri için geçerlidir.

Modern yapılar, genellikle titreşim olaylarından daha az etkilenirler. Titreşimler genellikle kalıcı hasara yol açmasa da sürekli maruz kalındığında yapı elemanlarında tahribata neden olabilir.

Tarihi yapılar, müzeler, laboratuvarlar gibi işlevsel yapılar, kritik titreşim değerleri nedeniyle daha hassastır. Titreşimler, anlık veya sürekli etkisiyle yapı elemanlarında zarar oluşturabilir. Duvarlar, döşemeler, taşıyıcı elemanlar gibi yapı elemanları, her biri farklı doğal frekanslara sahip olduğundan, titreşim frekansları birbirine denk geldiğinde rezonans etkisiyle titreşimlerin etkisi 0.5 – 5 katına kadar artabilir. Oluşabilecek hasarlar, İngiliz Standartları'na (BS 7385) göre kozmetik hasar (ince çatlak), orta hasar (geniş çatlak) ve büyük hasar olarak sınıflandırılmıştır.

Demiryolu titreşiminin, yapıların hasar görmesinin olası nedeni olarak değerlendirilebileceği çok az rapor vardır. Bu durumlarda, hasar sadece yapının yapısal bütünlüğünü etkilemeyen ancak yine de küçük çatlaklar olarak görülebilen kozmetik/yüzeysel hasardır. Daha önemli hasarın demiryolu titreşimine atfedildiği İsveç'te birkaç vaka ve Belçika'da bir vaka vardır. Fransa'da, demiryolundan sadece birkaç metre uzaklıkta bulunan eski bariyer bekçilerinde/askeri karakolunda hasar bulunmuştur. Bu durumlarda, kaydedilen titreşim seviyeleri çok yüksektir (UIC-ETF,

2017). Belçika vakasında, yapı demiryolundan sadece üç metre uzaklıktadır. Demiryolu trafiğinden meydana gelen titreşim göz önüne alındığında, demiryolu hattından uygun bir mesafede (50 metre veya daha fazla) bulunan yapılarda ciddi hasar oluşma riski yoktur. Demiryolu trafiğinden kaynaklanan titreşim, demiryolu hattına yakın binalarda algılanabilir. Bu titreşime uzun süre maruz kalındığında, bazı yapı sakinlerini rahatsız edebilir.

Çevresel titreşim değerlendirmeleri genellikle iki faktörü dikkate alır: binanın hasar riski ve insan tepkisi. Üretilen titreşimler, yeterli değerlendirme ve metodolojileri tanımlayan uluslararası titreşim standartlarına göre değerlendirilmelidir. Yeterli prosedürleri ve değerlendirmeleri tanımlayan çeşitli standartlar mevcuttur.

Amerikan yönetmeliği (Transit Noise and Vibration Impact Assessment – FTA 2006), titreşim seviyelerini iki açıdan değerlendirmektedir: yapısal hasar ve insan algısı. Titreşime ait ivme kayıtları, yönetmelikte belirtilen üç doğrultuda önce hız, ardından karekök ortalama (RMS) ve son olarak desibel birimine dönüştürülerek elde edilen sonuçlar, ilgili tablolarla karşılaştırılmaktadır. FTA standardına göre, elde edilen titreşim seviyelerini değerlendirmek için desibel notasyonları kullanılmaktadır. Maksimum RMS değeri Denklem 2.13 kullanılarak hesaplanabilir.

$$RMS_{maks} = v = \frac{v_{maks}}{\sqrt{2}} \tag{2.53}$$

Ayrıca, hızın (V) dB ölçeğine (VdB) dönüşümü, FTA kriterlerine göre Denklem 2.14 kullanılarak yapılır.

$$L_v = v_{dB} = 20 \times \log \frac{v}{v_{ref}} \tag{2.64}$$

Burada; v, m/s cinsinden maksimum RMS titreşim hızı değeridir ve v_{ref}, referans hız olarak 2.54×10^{-8} m/s olarak seçilir.

FTA kriterleri, Tablo 2.3'te gösterildiği gibi, üç arazi kullanım kategorisinde ve olay türlerinde maksimum zemin kaynaklı titreşim seviyelerini belirtir. Yapı hasar bakımından yönetmelik sınır değerleri seyrek (Infrequent) ve sık (Frequent) titreşim faaliyetlerine göre değerlendirmede farklılık gösterir. Günde 70'ten fazla titreşim

oluşturan faaliyetler sık, 70'ten az titreşim oluşturan faaliyetler ise seyrek olarak tanımlanır. FTA'ya göre yapılacak değerlendirmede, Denklem 2.14'te elde edilen parametre sonuçları Tablo 2.3'te verilen eşik değerler ile karşılaştırma yapılarak titreşim düzeyi yorumlanır.

Tablo 2.3 : Yapısal hasar bakımından FTA'daki eşik titreşim hız seviyeleri (FTA 2006).

Zemin Kaynaklı Titreşimler için Genel Değerlendirme Kriterleri			
Arazi Kullanım Kategorisi	Titreşim Etki Seviyeleri (VdB 1 mikro-inç/s)		
	Sık Olaylar[1]	Ara Sıra Olaylar[2]	Seyrek Olaylar[3]
Kategori 1: Titreşimin iç operasyonlara müdahale edeceği binalar.	65 VdB[4]	65 VdB[4]	65 VdB[4]
Kategori 2: İnsanların normalde uyuduğu konutlar ve binalar.	72 VdB	75 VdB	80 VdB
Kategori 3: Gündüz kullanılan kurumsal araziler	75 VdB	78 VdB	83 VdB

Notlar:

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.

Alman standardı (Vibrations in buildings - DIN4150-2/3), titreşim düzeyini iki temel açıdan değerlendirmektedir: yapısal hasar ve insan algısı. Bu standart, zemin kaynaklı titreşimlerin neden olduğu yapısal tepkiyi maksimum parçacık hızları (PPV) ile belirlemektedir. DIN 4150-3 normu, titreşim hızı ve baskın frekansı önerilen eşik değerlerle karşılaştırarak titreşimin binalar üzerindeki etkilerini açıklar. Bu kılavuza göre; titreşim izleme, ivme veya hız için ivmeölçerler kullanılarak doğrudan ölçümle elde edilebilir ve kısa vadeli ve uzun vadeli titreşim olarak iki bölüme ayrılmıştır. Biri kısa vadeli ve diğeri uzun vadeli titreşim için. Yapılarda kısa ve uzun vadeli titreşimleri

değerlendirmek için, DIN 4150-3'e göre kısa süreli titreşimler, yapısal yorulmaya neden olacak kadar sık meydana gelmeyen ve rezonans oluşturmayan titreşimler olarak tanımlanmaktadır. Bu titreşimlerin dışındaki diğer tüm titreşim tipleri uzun vadeli titreşim olarak sınıflandırılmaktadır. DIN4150-3'e göre yapılacak değerlendirmede, PPV ve titreşimlerin baskın frekans değerlerine bakılır, Tablo 2.4'te verilen eşik değerler ile karşılaştırma yapılarak titreşim düzeyi yorumlanır.

Tablo 2.4 : Yapısal hasar bakımından DIN 4150-3'teki eşik titreşim hız seviyeleri (DIN 4150, 1999).

Yapı Tipi	Yapısal Hasar İçin Titreşim Kriteri, PPV (mm/s)				
	Kısa-Dönem			Uzun-Dönem	
	Temelde			En Üst Kat	En Üst 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

2.3.2. İnsanların titreşim algıları

Zeminden gelen titreşime insanların tepkisi birçok faktörden etkilenir. Bu faktörlerden bazıları, titreşim genliği, süresi ve frekans içeriği gibi fizikseldir. Nüfus tipi, cinsiyet ve yaş gibi diğer faktörler ise psikolojiktir (ISO 2631-2, 2003). Bu, insanın titreşime tepkisinin öznel olduğu ve farklı insanlar için farklı olacağı anlamına gelir. Bu nedenle maruziyet-etki ilişkilerini incelerken, nüfusun yüzde kaçının titreşimleri belirli bir şekilde algıladığını ifade ederek, insanların belirli titreşim seviyelerine tepkileri istatistiksel bir şekilde ele alınmalıdır (Klæboe ve diğ., 2003a).

Titreşimler döşemelere ve duvarlara ulaştığında, genliği ve frekansına bağlı olarak algılanabilir seviyede olabilir. Pencerelerin, mutfak eşyalarının ve benzer parçaların takırdaması da zemin kaynaklı gürültü olarak adlandırılan işitilebilir/duyulabilir gürültüye neden olabilir. Gerçekte, gürültüye maruz kalma ile trafikten gelen titreşimler arasında etkileşim olduğuna dair belirtiler vardır (Klæboe ve diğ., 2003b). İnsanlar hem

sese hem de titreşime maruz kaldıklarında, yalnızca titreşim hissedildiği zamana göre daha fazla rahatsız olabilirler.

Sinyalin gücüne bağlı olarak, zemin kaynaklı titreşimin farklı etki türleri olabilir. Örneğin, düşük güçte titreşim fark edilmeyebilir. Bu durumda, titreşimin algılama sınırın altında (hissedilebilir titreşim) olduğu söylenir. Ancak zemin kaynaklı gürültü neredeyse her zaman mevcuttur ve farkedilir. Daha yüksek titreşim kuvvetlerinde, insanlar ayakta dururken, otururken veya yatarken tüm vücuduyla titreşimi hissedebilirler. Titreşim problemi olan bölgelerde yaşayan insanlar, gece saatlerinde meydana gelen titreşim olaylarından uykuları üzerinde belirgin olumsuz etkiler yaşarlar (Öhrström, ve diğ., 2011). Ayrıca, titreşimler mevcut olduğunda, insanların kaynaktan gelen gürültünün daha fazla farkına vardıkları da gösterilmiştir.

Amerikan (FTA 2006) ve Alman (DIN4150-2/3) standartları titreşim düzeyini insan algısı ve yapı hasarı bakımından inceler.

FTA'da, algılanabilirlik eşiğinin yaklaşık 65 VdB (0.045 mm/s) olmasına rağmen, titreşimin 70 VdB değerini geçmediği sürece insanın titreşime verdiği yanıtın genellikle önemli olmadığı belirtilir. Bir yapıda meydana gelen titreşim seviyesi 85 VdB (0.452 mm/s) değerine ulaşırsa, çoğu kişi titreşimden rahatsız olacaktır. Yapılan titreşim analizleri sonucunda FTA'ya göre Denklem 2.14'te elde edilen parametre sonuçları Tablo 2.5'te verilen eşik değerler ile karşılaştırma yapılarak titreşim düzeyi yorumlanır.

Tablo 2.5 : İnsan algısı bakımından FTA'daki eşik titreşim hız seviyeleri (FTA, 2006).

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.

İnsanlar, bir binada hasara neden olabilecek titreşim düzeyinin altında olan seviyelerdeki titreşimi hissedebilmektedir. İnsanlar için algı dereceleri, DIN 4150-2'de verilen sürekli titreşim seviyesi sınır değerleri, insan algısı ve konforu için değerlendirme kriteri olarak tanımlanmaktadır. DIN4150-2'e göre yapılan titreşim işlemleri sonucunda hız zaman grafiklerinden elde edilen maksimum parçacık hız (PPV) parametreleri Tablo 2.6'da verilen eşik değerler ile karşılaştırma yapılarak titreşim düzeyi yorumlanır. İnsan algısı açısından, DIN4150-2, algılanabilirlik sınır değerinin 0.15 mm/s olduğunu belirtirken, titreşim seviyesi 14 mm/s ulaşırsainsanları son derece rahatsız edecek şekilde çok güçlü algılanabilir seviyede olacaktır.

Tablo 2.6 : İnsan algısı bakımından DIN 4150-2'deki eşik titreşim hız seviyeleri (DIN 4150, 1999).

Yaklaşık Titreşim Seviyesi	Algı Derecesi
0.1 mm/s	Algılanamaz
0.15 mm/s	Algı eşiği
0.35 mm/s	Neredeyse algılanabilir
1.0 mm/s	Algılanabilir
2.2 mm/s	Kolayca algılanabilir
6 mm/s	Güçlü algılanabilir
14 mm/s	Çok güçlü algılanabilir

BÖLÜM 3. HIZLI TREN GEÇİŞLERİNİN OLUŞTURDUĞU TİREŞİM ETKİLERİNE AİT SAHA ÖLÇÜMLERİ

Serbest zemin yüzeyinde oluşan titreşimin ölçülmesi, tren trafiğinden kaynaklanan zemin titreşimi hakkında tahmin yapmak için deneysel bir model geliştirmenin önemli bir parçasıdır. Bu bölüm, bu ölçümlerin genel olarak nasıl yapıldığına ilişkin bilgiye ve bu çalışmada kullanılan verileri özel olarak sağlayan titreşim ölçüm durumlarının sunumuna ayrılmıştır. Bir sonraki bölümde, mevcut saha deneysel çalışmasını simüle etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modeli, saha deneysel sonuçları kullanılarak doğrulanmış ve farklı zemin koşullarında 100 ila 300 km/h hızlarda balastlı bir hat üzerinden geçen yüksek hızlı trenlerin neden olduğu titreşim yayılımını değerlendirmek için kullanılmıştır.

3.1. Ölçüm Sahası

Çalışmanın odak noktasında olan ölçüm sahası, Sakarya ilinin Sapanca ilçesinde konumlanan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (SUBÜ) Kırkpınar turizm MYO uygulama oteli ve sosyal tesislerinin bulunduğu yerleşkedir (Şekil 3.1). Bu araştırma kapsamında, İstanbul ile Ankara arasında yer alan ve toplam uzunluğu 533 km olan İzmit-Arifiye segmenti, taşıma kapasitesi düşük alüvyon zeminlerinden geçen ve yoğun yerleşim bölgelerini içeren yüksek hızlı tren (YHT) tekrarlı geçişleri üzerinde odaklanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1 : İncelenecek sahanın genel bakışı.

3.2. Test Sahasının Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.1. Sismik kırılma yöntemi

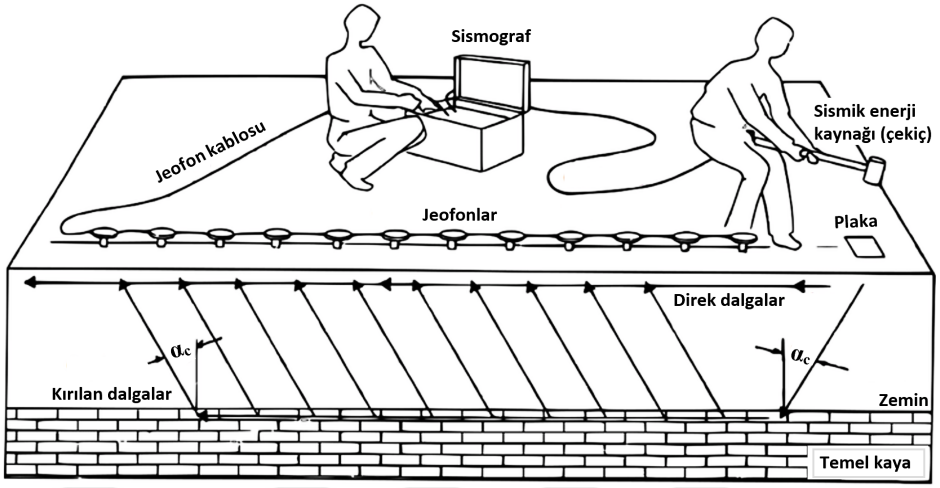
Sismik kırılma tomografisi (SKT), son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan bir araştırma tekniğidir ve jeolojik ile jeoteknik sorunların çözümüne yöneliktir. Bu yöntem, yeraltının sismik P dalgası hızlarına göre iki boyutlu olarak modellenmesine izin verir. Çözüm, hücreler şeklinde yapıldığından her türlü yer altı modelinin çözümü mümkündür. Yöntem, yüksek çözünürlüğe sahip olmasa da ortamdaki hız değişimlerine hassastır ve ortamda yeterli bir hız farkı varsa çözüme ulaşmak mümkündür. Jeofon aralıkları ve enerji kaynağına bağlı olarak farklı derinliklere inmek mümkündür.

Ancak, genellikle 100 metrenin altındaki sığ derinliklerde ortaya çıkan sorunları belirleme konusundaki zorluklar nedeniyle, Sismik Kırılma Tomografisi (SKT) yaklaşımı öne çıkmaktadır. SKT araştırmaları, yeraltı boşluklarının ve karstik sorunların detaylı analizi, yüzeyaltındaki kil depolama alanlarının belirlenmesi, toprak-kaya ve dolgu alanlarının detaylı görüntülenmesi, sığ akifer zonlarının haritalanması, fay zonlarının tespiti, anakaya derinliğinin belirlenmesi, heyelan geometrisinin analizi, dolgu alanlarının konum tespiti, tünel incelemeleri ve yüksek katlı binalar için zeminin P dalga hız modellerinin oluşturulması gibi çeşitli önemli jeofizik tanılama süreçlerinde etkili bir araç olarak öne çıkar.

Sismik kırılma yönteminin temeli, yeryüzünde veya çok sığ derinliklerde oluşturulan yapay sismik dalgaların yer içinde kırılarak yayılması ve ardından yeryüzündeki alıcılara (jeofonlara) ulaşması için geçen sürelerden yararlanılarak yer altındaki tabakalı yapıların belirlenmesidir. Sismik kırılma yönteminde, genellikle 2-40 Hz frekans aralığında kırılma dalgalarının kaydedildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kırılma yöntemi uygulanan bir alanda serim boyunun, tahmin edilen derinliğin 4-5 katı olması önerilmiştir. Bu yöntemde, bir sismik kaynaktan yayılan sismik dalgaların jeofonlara ulaşma süreleri, jeofonların kaynaktan olan uzaklıklarına bağlı olarak çizilir. Zaman-uzaklık grafiklerinin değerlendirilmesi, özellikle sığ yer altı yapıları hakkında bilgi elde etmek için kullanılır.

Yer kabuğu, elastik hız, yoğunluk gibi fiziksel özellikleri farklı kayaçlardan oluşan tabakalardan meydana gelir. Bu teknikle yapılan Sismik Kırılma deneyi sonuçlarına göre, yüzeye yakın noktalarda üretilen elastik dalgalar ve yeraltındaki tabakalar

arasındaki kırılmalar yine yüzeyde gözlemlenir. Bu gözlemler, tabakaların derinlikleri, ara yüzeyin topografyası ve tabakaların sismik hızları gibi önemli bilgilerin elde edilmesine olanak tanır (Şekil 3.2).



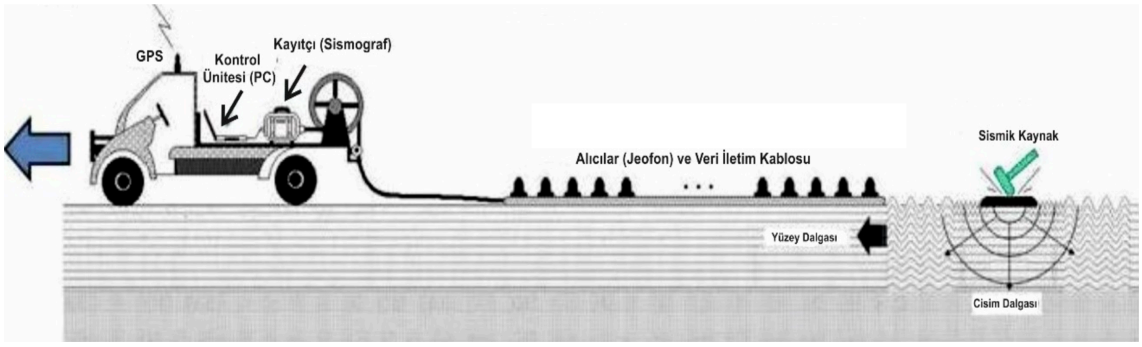
Şekil 3.2 : Sismik Kırılma ve MASW arazi deneyleri (Jorge ve Alirio, 2017).

Sismik kırılma deneyi, zeminde çeşitli enerji kaynakları kullanılarak oluşturulan yapay sarsıntıların (elastik dalgaların) yer içinde yayılarak kırılarak veya yansıyarak geçtikleri ortamların fiziksel (mekanik) özelliklerini içeren sismik dalgaların yeryüzüne ulaşımının sismograf aracılığıyla ölçülmesidir.

Bu çalışmada, Sismik Kırılma ve Yüzey Dalgası Çok Kanallı Analizi (MASW) deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu deneylerde 12 kanallı bir sismik kayıt cihazı kullanılmıştır. Sismik dalgaları oluşturmak amacıyla, çelik levha üzerine 8 kg ağırlığındaki bir balyoz ile vurularak yapay sarsıntılar oluşturulmuştur. Yeryüzeyine belirli aralıklarla yerleştirilmiş jeofonlar tarafından algılanan sismik dalgalar, dijital sismografa iletilmiş ve bilgisayar programları aracılığıyla kaydedilmiştir. Sismik ölçümler, zemin ortamındaki basınç (V_p) ve kayma (V_s) dalgalarının her ikisinin de ölçülmesi olarak yapılmıştır. V_p, sismik dalga hızını belirlemek için kullanılmış ve yeraltı yapısal konumları düşey ve yanal olarak daha derinden tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. V_s ise zeminin elastik özelliklerini tanımlamak için ölçülmüştür. Basınç dalgası kayıtları Sismik Kırılma ölçümlerinden elde edilirken, kayma dalgası kayıtları MASW ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir.

3.2.2. Yüzey dalgasının çok-kanallı analizi yöntemi (MASW)

Yeraltı katmanlarının fiziksel özellikleri, kayma (S) dalga hızıyla bağlantılıdır. Bu sebeple, S-hızındaki değişimlerin belirlenmesi, geoteknik mühendislik açısından büyük önem taşır. S-hızı değişimlerini belirlemede sismik kırılma yöntemi yanında, yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW) yöntemi de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sismik kırılma yönteminin özellikle uygulanamadığı durumlarda, MASW yöntemi tek alternatif olarak kabul edilmektedir. MASW, sismik kırılma yöntemiyle elde edilen ölçümlerde kullanılan dizi geometrisini koruyarak daha büyük araştırma derinliği elde etme avantajına sahiptir. Bu tekniğin hızlı veri toplama, verilerin kolay işlenmesi ve düşük hız problemlerini çözme yeteneği gibi diğer avantajları bulunmaktadır. MASW tekniği, yüzey dalgası analiz yöntemleri arasında yer alır ve Rayleigh dalgasının dispersif özelliğinden faydalanarak yer altındaki tabakalı yapıların kayma (Vs) dalga hızının derinlikle değişiminin hesaplanması amacını taşır. Özellikle $V_{S(30)}$ çalışmalarında, MASW tekniği zemin ortamındaki ilk 30 metrenin önemini vurgular ve ince tabakaların tespitini sağlayarak, UBC, Eurocode-8 ve TBDY-2018 standartlarında kullanılan temel parametrelerden biri olan VS(30) değerini doğru bir şekilde hesaplayabilir. MASW tekniğinin avantajları arasında hızlı veri toplama, verilerin kolay işlenmesi ve düşük hız problemlerini etkili bir şekilde çözebilme yeteneği bulunmaktadır. Yüzey dalgası analiz yöntemlerinden biri olan MASW tekniği, özellikle $V_{S(30)}$ çalışmalarında, zemin ortamındaki ilk 30 metrelik derinliğin önemini vurgulayarak ince tabakaların tespiti konusunda güvenilir sonuçlar elde etme konusunda etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, doğal zemin gerektirmeksizin, asfalt, beton, kaldırım, taş zemin gibi ortamlarda da jeofonlar yüzeyle iyi bir bağlantı kurarak ölçüm alabilir. Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi (MASW), günümüzde özellikle geoteknik ve mikrobölgeleme araştırmalarında yaygın olarak kullanılan bir sismik tekniktir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, MASW yöntemi, veri toplama prensibine dayanır ve elde edilen arazi verileri üzerinden dispersiyon eğrisinin belirlenmesi ve ters-çözüm tekniğiyle yeraltı kayma dalgası hızı (Vs) dağılımının elde edilmesini amaçlar.



Şekil 3.3 : Yüzey dalgasının MASW yönteminin sistematik veri toplama aşamalarını içeren gösterim (Park, 2007).

Alandaki veriler, kullanılan cihazın kanal sayısına bağlı olarak 4.5 Hz frekansındaki jeofonlar aracılığıyla toplanır ve elde edilen veriler zaman-uzaklık ekseninde görselleştirilir. Eğer vuruşlar belirli ofsetlerle baş ve sondan yapılırsa, tek boyutlu bir sonuç elde edilir. Ancak, tüm jeofonlardan yapılan vuruşlarla iki boyutlu bir yer altı kayma dalgası modeli oluşturmak mümkündür. Elde edilen veriler, ön işlemlerden geçirildikten sonra dispersiyon eğrileri ortaya çıkarılır. Dispersiyon eğrileri kullanılarak gerçekleştirilen ters-çözüm işlemleri sonucunda yeraltının derinliği ve tabaka sayısına bağlı olarak Vs hız değerleri belirlenir. İki boyutlu veri toplama durumunda ise yeraltının iki boyutlu V_s hız dağılım kesitleri elde edilir.

MASW çalışmalarıyla, yeraltındaki tabakaların Vs hızlarını belirlemeyi hedefler. Bu bağlamda, jeoteknik amaçlar için yeraltının dinamik ve elastik parametreleri olan maksimum kayma modülü (Gmax), sismik hız oranı (V_p/V_s), yoğunluk (ρ), bulk modülü (K), poisson oranı (ν), young modülü (E), ve V_{S30} (m/s) hesaplanır.

3.2.3. Test sahasında sismik kırılma ve MASW yöntemleriyle zemin özelliklerini belirlenmesi

Yüksek hızlı trenlerin yakın çevrede oluşturduğu titreşim etkilerini incelemek için seçilen Kırkpınar bölgesinde, titreşim ölçümleri alınarak zeminin dinamik özellikleri ve jeolojik yapısıyla ilgili Sismik Refraksiyon (Kırılma) ve MASW (Çok Kanallı Yüzey Dalgası) etütleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalara ait serim boyu, ofset, jeofon aralığı, örnekleme aralığı ve kayıt süresi çizelgesi Tablo 3.1'de verilmiştir. Jeofizik deneylerin yapıldığı sahaya ait fotoğraflar Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

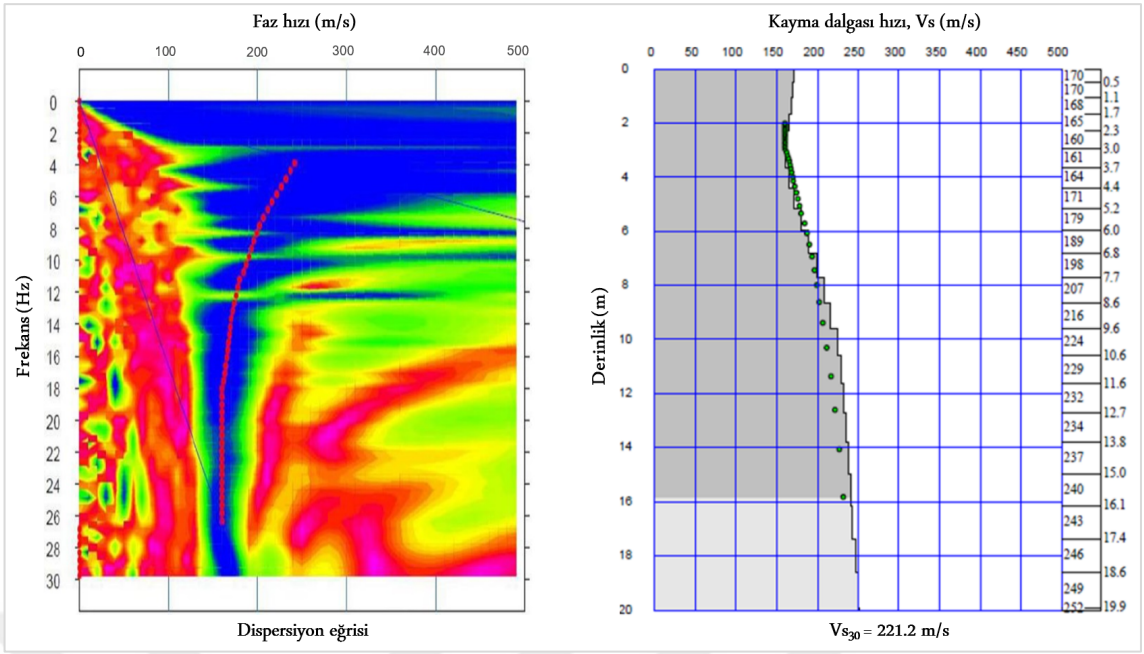
Tablo 3.1 : Serim boyu, ofset, jeofon aralığı, örnekleme aralığı ve kayıt süresi çizelgesi.

Yöntem	Serim Boyu	Ofset	Jeofon Aralığı	Örnekleme Aralığı	Kayıt Süresi
Kırılma (Refraksiyon)	60 m	5 m	5 m	0.2 ms	0.5 s
MASW1	60 m	5 m	5 m	1.0 ms	2.0 s
MASW2	36 m	3 m	3 m	1.0 ms	2.0 s

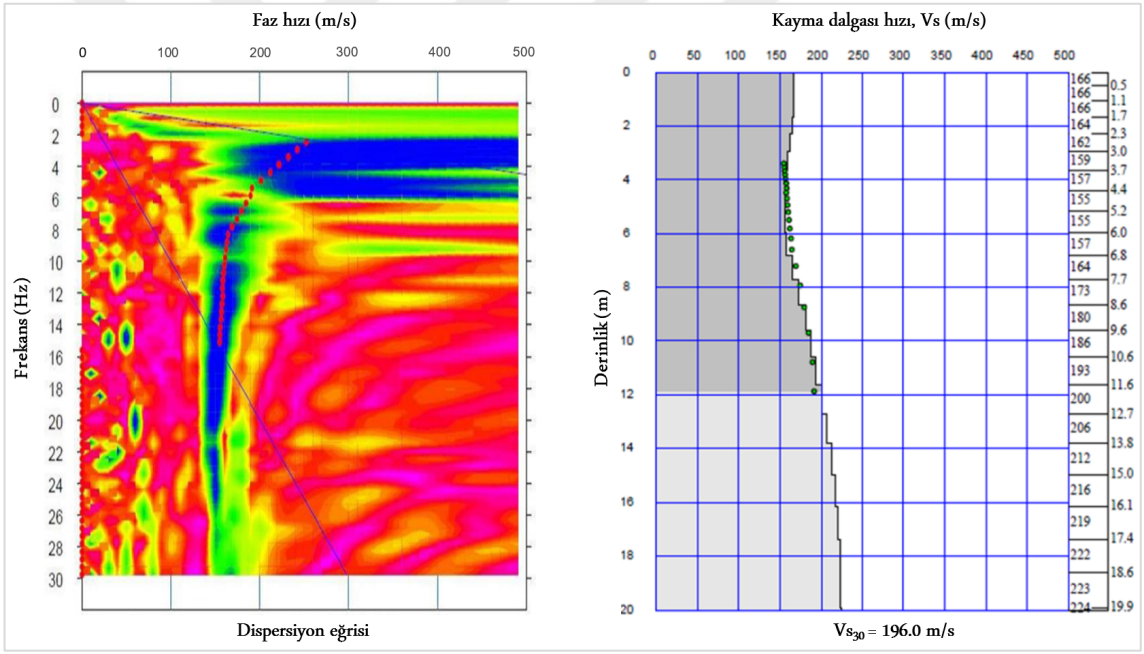


Şekil 3.4 : Jeofizik deneyler için arazi ölçümleri.

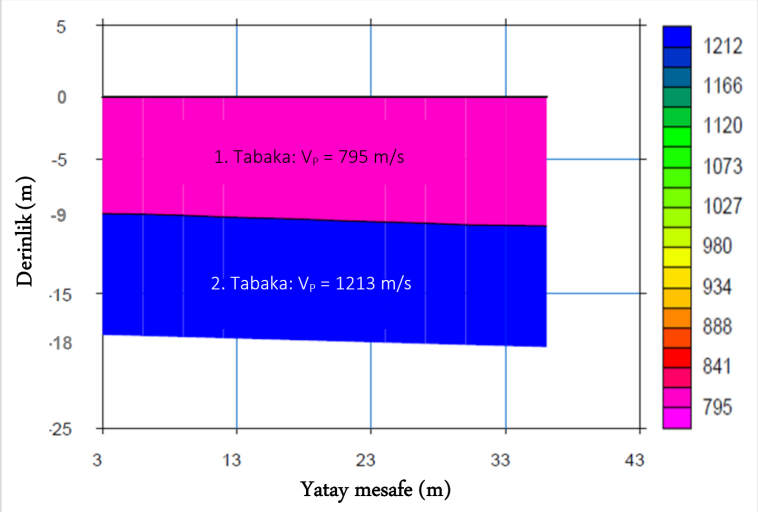
Bu aşamada yapılan deneysel çalışmada, tren yoluna dik ve tren yoluna paralel Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) profilleri ile sismik kırılma yöntemi kullanılarak oluşturulan modeller elde edilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur. Rayleigh dalga dispersiyon eğrisi ve ters çözümü temel alınarak, frekansa bağlı faz hızının yanı sıra derinlikle değişen kayma dalgası hızları, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Yüzeyden derine doğru S dalgası hızı, ilk 3 metrelik örtü tabakası için 166-170 m/s aralığında değişirken, 3 metreden sonra ikinci tabaka için Vs > 240 m/s olarak hesaplanmıştır. P dalgası hızı ise yüzeyden derine doğru ilk 9 metreye ait örtü tabakası için 795 m/s, 9 metreden sonra ise ikinci tabaka için 1213 m/s olarak belirlenmiş ve bu veriler Şekil 3.7'de görsel olarak sunulmuştur. Yönetmelikler genellikle 30 metreyi yeterli araştırma derinliği olarak önerse de, zeminin hakim periyodunu belirleyebilmek için en az 760 m/s hız değerine sahip katmana kadar olan sismik hızlar, bu yöntemle belirlenebilmektedir.



Şekil 3.5 : Tren yoluna dik MASW profili.



Şekil 3.6 : Tren yoluna paralel MASW profili.



Şekil 3.7 : Sismik kırılma yöntemi ile oluşturulmuş model.

Hızlı tren geçişine ait serbest zemin yüzeyi titreşim ölçümlerinin genel dinamik zemin parametreleri yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiş ve Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2 : Sismik Hızlar ve zemin elastik parametreleri.

	Dalga Hızları			
	Sembol	Birimi	1. Tabaka	2. Tabaka
P Dalgası Hızları - Düz Atış	(V_p)	m/s	795	1213
P Dalgası Hızları -Ters Atış	(V_p)	m/s	795	1213
S Dalgası Hızları	(V_s)	m/s	170	240
P Dalgası Hızları (Ortalama)	(V_p)	m/s	795	1213
	Tabaka Derinlikleri			
	Sembol	Birimi	P Düz	P Ters
Derinlikler	(h)	m	9.00	9.00
	Elastik Parametreler			
	Sembol	Birimi	1. Tabaka	2. Tabaka
Yoğunluk	(d)	gr/cm^3	1.65	1.83
Poisson Oranı	(P)	-	0.48	0.48
Kayma Modülü	(G)	kg/cm^2	476	1054
Elastisite Modülü	(E)	kg/cm^2	1404	3118
Bulk Modülü	(K)	kg/cm^2	9769	25513
Hakim Titreşim Peryodu	(T_0)	s	0,90	
Zemin Büyütmesi	-	-	1.77	1.39
Zemin Oturması	S	cm	1.31	0.93
Yatak Katsayısı	k	ton/m^3	1054	
Zemin Taşıma Gücü	(q_u)	kg/cm^2	1.87	2.93
Zemin Emniyet Gerilmesi	(q_S)	kg/cm^2	0.62	0.98
Sökülebilirlik	-	-	Kolay	Kolay
Sıkışabilirlik	-	-	0.00010	0.00004

3.3. Hızlı Tren Geçişine Ait Serbest Zemin Titreşimlerinin Ölçülmesi

3.3.1. Saha koşulları ve yüksek hızlı trenin genel özellikleri

Seçilen ölçüm sahası, yüksek hızlı demiryolu hattına yakın bir konumda bulunmaktadır ve Sakarya'nın Sapanca ilçesindeki SUBÜ Kırkpınar turizm MYO uygulama oteli ve sosyal tesislerinin yer aldığı yerleşkededir. Belirli aralıklarla düzenlenmiş ivme ölçerlerle yapılan titreşim kaydı, güzergah boyunca yerel zemin koşullarını göz önünde bulundurarak 200-250 km/h hız aralığındaki trenlerin çift yönlü tekrarlı geçişlerinin serbest yüzey yer hareketini araştırmak ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Seçilen sahanın genel durumu Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Çalışma sahasında toplamda dört ayrı tren hattı bulunmaktadır, ve ölçüm noktalarına yakın mesafede bulunan ilk iki hattan Yüksek Hızlı Tren (YHT) geçişi yapılmaktadır. Üçüncü hattan geçen tren yük treni iken, dördüncü hattan geçen tren ise banliyö trenidir.



(a)

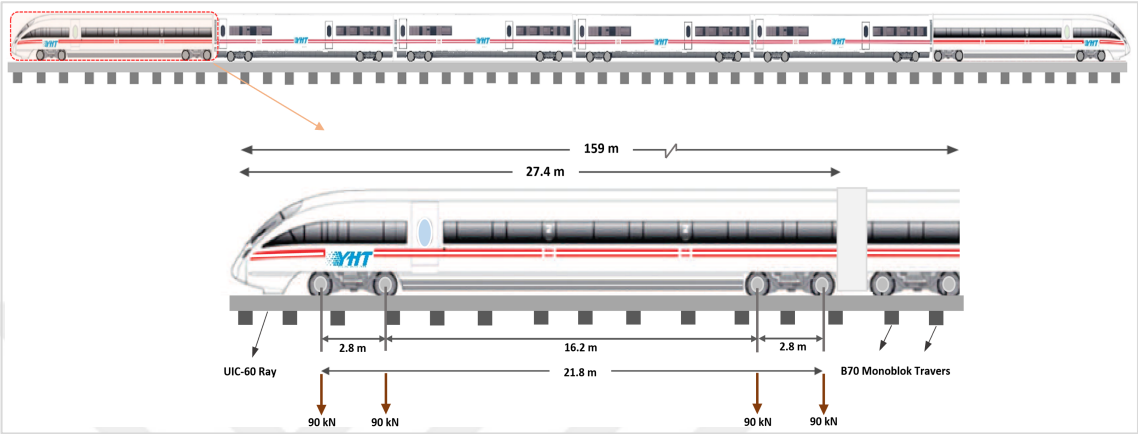


(b)

Şekil 3.8 : Test sahasının a) konumu ve b) kuş bakış görünüşü ve hızlı tren geçişi.

TCDD tarafından kullanılan HT65000 YHT seti, yüksek hızlı demiryolu yolcu taşımacılığında kullanılmaktadır ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Lokomotifi tarafından çekilen yolcu vagonları, her biri 27.4 metre uzunluğunda olan ve akslar arası mesafesi 2.8 metre olan bir tren setini oluşturmaktadır. Yüksek hızlı tren (YHT), toplamda 6 vagon ile birlikte 159 metre uzunluğa ulaşarak, yüksek hızlarda hareket eden bir ağır kütleye dönüşmektedir. Talebe bağlı olarak, 2 vagon daha eklemek mümkündür. Bu demiryolu aracı, UIC-60 standartlarına uygun raylar üzerinde ilerlerken, özel olarak tasarlanmış ön-germeli ve öngekmeli monoblok B70 traversleri kullanmaktadır. Maksimum yolcu kapasitesi 411 kişidir, bu da trenin geniş bir yolcu kitlesini taşıma kabiliyetini vurgular. Ayrıca, katar yükü 18 tona kadar çıkabilme özelliği, çeşitli yük taşıma ihtiyaçlarına uygun esnek bir çözüm sunmaktadır. Sahadaki yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan HT65000 serisi lokomotif seti 4 dingilli ve ağırlığı

yaklaşık olarak 720 kN'dir. Bu durumda, bir tekerlek 90 kN'lik bir kuvveti raya aktarmaktadır. Yolcu taşımacılığında maksimum 250 km/h hıza ulaşabilen tren seti, çalışmanın yapıldığı İzmit-Arifiye arasında bulunan Kırkpınar bölgesinden maksimum hıza yaklaşan (~250 km/h) bir değerde geçmiştir. Yüksek hızlı trenin özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.9 : HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları.

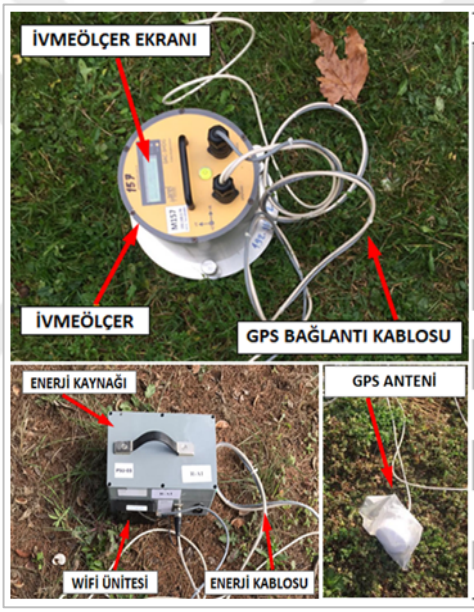
Tablo 3.3 : HT65000 yüksek hızlı trenin özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).

Bileşenler	Karakteristikler	Semboller	Büyüklük	Birim
Lokomotif	Dingil yükü	F_z	180	kN
HT65000	Hareket hızları	V	250	km/h

3.3.2. Titreşim ölçümünde kullanılan cihazlar

Araştırma kapsamında kullanılan ivmeölçerler, minimal gürültü seviyelerine sahip olup, hafif titreşim hareketlerini ölçebilen üç eksenli Capacitive Force Micro-machined sensörlere donatılmıştır. Bu özel ivmeölçerler, Arel Deprem firması tarafından üretilen DAC-3HDG modeline ait 32-bit yüksek çözünürlüklü, GPS senkronizasyonlu sayısallaştırıcı ve veri kaydedici ivmeölçerleri içermektedir (Şekil 3.10). DAC-3HDG yüksek çözünürlüğü ve içinde barındırdığı çok düşük gürültü seviyelerine sahip üç eksenli capacitive force micromachined sensörler ile kuvvetli yer hareketlerini ölçebildiği gibi, çevresel titreşimleri de ölçebilmektedir. Cihazın sismik sayısallaştırıcısı 32 bit ADC olup, dinamik aralığı 50, 100 ve 200 Hz olarak seçilebilmektedir (300 nano g). Ethernet kablosu ile veriler bilgisayara direk aktarılacağı gibi, dahili 2Gb hafıza kartına da yazılabilmektedir. Tak-çalıştır mantığı ile geliştirilen DAC-3HDG

beraberinde Wi-Fi/Güç ünitesi ile birlikte kullanıldığında kurulumu çok basit ve hızlı yapılabilen bir sistemdir. Saha ölçümlerinde kullanılan cihazlar, GPS anteni, enerji kaynağı ve ivmeölçerdenoluşmaktadır. Bu üç temel parça, Şekil 3.9'da detaylı olarak belirtilen teknik özelliklere sahiptir. GPS anteni ve enerji kabloları, ivmeölçere iki kablo aracılığıyla bağlanır. Ana kutunun içinde üç adet MEMS sensörü, ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) ve ivmelerin kaydedildiği bellek bulunmaktadır. Enerji kaynağı, ivmeölçer ana kutusuna ve GPS antenine güç sağlayarak ivme verisini sayısal formata dönüştürür. Aynı kaynak, GPS antenine enerji sağlayarak uydu ile iletişimi kurar, zaman ve konum verilerini kaydetmeyi sağlar. Wifi ünitesi, elde edilen verileri bilgisayara aktarır. Deney seti öğeleri ara kablolarla bağlıdır ve ivmeölçer ekranı, sistemin çalışır durumunu gösterir.



DONANIM	ÖZELLIKLERI
İvmeölçer	3 Eksen
	a) Capacitive Force Micromachined Sensor
	b) 300/√Hz. noise
	c) ±2g Full calibration
	d) ±5 V Diffrerential output
	e) Resolution over 200 Hz. Bandwithth
	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/Antialising

Şekil 3.10 : DAC-3HDG GPS senkronizasyonlu veri kaydedici ivmeölçer ve teknik özellikleri.

3.3.3. Ölçüm noktalarının düzenlenmesi ve titreşim verileri

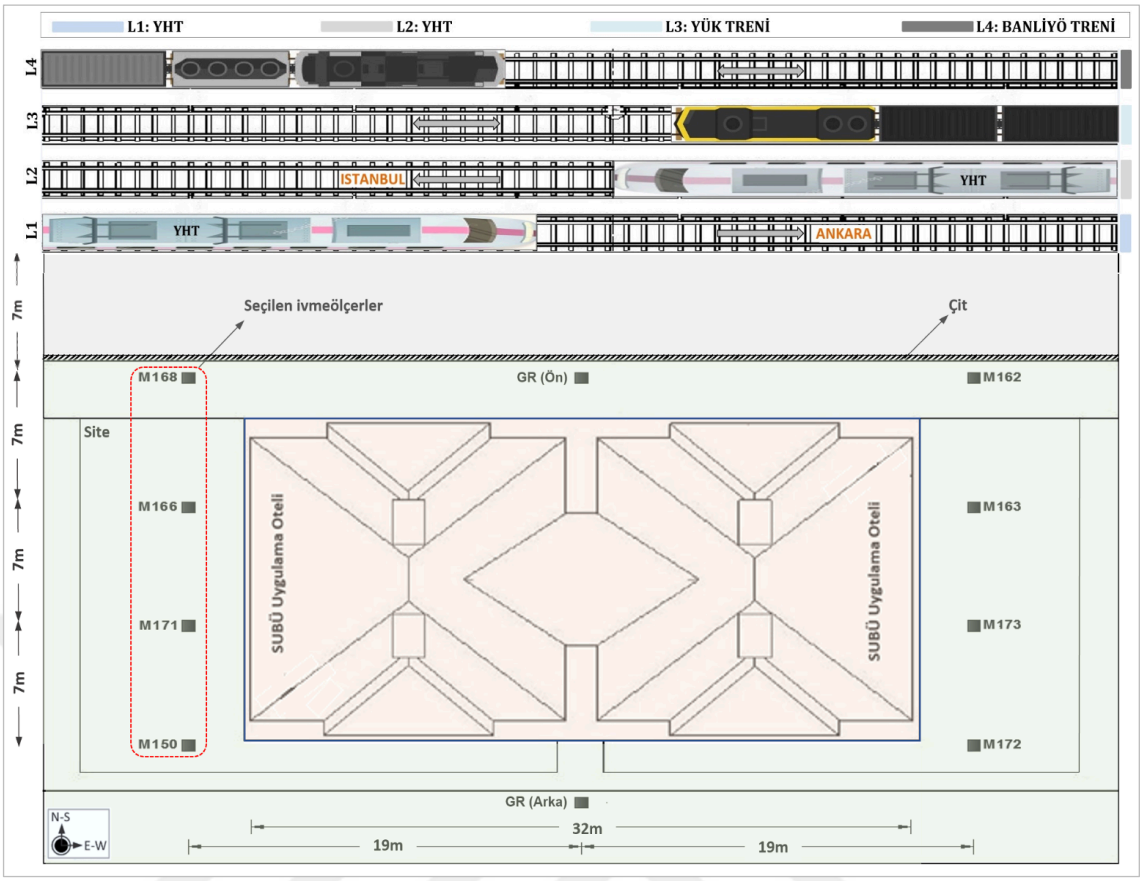
İstanbul-Ankara hızlı demiryolunun 200-250 km/h hız aralığındaki tren geçişlerinin ürettiği serbest yüzey yer hareketlerinin dalga oluşum mekanizmalarını incelemek ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek ve sayısal analizler için kullanılacak sonlu eleman modelinin doğrulanmasına temel olacak serbest zemin ölçümlerinin yapılması amacıyla, Kırkpınar bölgesinde bulunan SUBÜ Uygulama Otel binalarının yakınında, tren hattına sadece 8-10 m uzaklıkta yer alan bir bölgede sistematik olarak hatta dik dizilmiş ivmeölçerler ile titreşim kaydı alınmıştır (Şekil 3.11). Bu alan, zayıf zemin durumu (V_S < 200 m/s) ve diğer çevresel

titreşimlerden uzak olması nedeniyle deneysel ölçümler için uygun bir saha olarak seçilmiştir.

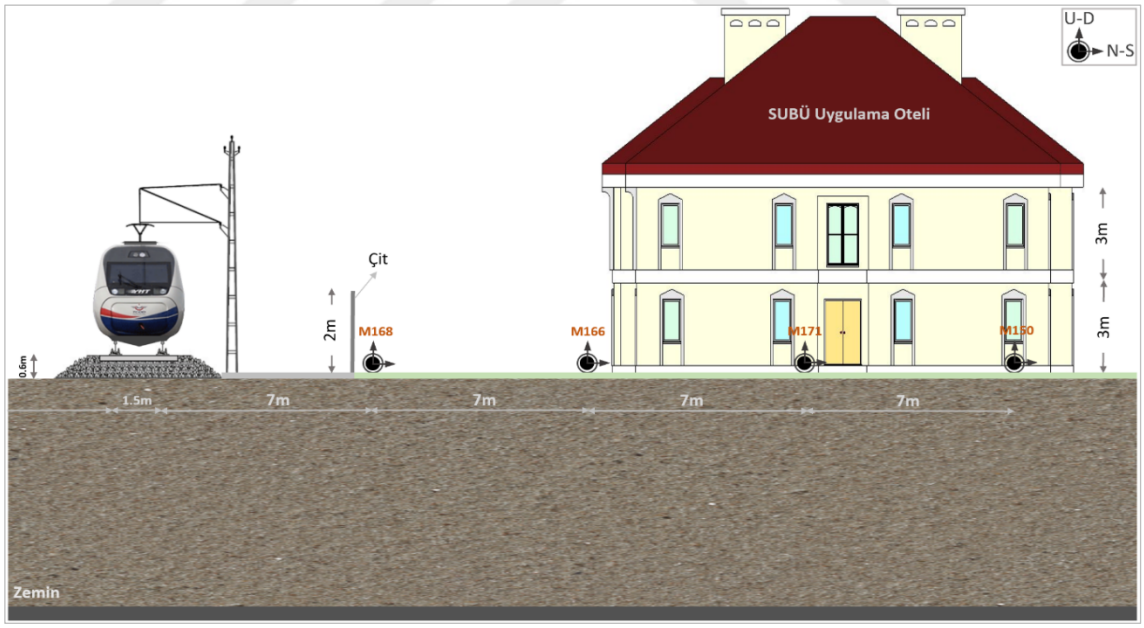


Şekil 3.11 : İncelenecek test sahasının 2D ve 3D görünüşü.

Trenlerin geçişi sırasında üç doğrultuda 4 ölçüm noktasında ölçümler yapıldı. Doğrultular N-S (demiryolu hattına dik), E-W (demiryolu hattına paralel) ve U-D (düşey dogrultu) olarak tanımlanmaktadır. Trenlerin tüm hatlardaki geçişleri ölçümler sırasında kaydedildi. Şekil 3.12, Sakarya-Kırkpınar'da yapılan saha ölçümlerine ait test düzenleme planını ve kesitini göstermektedir. Bu çalışmada, sayısal modeli doğrulamak için serbest zemindeki dört ivmeölçerin (M168, M166, M171 ve M150) sonuçları değerlendirilmiştir. Bu amaçla seçilen demiryolu hattı, İstanbul'dan Ankara'ya uzanan L1 hattı seçilmiştir. İvmeölçerler, birinci hattan 7, 14, 21 ve 28 m mesafelere yerleştirildi.



(a)



(b)

Şekil 3.12 : İncelenecek test sahasının plan ve kesit görünüşü.

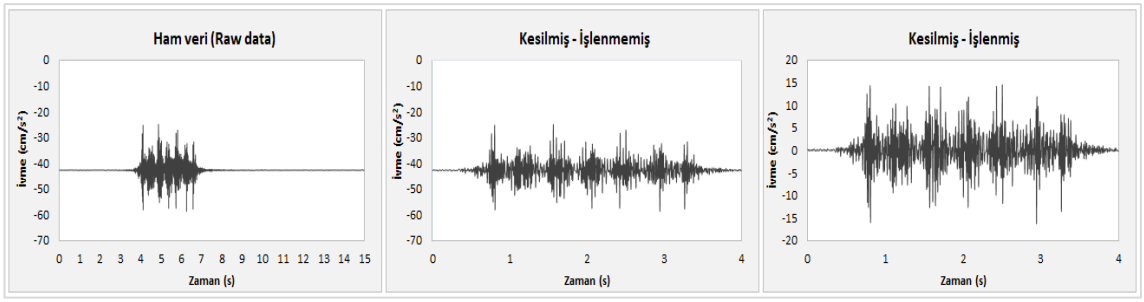
Yer titreşimini gözlemlemek için M168, M166, M171 ve M150 ivmeölçerlerle tren geçişi kaydedildi. Bu ölçümler, yüksek hızlı trenlerin 200-250 km/h hızla L1 hattından geçişleri sırasında gerçekleştirildi (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : HT65000 yüksek hızlı trenin 200-250 km/h hızla 1. hat (L1) üzerinde geçişi (Kırkpınar-Sakarya).

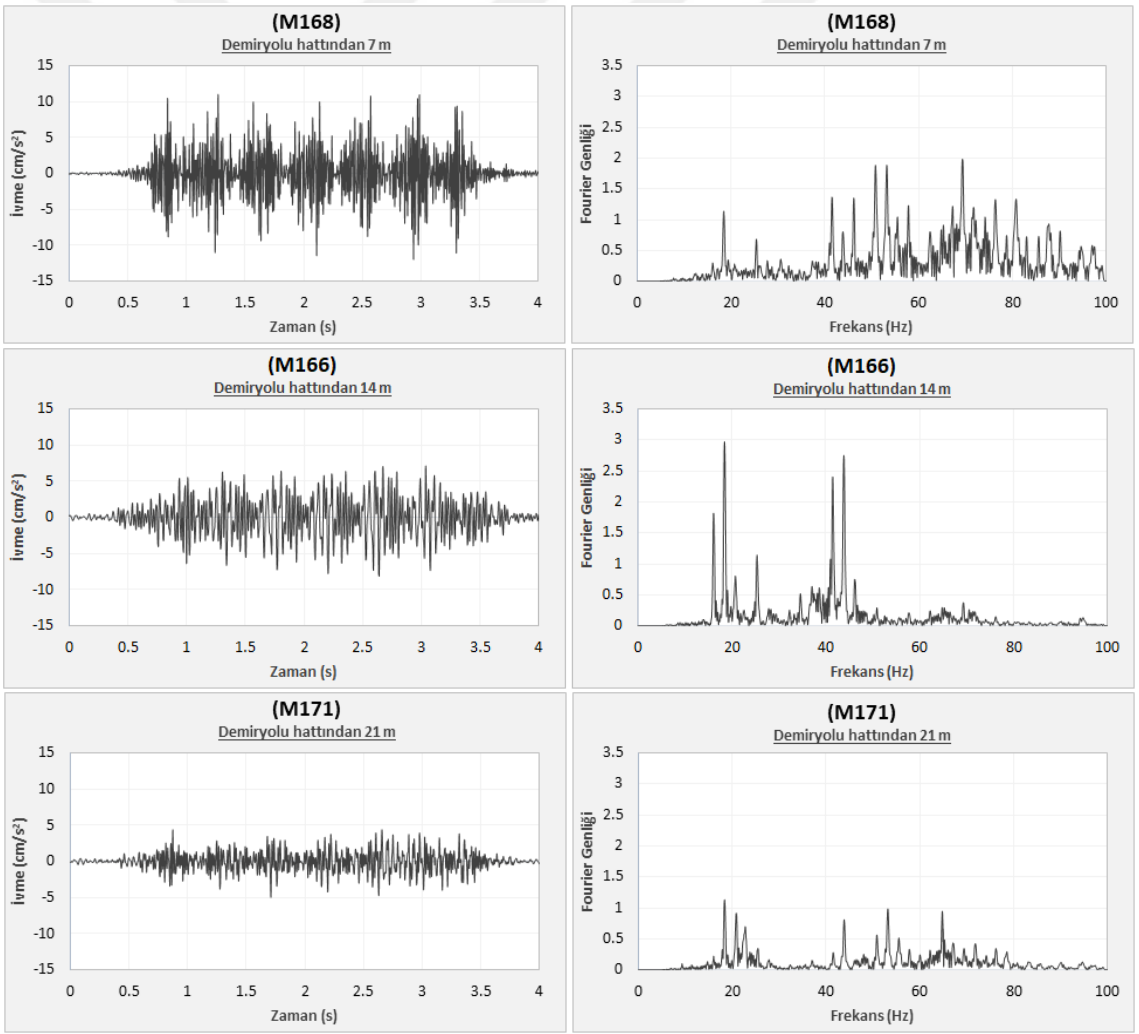
3.3.4. Saha ölçüm sonuçları

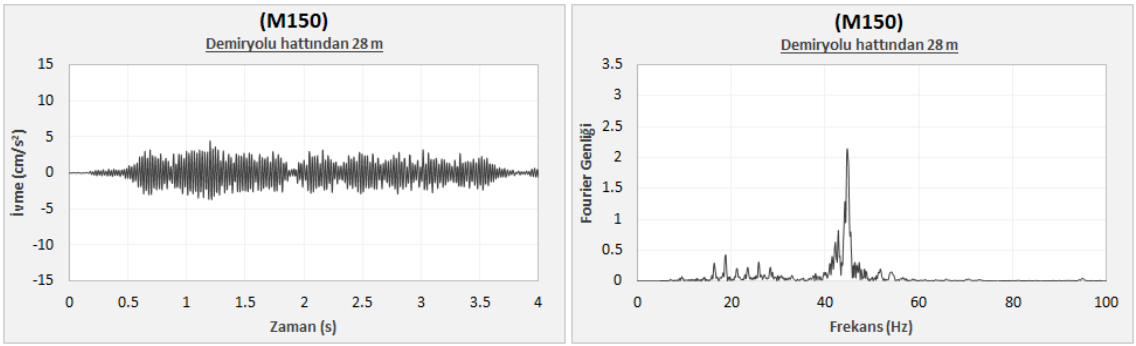
Yerel zemin koşullarını dikkate alarak, Yüksek Hızlı Tren'in (YHT) tek yönlü tekrarlı geçişlerinden kaynaklanan serbest yüzey yer hareketini incelemek ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla belirli aralıklarla titreşim kaydı alınmıştır. Demiryolu hattına dik doğrultuda konumlandırılan ivmeölçerler aracılığıyla elde edilen veriler, belirli mesafelerdeki dinamik yük kaynağından kaynaklanan ivme genlik değerlerini ortaya çıkardı. Deneysel veriler, değerlendirmeye tabi tutulmadan önce sinyal bozuklukları olan gürültünün filtrelenmesi gerekti. Bu amaçla, SeismoSignal yazılımı kullanılarak veri filtreleme işlemi gerçekleştirilmistir. Tüm ivmeölçerlerden elde edilen kayıtlar için uygun geçiş süreleri belirlendi ve ölçüm değerleri senkronize bir şekilde düzenlenmek üzere ham kayıtlar kısaltılmıştır. Verilerin yorumlanabilir hale getirilmesi için, frekans aralığını 10-100 Hz olarak belirleyerek Butterworth filtreleme yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara ait veri ölçümleri, zaman ve frekans tanım alanında saniyede 200 veri kaydedilebilecek şekilde ayarlandı ($\Delta t = 1/200 = 0.005$). Örneğin, Şekil 5'te, serbest zemin titreşim deneyinin sonuçlarından demiryolu hattına en yakın ivmeölçer için elde edilen ivme-zaman grafiği, filtrelenmemiş ve gürültüden arındırılmış olarak sunulmuştur.



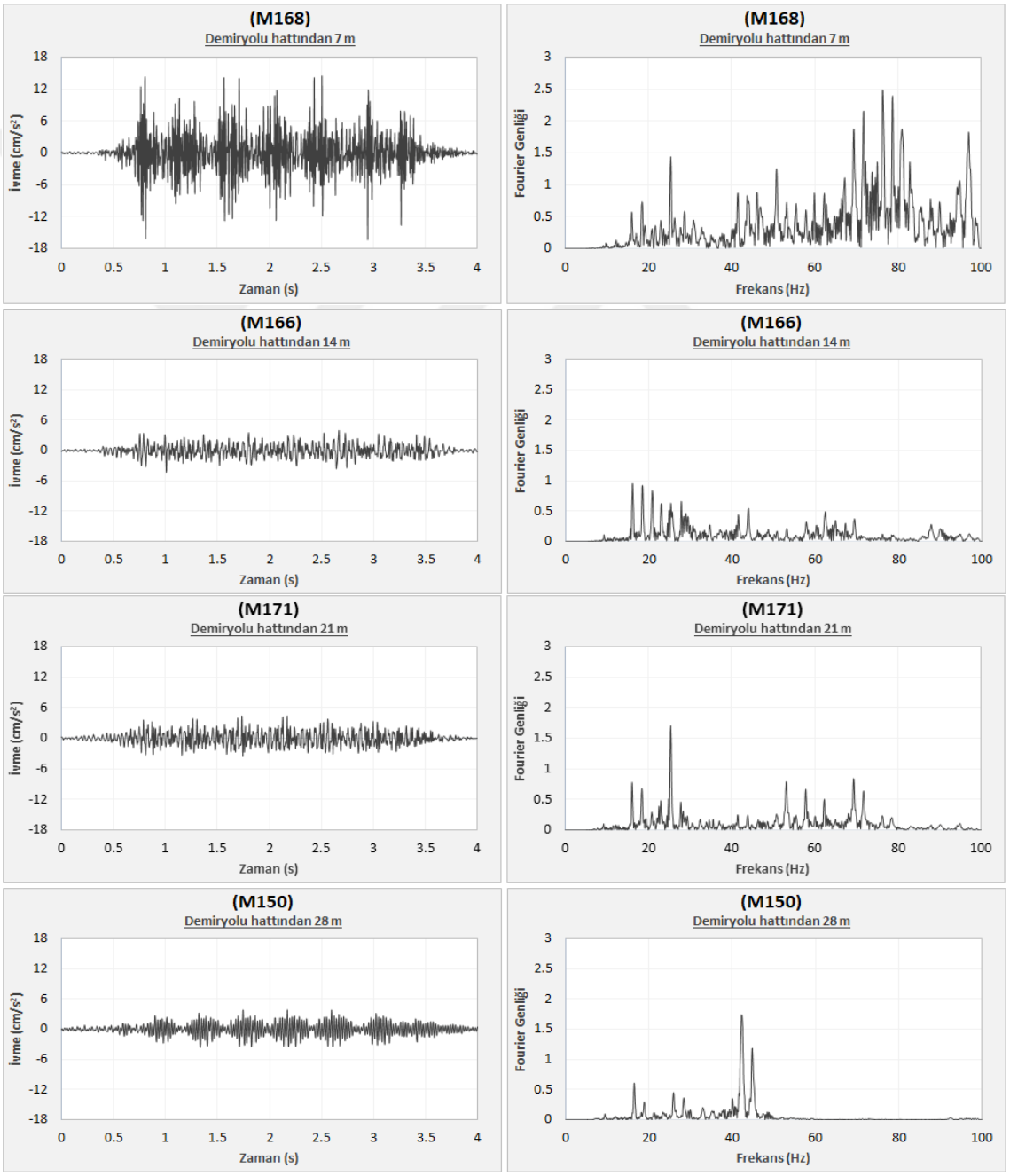
Şekil 3.14 : Demiryolu hattına paralel doğrultuda ivme-zaman grafiği.

Serbest zemin hareketinde incelenen ana unsur, uzaklığa bağlı olarak dalga yayılımının ne şekilde değişeceğinin gözlemlenmesidir. Gözlem noktalarındaki x, y ve z bileşenlerine ait ölçülen yer ivme değerleri, demiryolu güzergahındaki mesafelere göre değişen Fourier genliği ile ilişkilendirilerek çeşitli grafikler üzerinde gösterilmiştir (Şekil 3.15-3.17).

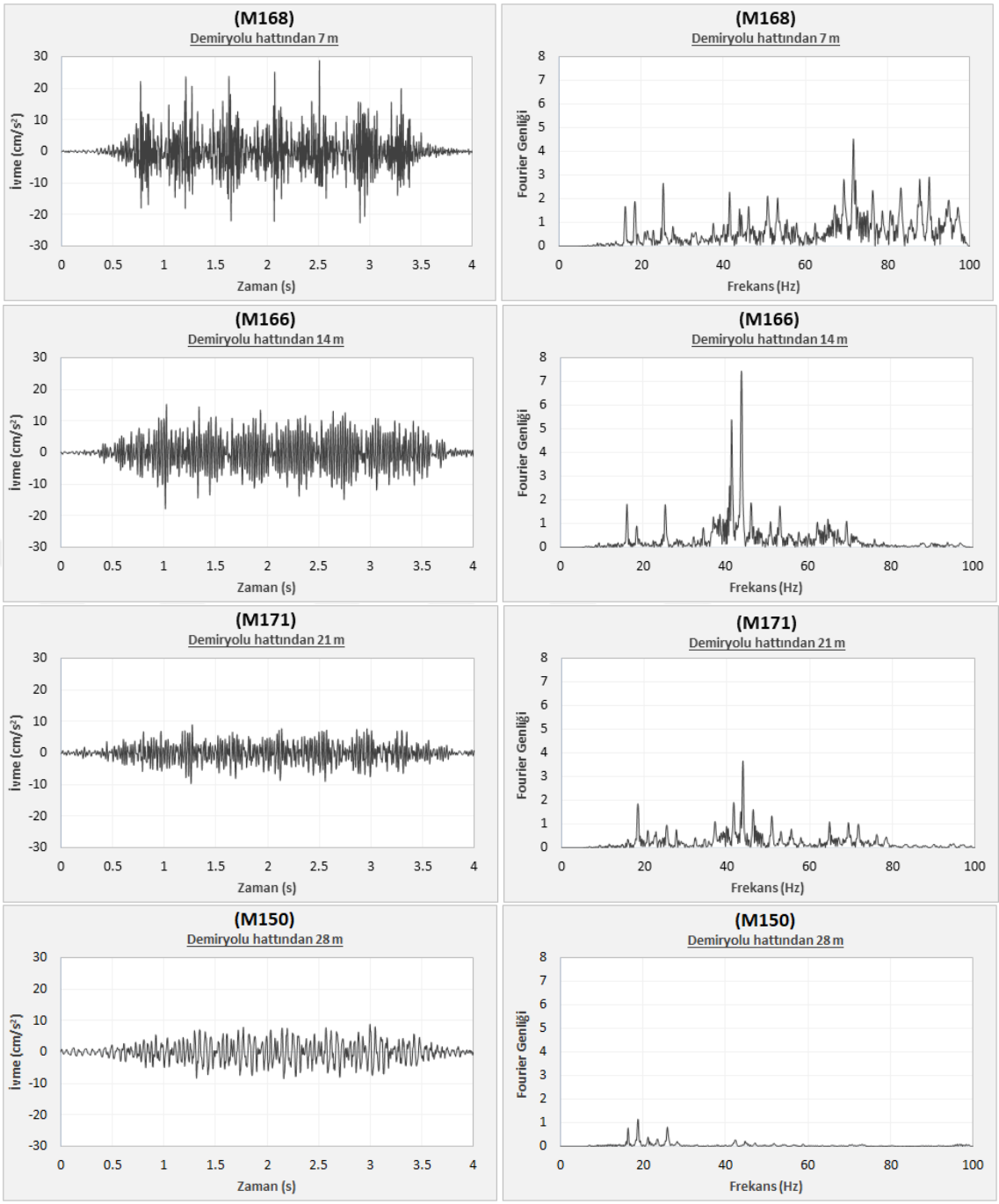




Şekil 3.15 : Demiryolu hattına dik doğrultuda (N-S) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman ve Fourier genliği grafikleri.



Şekil 3.16 : Demiryolu hattına paralel doğrultuda (E-W) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman ve Fourier genliği grafikleri.



Şekil 3.17 : Düşey doğrultuda (U-D) ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait ivme-zaman ve Fourier genliği grafikleri.

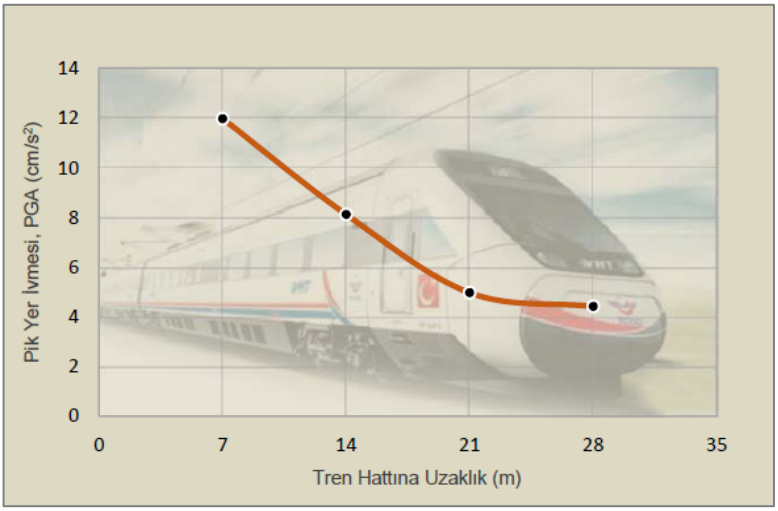
Tren hattına dik doğrultuda 7 m aralıklarla konumlandırılan ve üç eksende de yayılan titreşim etkilerini kaydeden ivmeölçerler vasıtasıyla ivme-zaman kayıtları alınmıştır. Elde edilen bu kayıtlar öncelikle sinyal işleme yöntemleri kullanılarak arındırılmış ve sadeleştirilmiştir. Demiryolu hattına dik (N-S), demiryolu hattına paralel (E-W) ve düşey (U-D) doğrultularında hızlı tren geçişi sırasında yayılan titreşimlerin genlikleri incelendiğinde düşey doğrultuda en büyük genliğin olduğu görülmektedir (Şekil 3.15-3.17). Tüm titreşim doğrultularında, mesafeye bağlı olarak ölçülen titreşimlerin frekans

içeriklerinde zemin ortamının büyük ölçüde değişikliklere sebep olmuştur. Hatta yakın ivmeölçerlerde, geniş bir aralıkta (20-100 Hz) yayılan frekans içeriğine sahip titreşim etkileri bulunmakta iken hatta uzaklaştıkça frekans içeriği daha da sadeleşmekte Fourier Genlik spektrumlarında 20 ve 45 Hz frekans değerleri için maksimum genliklerin yoğunlaştığı meydana gelmiştir. Özellikle yatay doğrultulardaki dalga yayılımı incelendiğinde frekans değerlerinde farklılaşma gözlemlenirken bunların aksine düşey doğrultuda mesafeye bağlı olarak Fourier genlik değerlerinde ve bunlara karşı gelen frekans değerlerinde de küçülme ortaya çıkmıştır.

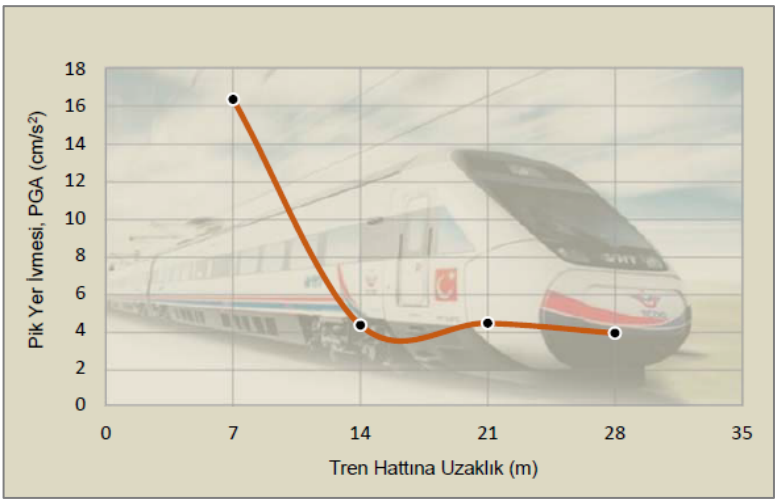
Aynı yönde hareket eden trene ait ölçülen titreşim verilerinin, mesafeye bağlı olarak maksimum yer ivmelerindeki değişimlerde elde edilmiştir (Tablo 3.4). İvme–zaman grafiklerinden alınan genlik değerleri, demiryolu hattı 0 m kabul edilip hattan 28 m uzaklığa kadar maksimum yer ivmelerinin değişimi tüm doğrultular için grafiksel olarak gösterilmiştir (Şekil 3.18). Elde edilen bu grafikler aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak kurulacak sayısal modelin doğrulanmasında da kullanılacaktır.

Tablo 3.4 : Maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri (cm/s^2).

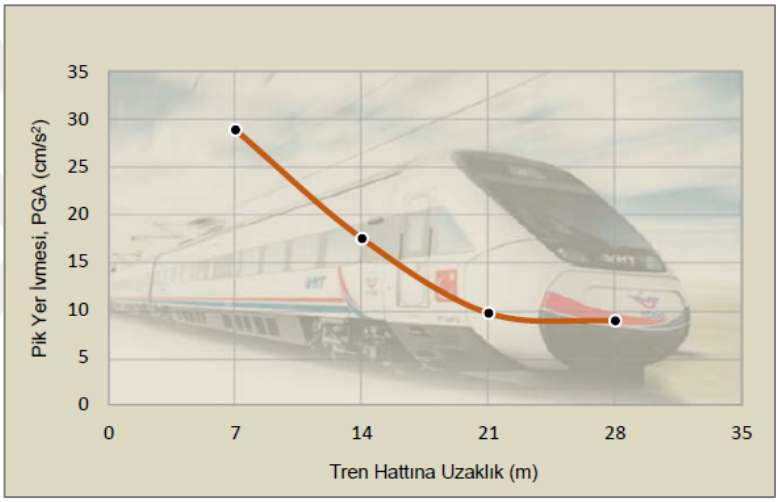
İvmeölçer	Uzaklık (m)	Hatta dik (N-S)	Hatta paralel (E-W)	Düşey doğrultu (U-D)
M168	7	11.971	16.332	28.856
M166	14	8.116	4.262	17.428
M171	21	4.966	4.366	9.595
M150	28	4.416	3.838	8.793



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.18 : Demiryolu hattına (a) dik doğrultuda (b) paralel doğrultuda ve (c) düşey doğrultuda ölçülen serbest zemin titreşimlerine ait en büyük yer ivmeleri.

Şekil 3.18 incelendiğinde, dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça, serbest zemin yüzeyinde meydana gelen ivme genliklerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, düşey doğrultuda yayılan titreşim etkilerine ait ölçülen ivme genlik bileşenlerinin, tren hattına dik ve paralel doğrultudaki genlik bileşenlerine kıyasla daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 4. SONLU ELEMAN MODELİNİN SAYISAL SİMÜLASYONU VE DOĞRULANMASI

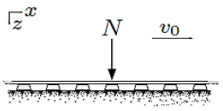
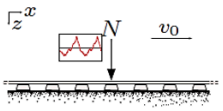
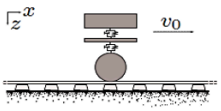
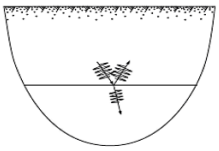
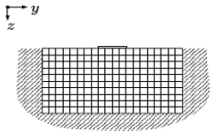
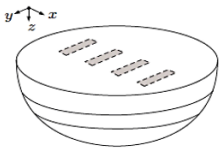
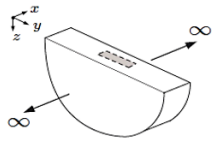
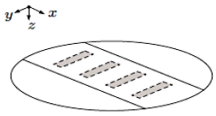
Sayısal modelleme, titreşim seviyelerini tahmin etmek ve bir sahayı veya genel olarak bir yapıyı değerlendirmek için bir yöntem olarak kullanılabilir. Kullanılan sonlu elemanlar (FE) modelinde, parametrik çalışmalar yapılmadan önce, sayısal modelin gerçek davranışı temsil etmesinin sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle, sayısal modelin deneysel verilerle doğrulanması gerekmektedir. Bu bölümde, farklı zemin koşullarının ve tren hızlarının serbest zemin hareketlerinde titreşim seviyelerini nasıl etkilediğini incelemek için gelişmiş bir üç boyutlu sonlu eleman sayısal modeli kurulmuştur. Bu, bir demiryolu hattı-zemin modelinin parametrik bir çalışmasıyla yapılmaktadır. Sayısal modeli doğrulamak için, yapılan saha deneyler sonucunda elde edilen titreşim verileri kullanılmıştır.

Çeşitli mühendislik ve bilim disiplinlerinde uygulanan sınır eleman yöntemi (BEM) ve sonlu farklar yöntemi (FDM), daha iyi bilinen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile birlikte geniş bir mühendislik sınıfı ve bilimsel problemler için etkili hesaplamalı çözüm sağlayan ana sayısal yöntem olarak kabul edilebilir. Diğer pek çok sayısal yöntem gibi, FEM'e olan ilgi, bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmelerin desteklemesi ile son yıllarda kademeli olarak artmıştır. FEM, BEM ve FDM'nın teorik temelleri ile avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 : FEM, BEM ve FDM yöntemlerinin karşılaştırılması.

	Sınır Eleman Yöntemi (BEM)	**Sonlu Eleman Yöntemi (FEM)**	**Sonlu Fark Yöntemi (FDM)**
Teorik esası	Sürekli ortamlar mekaniği problemlerinin hareketi için yazılan diferansiyel denklem takımının sınır integral formülasyonuna dönüştürülmesi esasına dayanır.	Kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemleri çözmek için kullanılan nümerik bir tekniktir.	Düzgün aralıklı düğümlerden oluşan bir ağ kullanarak diferansiyel denklemi yöneten sonlu fark yaklaşımına dayalıdır.
Avantajları	• Yalnızca sınırın ayrıklaştırılması • Sonsuz problem için ideal • Daha az hesaplama süresi	• Basit fonksiyonun entegrasyonu • Simetrik ve seyrek matrisler • Karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere • Kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine	• Uygulanması en kolay yöntem • Sayısal entegrasyon yok
Dezavantajları	• Çoğunlukla simetrik olmayan matrisler • Karmaşık integral bağıntı gerektirir • Homojen olmayan ve doğrusal olmayan problemlerin zor işlemi	• Etki alanı ağları gerektirir • Hesaplama süreci daha fazla • Daha küçük parçalar kullanılması bazı sınır şartları oluşturacaktır (özel bilgisayar ve yazılım gerektirebilir)	• Etki alanı ağları gerektirir • Sonsuz problemler için uygun değildir • Çok iyi ağ gerektirir • Hesaplama süreci zaman alıcıdır

Son yıllarda, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bilgisayar programlarının yaygınlaşmasıyla birlikte, trenin neden olduğu yer titreşimlerini simüle etmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma çalışmaları, Şekil 4.1'de özetlenmiştir.

Trenin modellenmesi → / Zeminin modellenmesi ↓	Sabit aks yükü 	Rastgele aks yükü 	Detaylı model 
 Analitik çözüm	Krylov (1994,1998) Kaynia ve diğ. (2000) Sheng ve diğ. (1999,2004) Degrande ve Lombaert (2001) Karlström (2006) Takemiya ve Bian (2005) Maldonado ve diğ. (2007)	Lu ve diğ. (2006) Sheng ve diğ. (2004) Lombaert ve diğ. (2009)	Datoussaïd ve diğ. (2000) Sheng ve diğ. (2003) Lai ve diğ. (2005) Auersch (2007) Xia ve diğ. (2010) Lombaert ve diğ. (2006)
 2D FEM	Datoussaïd ve diğ. (2000) Sheng ve diğ. (2003) Lai ve diğ. (2005) Auersch (2007) Xia ve diğ. (2010) Lombaert ve diğ. (2006)	Yang ve diğ. (2003) Pakbaz ve diğ. (2009)	
 3D FEM	Hall (2003) Powrie ve diğ. (2007) Anastasopoulos ve diğ. (2009) Stupazzini ve Paolucci (2010)		Gardien ve Stuit (2003) Ju (2009) Zhai ve diğ. (2010) Banimahd ve diğ. (2011) Wang ve diğ. (2012) Kouroussis ve diğ. (2012,2013) Connolly ve diğ. (2013,2013)
 2.5D BEM/FEM	Sheng ve diğ. (2006) Yang ve diğ. (2003) François ve diğ. (2010) Costa ve diğ. (2010) Gao ve diğ. (2012)		
 3D BEM (yüzey)	O'Brien ve Rizos (2005) Andersen ve Jones (2006) Auersch (2006) Chebli ve diğ. (2008) Galvín ve Domínguez (2009)		Galvín ve diğ. (2010) Romero ve diğ. (2010)

Şekil 4.1 : Demiryolu kaynaklı zemin titreşim modellerinin sınıflandırılması.

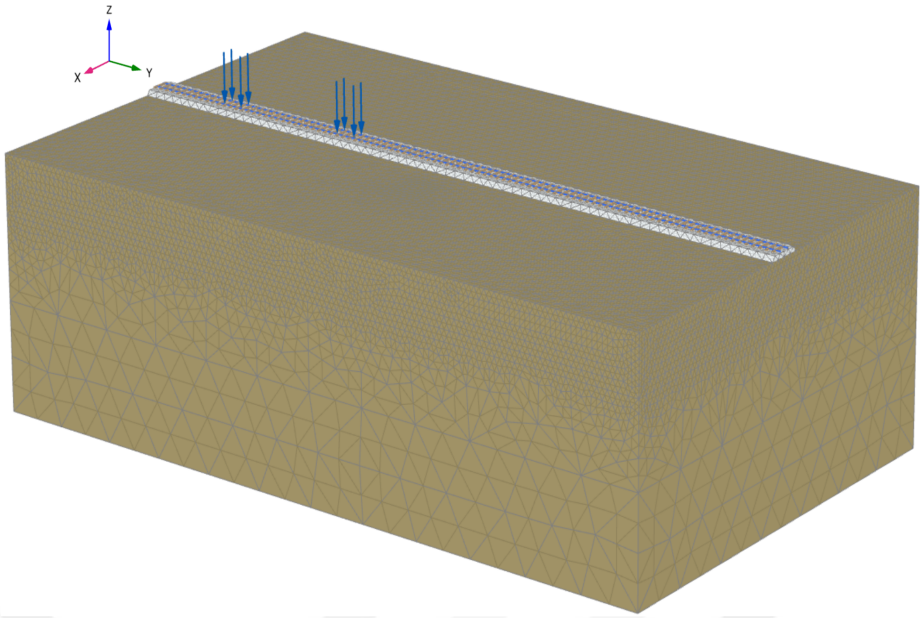
4.1. Sonlu Eleman Modellemesi

Sonlu eleman yönteminin, demiryolu hattı yapılarının davranışlarını analiz etmek için yararlı ve etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır (Selig ve Waters, 1994; Esveld, 2001). Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik alanında sıkça kullanılan sayısal bir tekniktir ve genellikle kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için tercih edilir. Bu yöntem, belirli bir bölgeyi veya yapıyı, daha küçük parçalara, yani sonlu elemanlara ayırarak analiz etmeyi temel alır. Bununla orijinal sürekli sistemin ayrık noktalara sahip bir sisteme dönüşümü yapılır. Sonlu elemanlar birlikte bir sonlu eleman ağını (FE mesh) tanımlar

ve her sonlu eleman içinde davranışa genellikle bir polinom (örneğin doğrusal veya ikinci dereceden) ile yaklaşılır. Genel olarak, daha iyi bir ağ, artan hesaplama süresinin dezavantajı ile daha doğru bir çözümle sonuçlanır. Modelin sınırlarındaki davranışı tanımlayan sınır koşulları, diferansiyel denklemlerin çözülmesi için gereklidir.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak dalga yayılım problemlerini çözmenin bir eksikliği vardır, çünkü yayılım genellikle sonlu bir bölge içinde sınırlandırılmaz, yani dalgalar genellikle kaynaktan uzaklık arttıkça kademeli olarak sönümlenir. Bu nedenle dalga yayılımını simüle etmek, denklemleri çözmek için önemli hesaplama gücü gerektiren çok büyük modellere yol açabilir. Bunu kontrol etmenin bir yolu, sınırlarda yansıtmayan elemanların kullanılması, sonsuz bir bölgenin simüle edilmesi ve böylece modelin boyutunun küçültülmesidir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda bu yöntem kullanılacaktır.

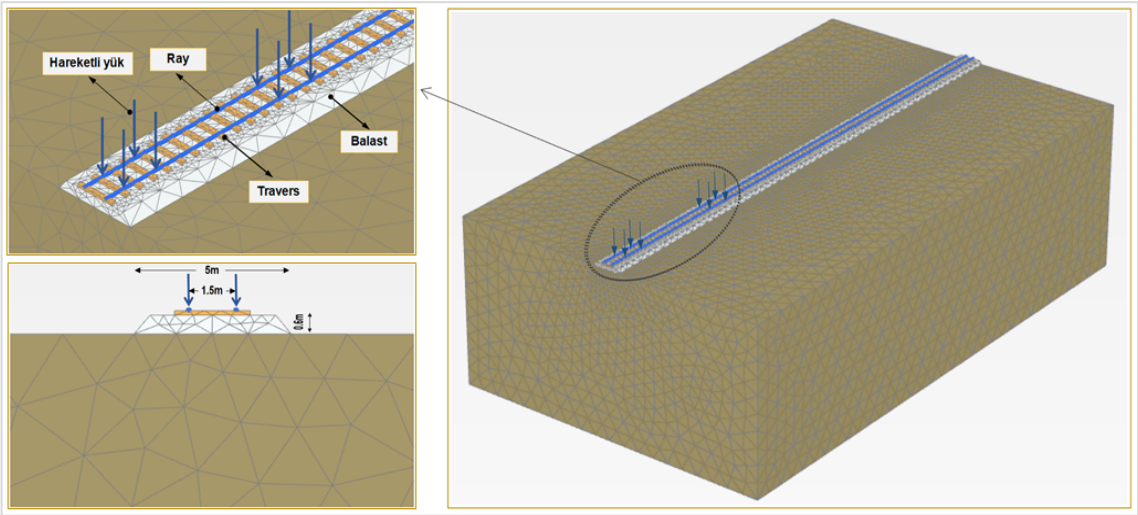
Sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS yazılım programı, geoteknik problemlerin analizinde başarılı bir performans sergilemiştir. PLAXIS 3D, deformasyon ve stabilite analizleri ile yer altı suyu gibi çeşitli geoteknik problemleri modellemek için kullanılmaktadır ve bu modeller karmaşık geometriye sahip olabilir. Geometri sınırları, x, y ve z koordinat düzlemleri üzerinde oluşturulurken, sınır koşulları zeminin x, y veya z ekseni boyunca hareketine bağlı olarak tanımlanabilir. Model ağının özelliklerini belirleyen ve geometriyi ayrıştırarak sonlu eleman modeline dönüştüren kısım, sonlu eleman ağıdır. Sonlu eleman örgüsündeki hassasiyeti artırmak veya azaltmak, buna bağlı olarak analiz yapmak mümkündür. Bu çalışmada, ray, travers, balast ve zemin ortamını içeren çok katmanlı bir kompozit demiryolu hattı-zemin sisteminin üç boyutlu sonlu eleman modeli, PLAXIS 3D Ultimate versiyonu kullanılarak sayısal olarak simüle edilmiştir (Şekil 4.2). Bu versiyonu, geçmiş sürümlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Kullanıcı arayüzü, PLAXIS 3D ile uyumlu olacak şekilde elden geçirilmiş ve modellemeyi önceki sürümlere kıyasla daha kolay hale getiren birkaç yeni ekleme eklenmiştir. Bu tür eklemelere birkaç örnek, Commands Runner ve hareketli yüklerin simülasyonudur.



Şekil 4.2 : Sonlu eleman modeli.

4.1.1. Demiryolu üstyapı platformunun özellikleri

Demiryolu hattının yapısı; raylar, traversler ve balast tabakasından oluşmaktadır. Balast, rayları ve traversleri destekleyecek şekilde zeminin üstüne yerleştirilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modelinde deneysel ölçümlerinin yapıldığı test sahası ile uyumlu olarak balast taban genişliği 5 m ve zeminden yüksekliği ise 0.7 m olarak alınmıştır. Dikdörtgen kesitli traversler, 15 cm yüksekliğinde, 30 cm genişliğinde ve 240 cm uzunluğundadır. Raylar, hat uzunluğu boyunca uzanan tek boyutlu kiriş elemanı olarak modellenmiştir. Raylar arası mesafe 1.5 metredir. Diğer tüm bileşenler (örn. travers, balast ve zemin ortamı), lineer elastik davranışa sahip üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak geliştirilmiş ve modellenmiştir. Ray boyunca 0.7 m aralıklarla toplam 100 tane travers yerleştirilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modeli Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modelin kesiti ve 3D görünümü.

Demiryolu üstyapı tasarımında, tren yüklerinin zemine iletilme süreci, adım adım gerilme azaltma ilkesine dayanmaktadır. Tekerleklerle raylar arasında oluşan en yüksek gerilmelere odaklanırken, raylar ile traversler arasındaki gerilme etkisi genellikle ikinci düzeyde kalır. Bu nedenle, traversler ile altındaki balast yatağı arasındaki gerilmeler genellikle göz ardı edilebilir (Verbic, 1996). Ray, travers ve balast elastik malzeme olarak modellenmiştir. Model malzemelerin özellikleri Tablo 4.2-4.3'te özetlenmiştir.

Tablo 4.2 : Sayısal simülasyonda kullanılan malzeme parametreleri (Moormann ve diğ., 2016; Fu ve Zheng, 2014).

Parametre	Birim	Travers	Balast
Yoğunluk (γ)	kN/m^3	24.5	18
Elastisite Modülü (E)	kN/m^2	20×10^6	195×10^3
Poisson Oranı (ν)	-	0.2	0.3
Kayma dalgası (V_s)	m/s	1827	202
Kayma Modülü (G)	kN/m^2	8.3×10^6	75×10^3

Tablo 4.3 : Sayısal simülasyonda kullanılan ray mekanik özellikleri (Fu ve Zheng, 2014).

Parametre	Birim	Ray (Kiriş)
Kesit alanı (A)	m^2	7.7×10^{-3}
Birim ağırlık (γ)	kN/m^3	78
Elastisite Modülü (E)	kN/m^2	200×10^6
Atalet momenti (I_x)	m^4	3.05×10^{-3}
Atalet momenti (I_z)	m^4	5.13×10^{-6}

4.1.2. Zemin ortamının sınır koşulları ve malzeme özellikleri

4.1.2.1. Zeminin malzeme özellikleri

Uygun zemin davranış modelinin seçimi, ortam özelliklerinin dalga yayılım problemlerinde yüksek bir etkiye sahip olması nedeniyle önemlidir. Zemin dinamik analizi için genellikle iki tip model kullanılır; doğrusal ve doğrusal olmayan. Karmaşık bir zemin modeli için modeli uygun şekilde inşa ve kalibre etmek çok daha fazla hesaplama gücü, zemin özellikleri bilgisi ve zaman gerektirir. Tren kaynaklı titreşim esas olarak zemin yüzeyi boyunca yayıldığından ve zemin ortamında meydana getirdiği deformasyonlar elastik bölgede kaldığından (Zou ve diğ., 2020), bu çalışmada zemin modeli homojen ve doğrusal elastik olarak basitleştirilebilmektedir. Lineer elastik modelin kullanımı, zemin ortamında tren geçişi tarafından üretilen dinamik dalganın neden olduğu nispeten küçük deformasyonlardan kaynaklanmaktadır. Bu model yaklaşımında, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu yani gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin lineer olduğu tanımlanmaktadır. Oluşturulan sayısal modelde, modelin doğrulanmasında Tablo 4.4'teki zemin özellikleri kullanılmıştır. Bu parametreler, Sapanca-Kırkpınar'daki jeoteknik deneysel çalışmadan elde edilen verilerdir. Zemin ortamı tek tabakalı olarak modellenmiştir.

Tablo 4.4 : Zemin malzeme özellikleri (Faizan ve diğ., 2022).

Parametre	Birim	Gevşek zemin
Yoğunluk (γ)	kN/m^3	16.18
Elastisite Modülü (E)	kN/m^2	141×10^3
Poisson Oranı (ν)	-	0.478
Kayma dalgası (V_s)	m/s	170
Kayma Modülü (G)	kN/m^2	47.7×10^3

PLAXIS sonlu eleman yazılımında malzeme sönümü için Rayleigh sönüm yaklaşımı dikkate alınmaktadır. Mühendislik uygulamalarında histeretik malzeme sönümü için genel olarak kullanılan parametre ξ ile gösterilen sönüm oranıdır.

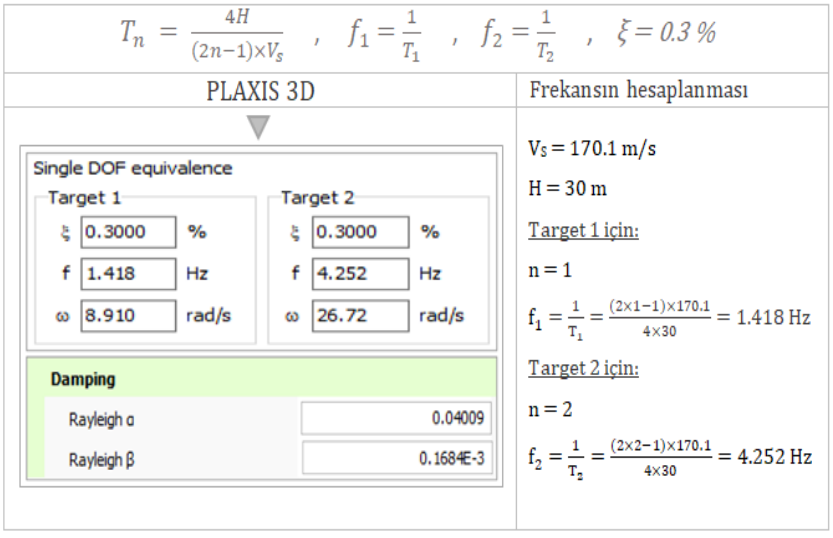
$$\xi_i = \frac{\alpha + \beta\omega_i^2}{2\omega_i} \tag{4.7}$$

Sonlu elemanlar yaklaşımında Rayleigh sönüm yaklaşımı, sistemin kütle ve rijitlik matrislerinin belirli oranlarda katılımını ön görerek en uygun sönüm ölçütlerinden birini oluşturmaktadır. Rayleigh sönümü için belirtilen denklem aşağıdaki gibidir:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \tag{4.2}$$

Burada, [C] sönüm matrisi, [M] kütle matrisi ve [K] rijitlik matrisi temsil etmektedir.

Farklı bir şekilde ifade etmek gerekirse: Geometrik sönümün, üç boyutlu sonlu eleman analizlerinde model sınırları içinde dikkate alındığı durumlarda, Rayleigh sönüm değerini çözümün kararlılığını tehlikeye atacak kadar küçültmemek önemlidir. Pratik uygulamalarda, Rayleigh sönümünün rijitlik katılım katsayısı, genellikle analizlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Malzeme sönümünün değişimini incelemek için kayma şekil değiştirmesine bağlı olarak killi ve kumlu zeminlerde çeşitli saha çalışmaları yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, hızlı ten geçişleri gibi çok düşük deformasyonların oluştuğu zemin ortamlarında küçük sönümlerin (sıfıra yakın) meydana geldiğini göstermektedir (Seed ve diğ., 1986; Vucetic ve Dobry, 1991). Tez kapsamında, malzeme sönümü Rayleigh sönümü açısından ele alınmış ve dinamik analizlerde sönüm oranı (ξ) % 0.3 mertebesinde seçilmiştir. Sönüm oranı ve baskın frekanslar girilerek α ve β katsayları hesaplanmıştır (Şekil 4.4).



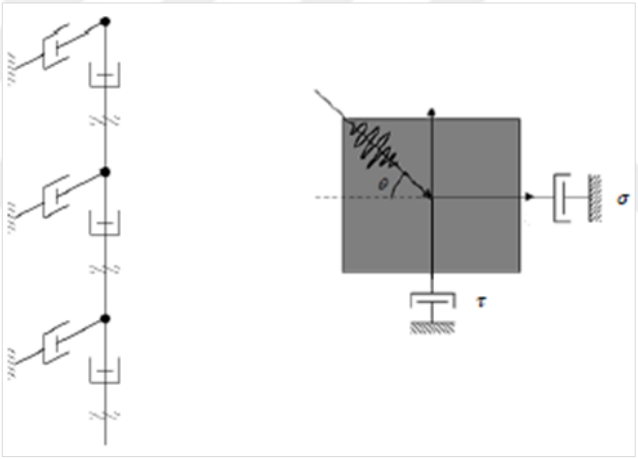
Şekil 4.4 : PLAXIS 3D'da sönüm parametreleri.

4.1.2.2. Zemin modelinin sınır koşulları

Dinamik analizin temel amacı, zemin ortamı boyunca dalga yayılımını doğru bir şekilde simüle etmektir. Gerçekte sonsuza doğru devam eden zemin ortamının sayısal

analizlerde modellenmesi sürecinin en önemli adımı ayrıklaştırmadır. Karmaşıklığı, büyük hesap hacmini ve zaman alıcı analiz süreçlerini azaltmak için model boyutlarının ve sınır koşullarının doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

Dinamik yük etkisi meydana geldiğinde, belirli bir zemin bölgesinin sonlu olması ve zemin ortamındaki dış yüklerin kaynaktan dışa doğru yayılması sonucunda oluşan dalgaların yayılma durumunda (yer hareketi dışındaki etkiler hariç), genellikle kabul gören ve sıkça kullanılan sınır koşulları özel viskoz sınırlardır (yutucu sınırlar). Bu tür sınır koşulları, zemin ortamında yayılan dalgaların sınırlardan yansıyarak sisteme geri dönmesini önleyerek ikincil etkilerin oluşmasını engeller. Ayrıca, bu sınır koşulları sayesinde sonsuz zemin bölgelerinin enerji iletim özellikleri de tanımlanabilir (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969). Bu sınır koşulları, sonlu eleman uygulamalarında kolayca entegre edilebilir. Bu koşullar, sınırlardaki tüm düğüm noktalarında tüm serbestlik derecelerinin sönümleyicilerle tanımlanmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : Viskoz sönümleyici yutucu sınırlar (Kırtel, 2013).

Yutucu sınırlar tarafından sınırlarda soğurulan normal ve kayma gerilmeleri;

$$\sigma = c_1 \rho V_p \dot{U} \tag{4.3}$$

$$\tau = c_2 \rho V_s \dot{U} \tag{4.4}$$

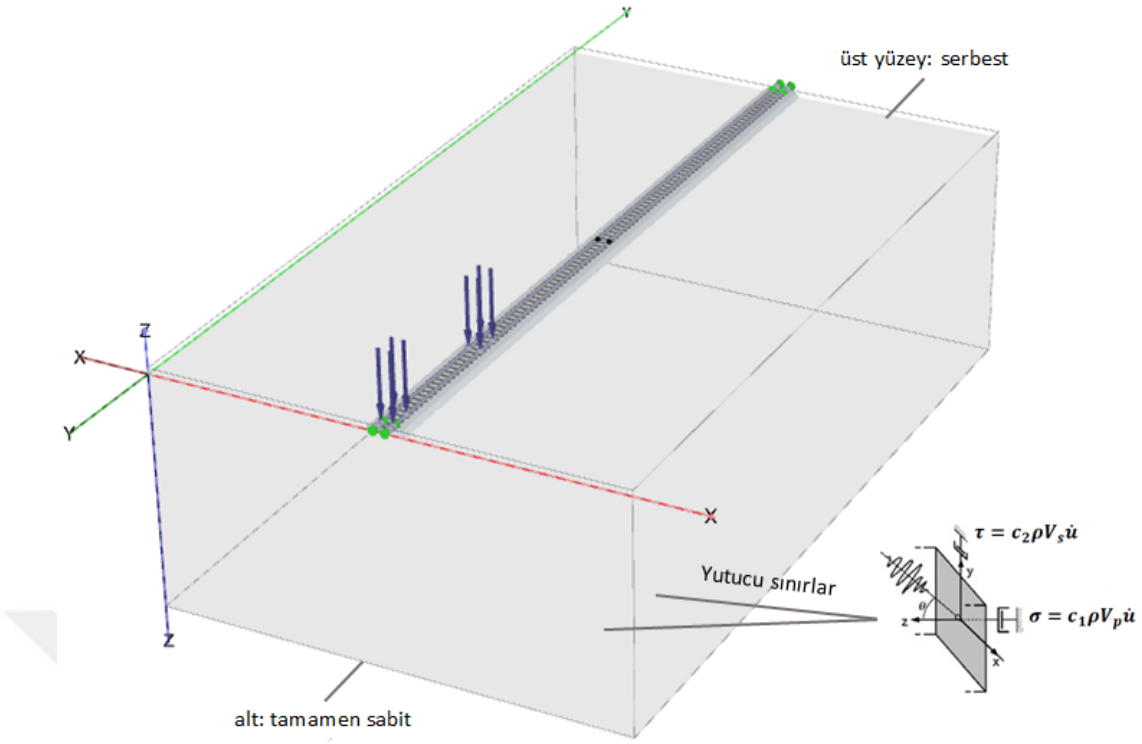
ifadeleri ile elde edilmektedir.

Burada, c_1 ve c_2, yumuşatma (relaxation) katsayılarını temsil eder. V_p ve V_s, sırasıyla basınç ve kayma dalgası hızlarını, ρ ise malzeme yoğunluğunu tanımlar.

Dinamik analizlerde, sınır koşulları davranısı etkilemeyecek şekilde seçilmelidir. Statik analizlerde, sabit sınır koşulları (fixed boundary conditions), analizin doğruluğunu etkilemeden ilgilenilen bölgeden belirli bir mesafeye yerleştirilebilir. Dinamik analizde sabit sınır, sonuçlarda önemli hatalara neden olan dalga yansımasına neden olabilir. Bu tür karmaşık davranışlar, genişletilmiş sınırları olan daha büyük modeller kullanılarak en aza indirilebilir ancak bunlar daha fazla hesaplama çabası gerektirdiğinden uygulanabilir değildir. Bu nedenle, mevcut calışmada sınırlardaki dalga yansımasını azaltmak için ilgili tüm eksenler boyunca standart ve soğurucu sınırlar tanımlanmıştır (standard and absorbent boundaries).

Sonsuz zemin ortamında dalga yayılışını doğru bir şekilde modelleyebilmek için, sistemdeki sonlu eleman ağı yapısı yoğunluğu ve sonlu ortamın sınır özellikleri aynı hassasiyetle ele alınmalıdır. Bu, öngörülen doğruluk seviyesine ulaşma ve çözüm sürecinin hesap yükünü dengeleme açısından son derece önemlidir. Ayrıca, iletilen dalgaların zemin sınırlarından yansıyarak geri dönmemesi için problem bölgesinin küçük tutulmaması gerekmektedir. Bu yanı sıra, sonsuza uzanan zemin bölgesinden çıkartılan sonlu zemin parçasının sınır şartlarının, geriye kalan zemin bölgesini nasıl temsil edeceğinin iyi bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Dinamik analizlerde, yutucu yapay sınırların geçirimliliğini tanımlarken ortaya çıkan belirsizlikler nedeniyle, sınırlarda olası dalga yansımalarının yapısal davranışı bozmasını önlemek amacıyla bölge sınırları, statik çözümlere göre daha uzakta oluşturulmalıdır (Dasgupta, 1982).

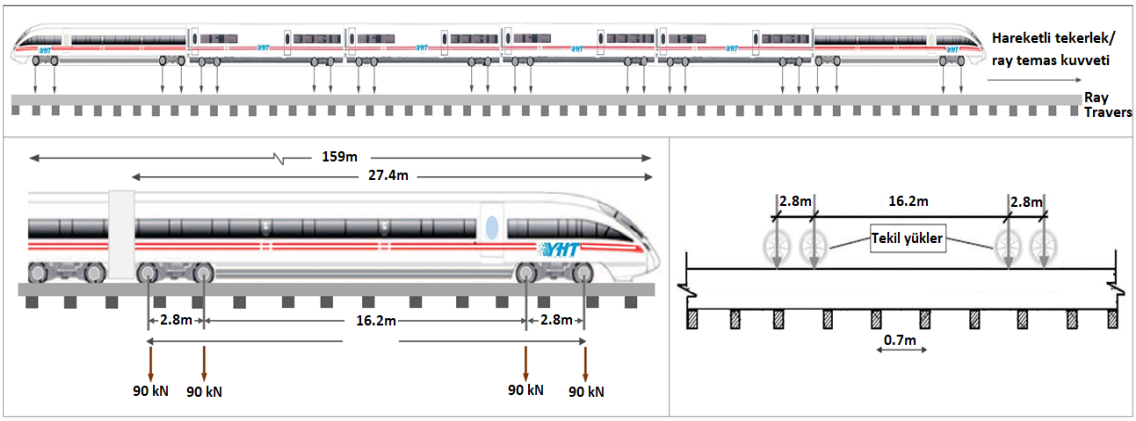
PLAXIS 3D'daki sınır koşulları, model uzantılarında otomatik olarak uygulanır, ancak bunlar "fixities" altında faz oluşturma penceresinde değiştirilebilir. Varsayılan olarak PLAXIS standart sabitliklere (standard fixities) sahiptir.



Şekil 4.6 : PLAXIS 3D modelindeki sınır koşulları.

4.1.3. Titreşim kaynağının simülasyonu

Sonlu eleman sayısal modellemesinde kullanılan tren geometrisi ve standart dingil yükleri HT65000 yuksek hızlı trenidir. TCDD tarafından kullanılan HT65000 YHT seti, yüksek hızlı demiryolu yolcu taşımacılığı için tasarlanmış olup Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu sette yer alan lokomotif, yolcu vagonlarını çekmek için kullanılmaktadır ve uzunluğu 27.4 metredir. Tekerlekler arası mesafe ise 2.8 metredir. YHT, 6 vagon ile birlikte toplamda 159 metre uzunluğa erişerek, yüksek hızda hareket eden ağır bir kütleye dönüşmektedir. HT65000 serisi lokomotif seti ise 4 dingilli ve yaklaşık 720 kN ağırlığındadır. Bu durumda, bir tekerleğin etkileşimde bulunduğu kuvvet 90 kN olarak belirlenmiştir. Yüksek hızlı trenin özellikleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

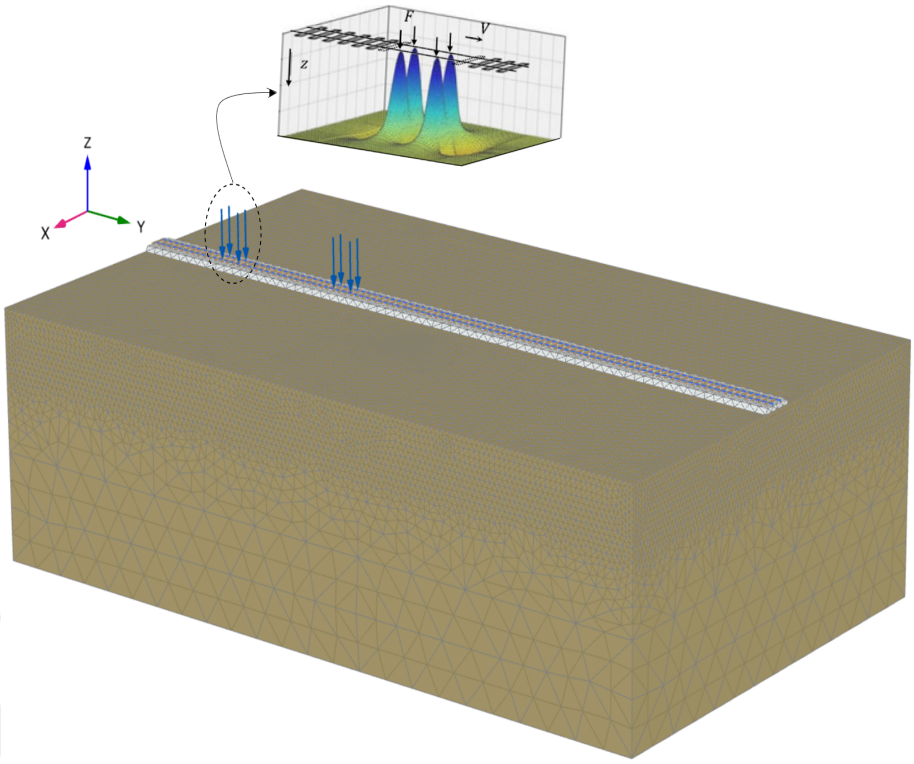


Şekil 4.7 : HT65000 yüksek hızlı tren setinin boyutları ve şematik diyagramı.

Tablo 4.5 : HT65000 yüksek hızlı trenin özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).

Bileşenler	Karakteristikler	Semboller	Büyüklük	Birim
Lokomotif	Dingil yükü	F_z	180	kN
HT65000	Hareket hızı	V	250	km/h

Sonlu eleman modelinde hızlı tren etkisi, bir kuvvet-zaman ilişkisi ile dinamik yük olarak tanımlanır. Tren yükü statik olmadığı ve zamanla değiştiği için dinamik bir nokta yükü olarak kabul edilir. Dinamik yüklerin simülasyonu için tekil yükler bir takım yerleştirilmiş noktalarla tanımlanmıştır. Dinamik analizlerde, lokomotifin dört dingil kuvvetini simüle etmek, raya sekiz tekil yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Demiryolu hattına dik yönündeki (x bileşeni) iki tekil yük arasındaki mesafenin 1.5 m olduğu ve iki ray arasındaki mesafeye eşit olduğu varsayılmıştır. Üç boyutlu sistemde, bir çift tekil yük birlikte dingil yükünü dağıtan tekerlekleri temsil eder. Dingil yükü 180 kN'dur. Bu nedenle çiftteki her nokta yükün büyüklüğü 90 kN'dur. Bu yük fonksiyonu, 200-250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişini temsil eden 60-80 Hz bir baskın frekansa sahiptir. Sayısal işlemlerde katar hızı V = 250 km/h olarak alınmıştır.



Şekil 4.8 : Hareketli yükü simüle etmek için geliştirilmiş üç boyutlu sonlu eleman modeli.

Zeminden iletilen titreşimlerin kaynağı olarak çeşitli mekanizmalar tanımlanmıştır (Kouroussis ve diğ., 2015). Tekerlek/aks ağırlığı, traversler aracılığıyla zemine iletilir ve tren ve demiryolu hattının periyodikliği ile değişkenlik gösterir. Aks yüklerine ek olarak, demiryolu hattındaki düzensizlik de zemin ortamında oluşan kuvvetleri belirli noktalarda yoğunlaştırabilir. Bunlardan bazıları, demiryolu hattındaki kavşak noktalarında doğrudan gözlemlenebilir. Bir tren hızı (V_0) için farklı geçiş uyarma mekanizmaları şu şekilde tanımlanabilir:

Dingil geçişi için baskın frekansı:

$$f_a = \frac{v_0}{L_a} \tag{4.5}$$

Boji geçişi için baskın frekans:

$$f_b = \frac{v_0}{L_b} \tag{4.6}$$

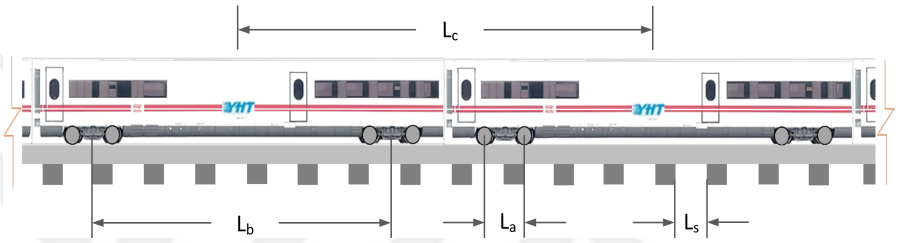
Vagon geçişi için baskın frekans:

$$f_c = \frac{v_0}{L_c} \tag{4.7}$$

Travers geçiş frekansı:

$$f_s = \frac{v_0}{L_s} \tag{4.8}$$

Burada ilgili geçiş uzunlukları (L_i) Şekil 4.9'de gösterilmektedir. Bu mekanizmalar, demiryolu hattı-zemin reaksiyonuyla bağlantılıdır. Bu frekanslar mevcut çalışmada 250 km/h hızla geçen hızlı tren için elde edilmiş ve Tablo 4.6'da verilmiştir.



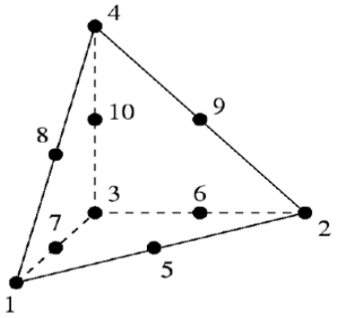
Şekil 4.9 : Tren ve demiryolu hattının geometrik parametreleri.

Tablo 4.6 : Farklı geçiş frekansları.

Frekans (Hz)	V_0 = 250 km/h = 69.44 m/s	L_s (m)	L_a (m)	L_b (m)	L_c (m)
f_S	99.20	0.7	2.8	19	27.4
f_a	24.80				
f_b	3.65				
f_c	2.53				

4.1.4. Sonlu eleman ağının oluşturulması

Sistem geometrisi, zemin malzemesi, yapısal elemanlar, yükler ve arayüzler dahil olmak üzere tam olarak oluşturulduktan sonra bir sonraki adım, analizleri yapabilmek için sonlu eleman ağının oluşturmasıdır. Eleman karakteristikleri belirlendikten sonra, model küçük parçalara bölünür. PLAXIS yazılımı, eleman üretimini otomatik olarak gerçekleştirebileceği gibi, aynı zamanda kullanıcının bu işlemi manuel olarak gerçekleştirmesine de olanak tanımaktadır. Ayrıca, yazılım otomatik olarak oluşturduğu ağ üzerinde kullanıcının değişiklik yapmasını desteklemektedir. PLAXIS 3D, zemin elemanları için 10-düğümlü tetrahedral elemanlar kullanır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : PLAXIS 3D'da kullanılan elemanların düğüm ve gerilme noktaları (PLAXIS Scientific Manual, 2022).

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

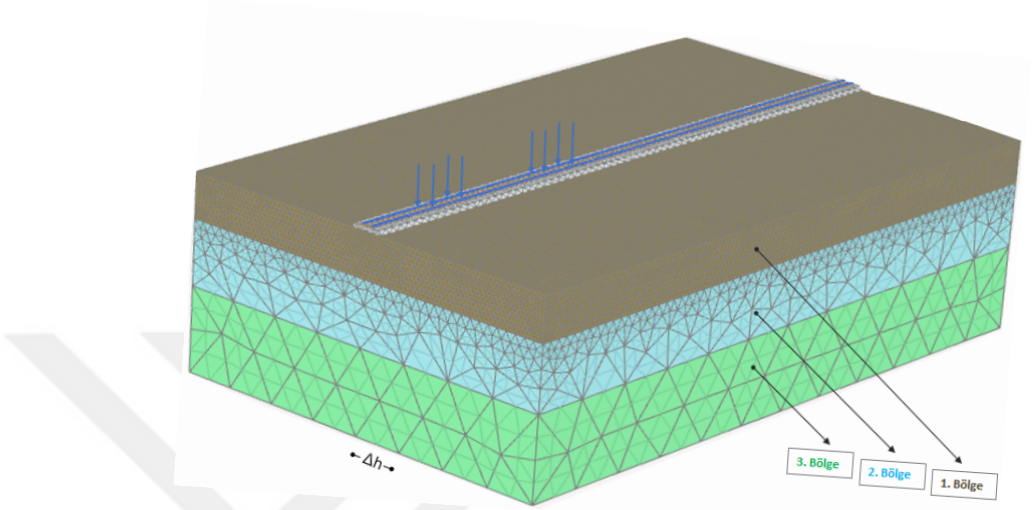
$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{\min}}{k} = \frac{V_i}{k \times f_{maks}} = \frac{V_s}{k \times f_{maks}} \tag{4.9}$$

Burada, *k* çarpan sabiti, sonlu eleman tipine ve kullanılan şekil fonksiyonuna bağlı olarak 5 ile 10 arasında değişebilir. Dinamik yük bileşenlerinin en büyük frekans değeri f_{maks} olarak ifade edilmiştir.

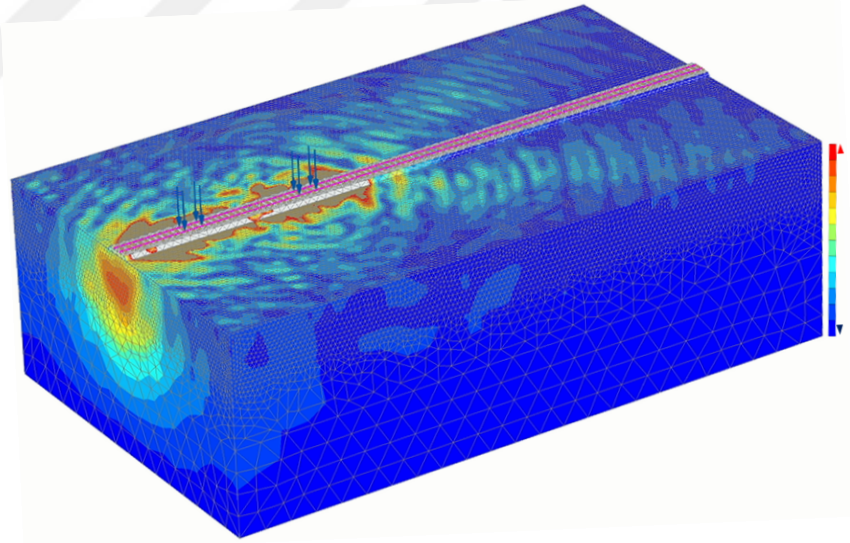
Yüksek frekansa ve kısa dalga boyuna sahip titreşim etkileri belirli bir boyutun üzerindeki sonlu elemanlar ile modellenen ortamlarda filitrelenebilir. Bu nedenle analizlerde kullanılacak sonlu elaman boyutunun (Δh) maksimum değeri hesaplanmış ve buna göre sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. 250 km/h maksimum hızla geçen hızlı trenin dinamik yüküne ait ivme-zaman kaydının maksimum frekansı (~80 Hz), k çarpan sabiti olarak 5 ve test zemin ortamının kayma dalga hızı V_s = 170 m/s dikkate alınmış ve zemin ortamının modellenmesinde kullanılacak sonlu eleman boyutunun (Δh) maksimum değeri yaklaşık 0.42 m olarak hesaplanmıştır. Ağ işleminde kullanılan sonlu eleman sayısı 85992'dir.

Kurulan sonlu eleman modelinin dinamik analizlerinde, sonlu elaman sayısının ve buna bağlı olarak gerilme noktası sayısının fazla olması nedeni ile analiz süreleri oldukça uzun sürmektedir. Bunun için, analizlerde zemin ortamı düşeyde farklı bölgelere ayrılarak, yapısal davranışın öncelikli olduğu alan (1. Bölge), denklem 4.9'u karşılayacak şekilde küçük boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir ($\Delta h_1 \approx 0.4$ m).

Uzak bölgenin ayrıştırılmasında sonlu eleman ağı yapısı kademeli olarak genişletilmiştir (2. Bölge; $\Delta h_2 \approx 2$ m, 3. Bölge; $\Delta h_3 \approx 4$ m). Başka bir ifadeyle, üstyapıya yaklaşıldıkça kullanılan sonlu eleman boyutları büyütülerek hesaplama yükü ve buna bağlı olarak analiz süreci dengelenmiştir. Boyut farklılıkları yapılırken, zemin ortamında yayılan düşey doğrultudaki gerilme dağılımını da dikkata alınmıştır (Şekil 4.11).



(a)



(b)

Şekil 4.11 : (a) Sonlu eleman ağı ve (b) demiryolu-zemin siteminde gerilme dağılımı.

Sayısal entegrasyonda çözümün doğru çözüme yaklaşma düzeyi, kullanılan zaman artımı (Δt) değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Courant tarafından tanımlanan ve kararlılık koşulu olarak bilinen Courant ölçütü ($c \leq 1$) göz önüne alınarak, sayısal uygulamaların analizlerinde kullanılacak en büyük zaman artımı değeri belirlenmiştir (Courant, 1967).

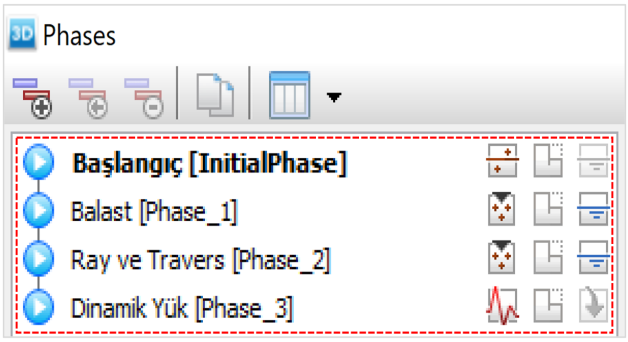
$$\frac{V_i \times \Delta t}{\Delta h} = c \tag{4.80}$$

$$\Delta t \leq \frac{\Delta h}{V_{maks}} \tag{4.91}$$

Zemin titreşim problemlerinin analizinde, farklı dalga türlerinin hesaba katıldığı durumlarda zaman artımı (Δt) belirlenirken, ortamdaki dalganın en büyük yayılma hızına dikkat edilmelidir. Aynı zamanda kullanılacak sonlu eleman boyutu, en küçük dalga hızına bağlı olarak seçilmelidir. Dalgaların en yüksek ve en düşük yayılma hızları arasındaki büyük fark nedeniyle, öngörülen model için küçük sonlu elemanlar ve kısa zaman artımı kullanımı gereklidir ve böylece sayısal çözüm etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir.

4.1.5. Hesaplama aşamaları

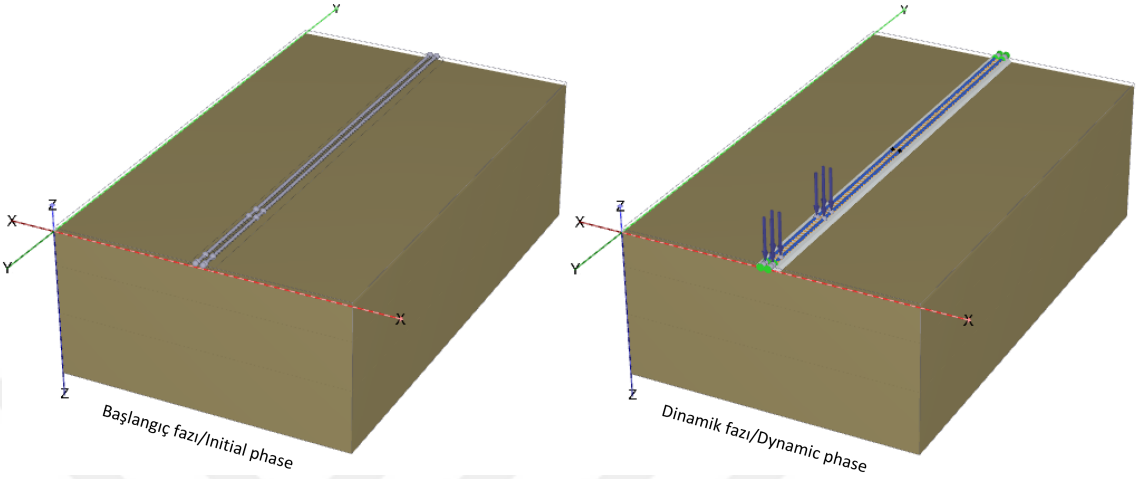
Sayısal hesaplamalar yapılmadan önce, sıralı hesaplama aşamaları (Calculation phases) ve her bir aşama için hesaplama türü tanımlanmalıdır. Bu süreç aynı zamanda serbest zemin ortamından hızlı tren geçişine kadar olan inşa sürecini ifade etmektedir. Bu çalışmada, hesaplama 4 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, Başlangıç aşaması (Initial phase) olup serbest zemin durumunu ifade etmektedir. Sonraki aşamalar; Aşama 1 (Balast), Aşama 2 (Ray ve Travers) ve Aşama 3 (Dinamik Yük) olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.12). Bu şekilde sırasıyla demiryolu sistemi inşa edilmiş ve dinamik yük olarak hızlı tren etkisi tanımlanmıştır.



Şekil 4.12 : PLAXIS 3D'da fazların tanımlanması.

Dinamik analiz süresi 2.5 s olarak ayarlanmıştır. Bu zaman aralığı, hızlı trenin tüm akslarının modellenen geometriyi geçmesi için gereken süreyi kapsayacak şekilde seçilmiştir. Tren hızı ve dinamik tekil yükleri arasındaki mesafe sabit olduğu için zaman

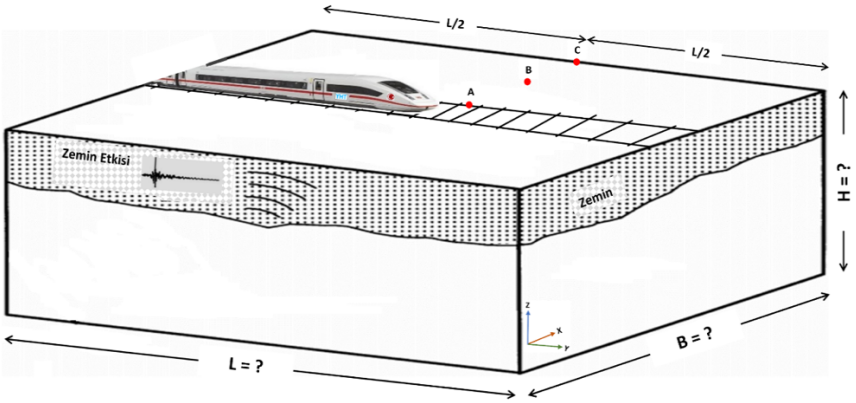
adımı da sabittir. Ele alınan modelin tamamının uzunluğu 100 m olduğundan, 250 km/h = 69.44 m/s hızla geçen hızlı trenin aldığı toplam dinamik zaman yaklaşık 1.5 saniyedir (t = d/v). Dinamik hesaplamalarda oluşan tren dalgası yansımasının etkisine gevşemek ve modeldeki yanlış hesaplamaların önlenmesi için ek bir süre (~1s) düşünülmüştür.



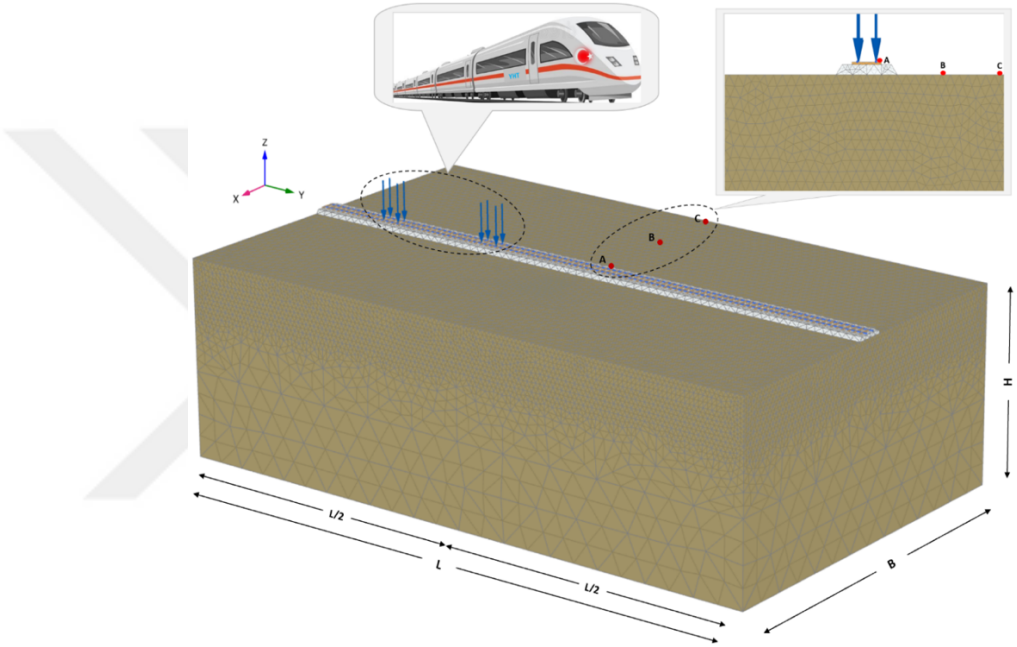
Şekil 4.13 : 3D Geometrisi ve tanımlanmış aşamaları.

4.1.6. Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin boyutlarının belirlenmesi

Sayısal uygulamaya başlamadan önce, ilk adım olarak matematik modelde kullanılacak ayrıklaştırılmış zemin bölgesinin, gerçek zemin koşullarını en doğru şekilde yansıtabilmesi için yatay ve düşey boyutlarının dikkatlice belirlenmesi gerekmektedir. Yapısal elemanlar, zemin malzemesi, hareketli yüklerin simülasyonu, ağ ve aşamalar dahil olmak üzere geometri tam olarak oluşturulduktan sonra, bir sonraki adım zemin modelinin optimum boyutlarını tanımlamaktır. Dinamik analizde, sonuçların ve hesaplama doğruluğu için model boyutları ve sınırları dikkatli bir şekilde seçilmelidir (Galavi ve Brinkgreve 2014; Çelebi ve Kırtel 2013; Faizan 2017). Üç boyutlu düzlem deformasyon koşullarında gerçekleştirilen analizlerde ayrıklaştırılan sonlu zemin ortamının boyutunun etkisi incelenmiştir. İlk aşamada sonsuza uzanan zemin bölgesinin ayrık bir bölgeye dönüştürülmesinde öngörülen optimum boyutları (B, L ve H) belirlemek için üstyapı ve zemini dikkate alarak araştırmalar yapılmıştır. Hızlı tren etkisi, demiryolu platformu ve zemin için Bölüm 3.2.3'te tanımlanan özellikler kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde ölçüm noktaları olarak platform ve zeminin serbest yüzeyini de kapsayacak şekilde üç nokta (A, B ve C) seçilmiştir (Şekil 4.14).



(a)



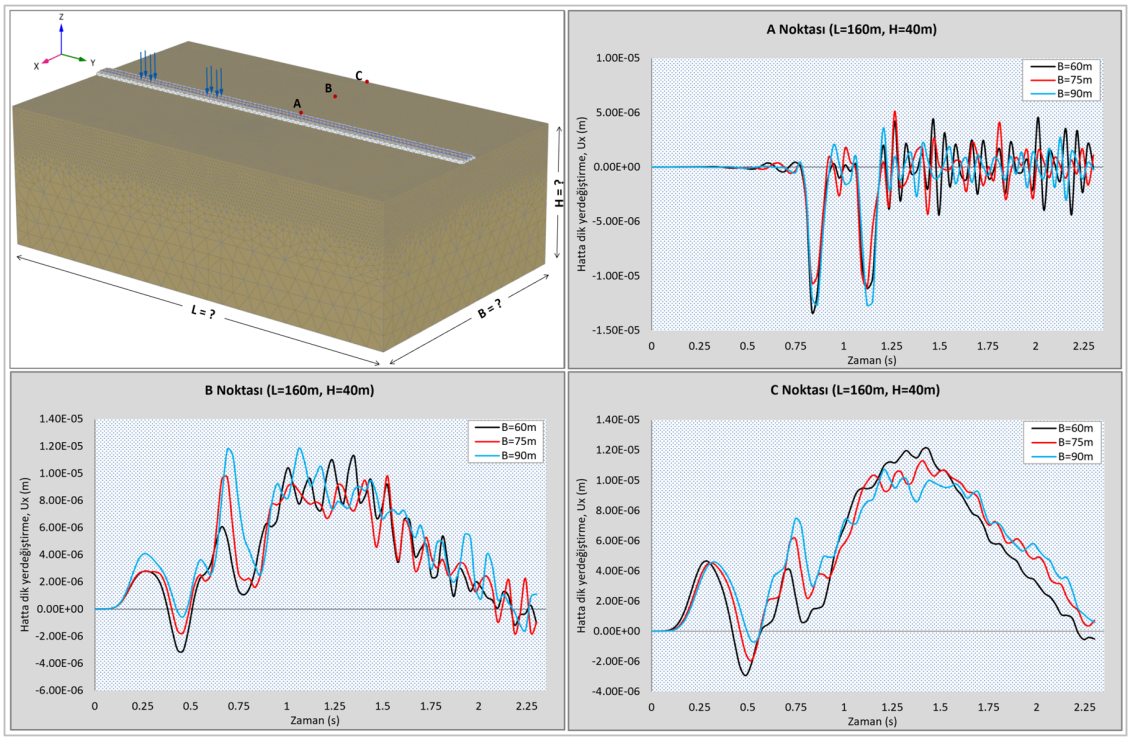
(b)

Şekil 4.14 : Ayrıklaştırılan zemin bölgesini belirlemek için geliştirilmiş üç boyutlu sayısal model.

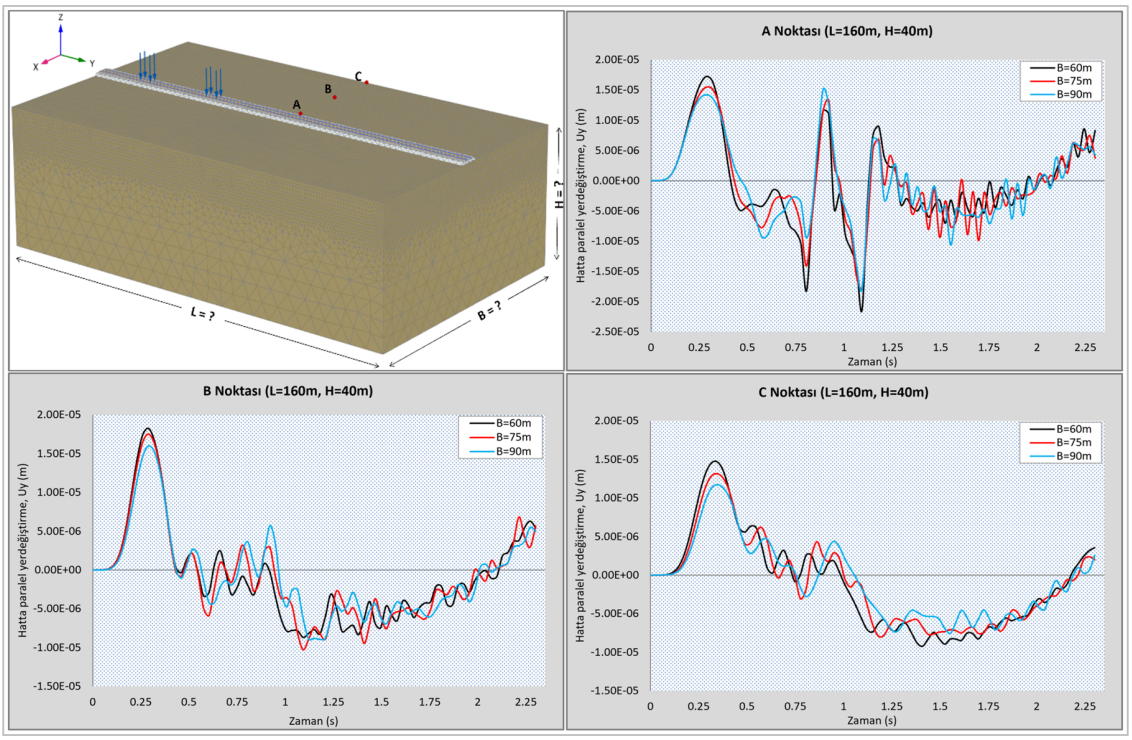
Sonsuza uzanan zemin bölgesinin ayrıklaştırılması için çeşitli geometrik özelliklere sahip sonlu eleman modelleri kullanılarak, hızlı tren geçişi altında belirlenen ölçüm noktalarındaki hatta dik, hatta paralel ve düşey (Ux, Uy, Uz) doğrultularındaki yerdeğiştirme değerlerinin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. Ele alınacak zemin bölgesinin yatay ve düşey boyutlarının gerçekçi bir şekilde tanımlanması, zemin ortamındaki dalga yayılımının daha doğru bir biçimde oluşmasına katkı sağlayacaktır.

Literatürde sonsuz zemin ortamından sonlu bölgenin ayrıklaştırılmasında, sonlu bölgenin yüksekliğini (H), genişliğini (B) ve uzunluğunu (L) analizi yapılacak üstyapının temel genişliği ile ilişkilendiren ve bu doğrultuda parametrik araştırmaların yapıldığı çalışmalar mevcuttur (Rosset ve Kausel 1976; Faizan, 2017). Bu çalışmada mevcut bilgilere ilaveten yutucu sınır şartlarının (absorbing boundaries) tanımlanması

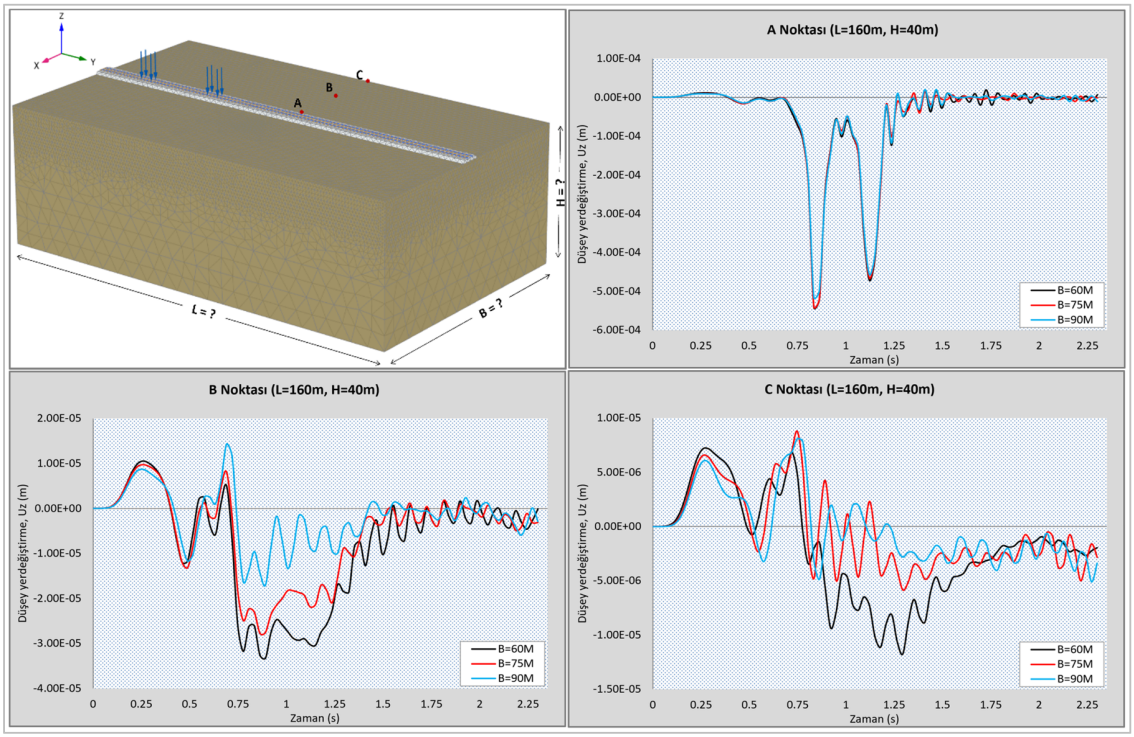
da dikkate alınarak sonlu zemin bölgesinin ayrıklaştırılması yapılmıştır. Öncelikle zemin ortamının yüksekliği ve uzunluğu sabit tutularak (H = 40 m ve L = 160 m) yatay açılımın (B) dalga yayılımına etkisi incelenmiştir (Şekil 4.15). Yapılan analizler sonucunda dalga yayılımının kontrol edildiği noktalardan alınan yerdeğiştirme-zaman ilişkileri incelendiğinde, B = 60 m alınmasının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



(a)



(b)



(c)

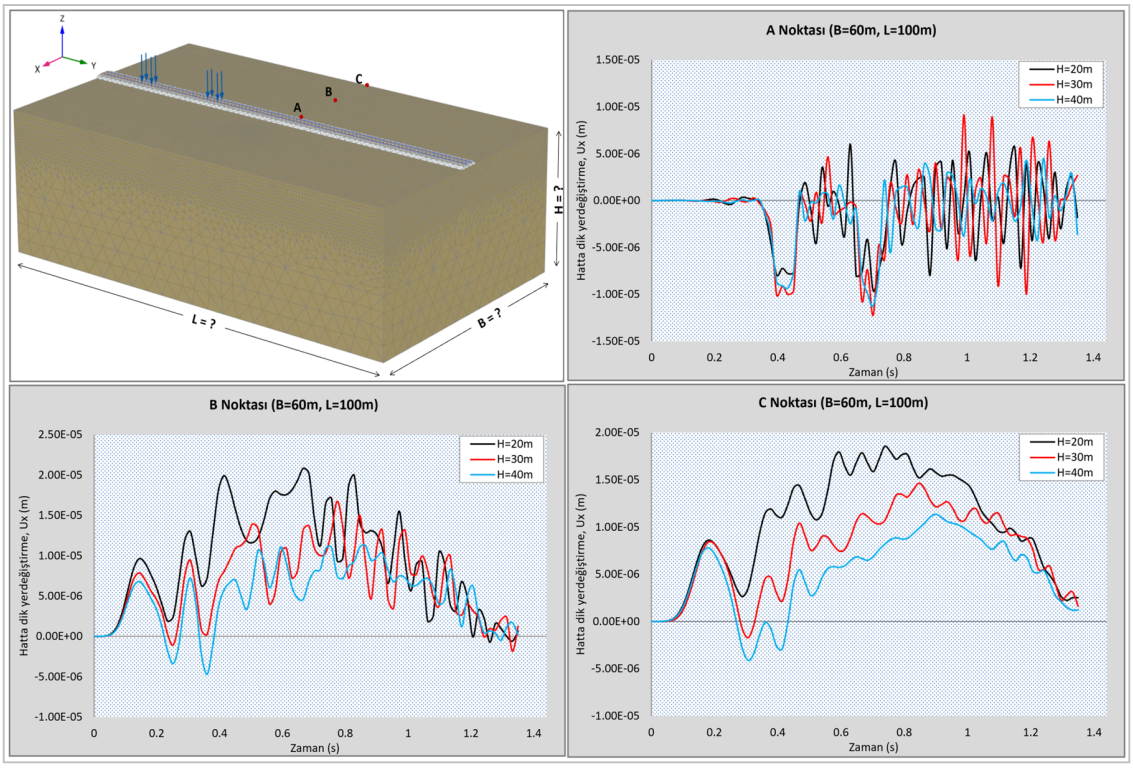
Şekil 4.15 : Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin genişliğinin belirlenmesi.

Sonlu zemin bölgesinin genişliği belirlendikten sonra, bu genişlik ve yükseklik (B = 60 m, H = 40 m) sabit tutularak zemin ortamının uzunluğunun dalga yayılımına etkisi de incelenmiştir (Tablo 4.7). Yapılan analizler soncunda dalga yayılımının kontrol edildiği noktalardan alınan maksimum yerdeğiştirme-zaman ilişkileri incelendiğinde, L = 100 m alınmasının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

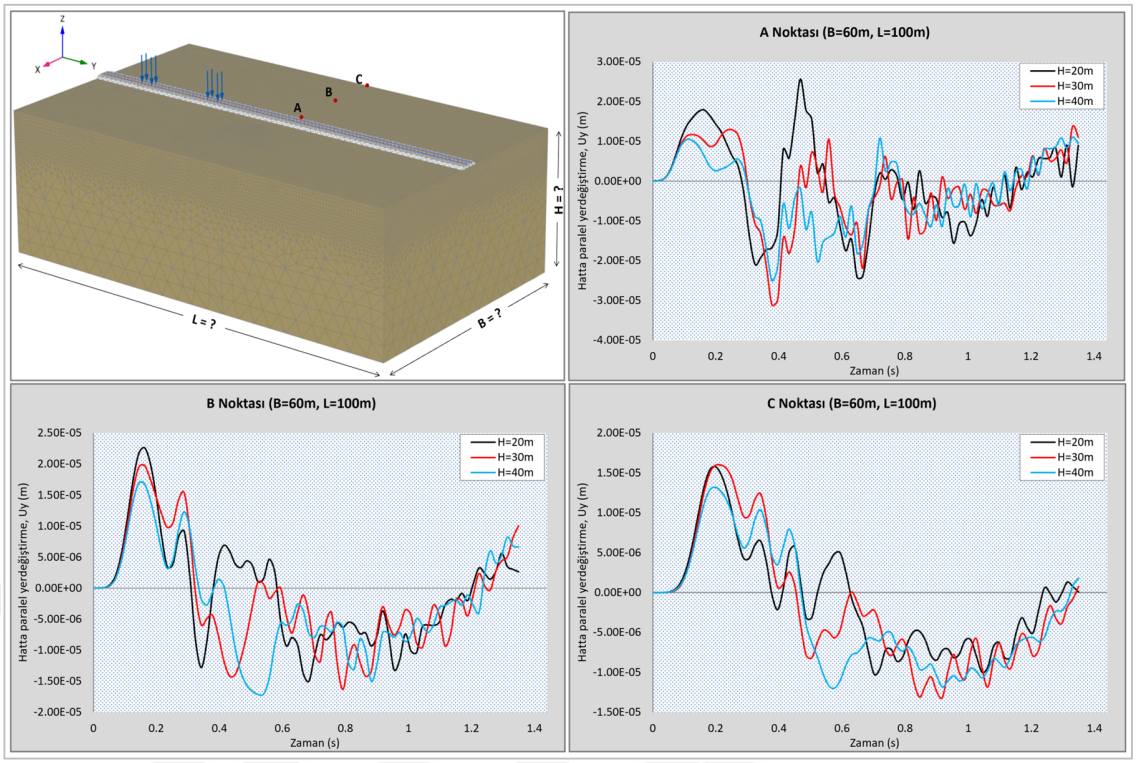
Tablo 4.7 : Mesafeye bağlı olarak maksimum yerdeğiştirmelerin değişimi.

Seçilen nokta	**Maksimum U_x (m)**		
	L = 100 m	L = 120 m	L= 160 m
A	1.120×10^{-5}	1.061×10^{-5}	1.323×10^{-5}
B	1.123×10^{-5}	1.246×10^{-5}	1.125×10^{-5}
C	1.137×10^{-5}	1.213×10^{-5}	1.208×10^{-5}
	Maksimum U_y (m)		
	L = 100 m	L = 120 m	L = 160 m
A	2.501×10^{-5}	3.210×10^{-5}	2.142×10^{-5}
B	1.715×10^{-5}	1.799×10^{-5}	1.828×10^{-5}
C	1.322×10^{-5}	1.441×10^{-5}	1.470×10^{-5}
	Maksimum U_z (m)		
	L = 100 m	L = 120 m	L = 160 m
A	5.971×10^{-5}	6.199×10^{-5}	5.415×10^{-5}
B	4.061×10^{-5}	3.368×10^{-5}	3.325×10^{-5}
C	1.282×10^{-5}	1.379×10^{-5}	1.174×10^{-5}

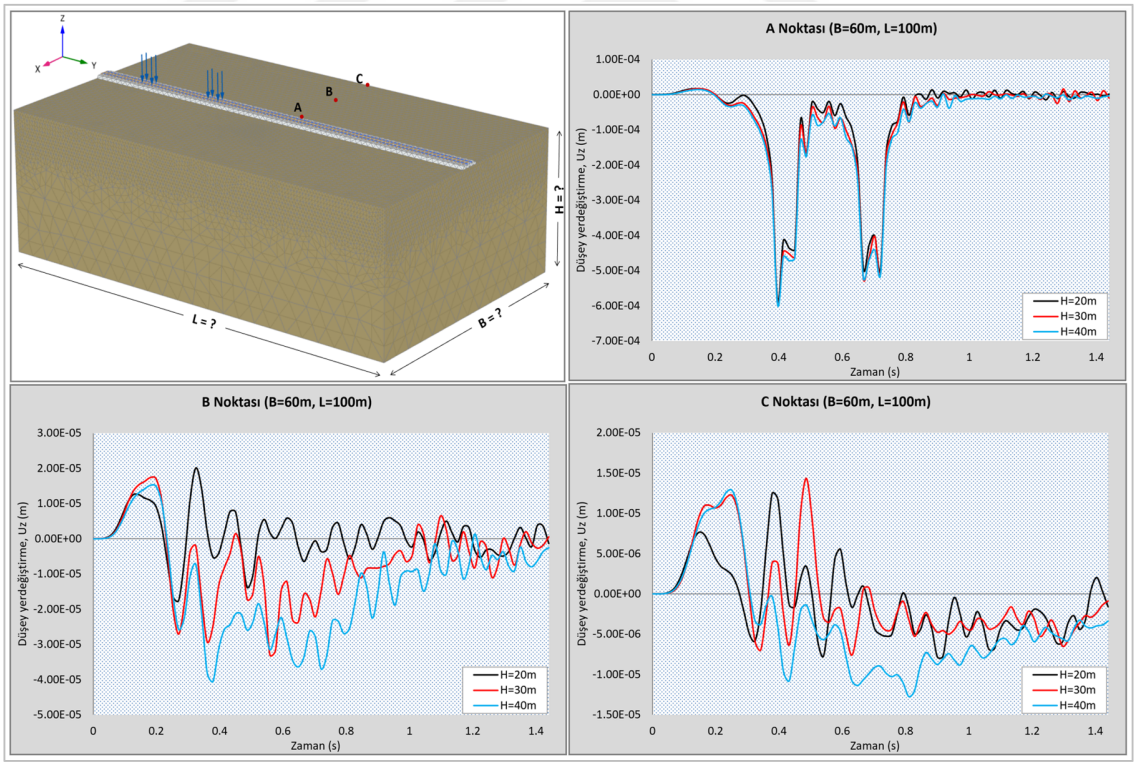
Sonlu zemin bölgesinin uzunluğu (L) belirlendikten sonra, bu uzunluk ve genişlik (L = 100 m, B = 60 m) sabit tutularak zemin ortamının yüksekliğinin dalga yayılımına etkisi de incelenmiştir (Şekil 4.16). Yapılan analizler soncunda dalga yayılımının kontrol edildiği noktalardan alınan yerdeğiştirme-zaman ilişkileri incelendiğinde, H = 30 m alınmasının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



(a)



(b)

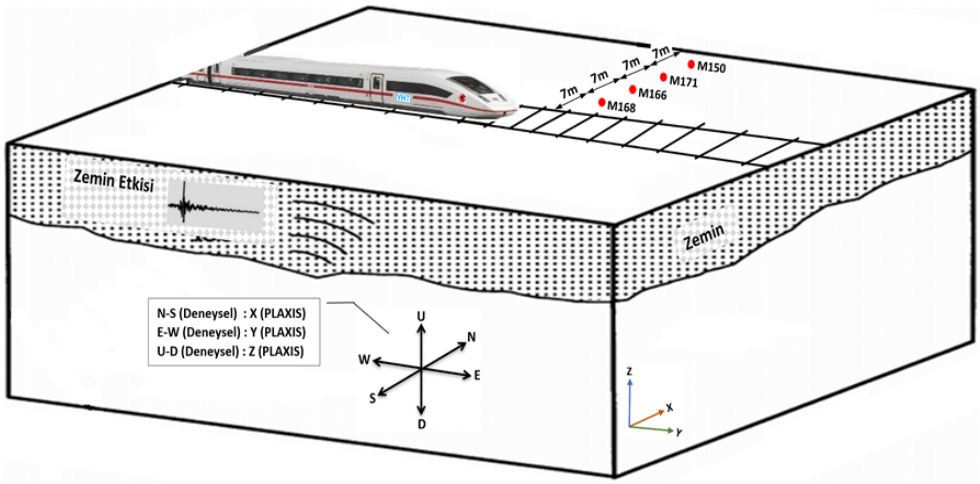


(c)

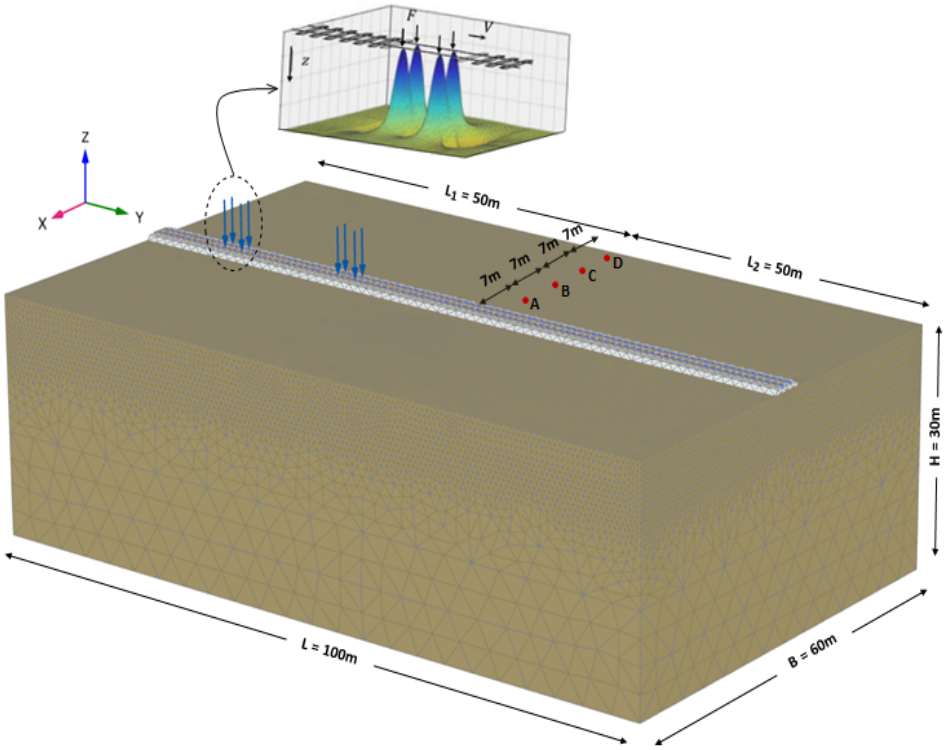
Şekil 4.16 : Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin derinliğinin belirlenmesi.

4.1.7. Hızlı tren-demiryolu-zemin modelinin doğrulanması

Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak, deneysel ölçümle eşleşecek şekilde, tren hattına en yakın noktadan (A) baz alınarak diğer üç nokta (B, C, D) 7 şer metre ara ile aynı doğrultuda zeminin serbest yüzeyinde toplam dört nokta belirlenmiştir (Şekil 4.17). Serbest zemin hareketinde incelenen ana unsur, uzaklığa bağlı olarak seçilen noktalarda ivme-zaman ve maksimum yer ivme (PGA) değişimlerinin ne şekilde değişeceğinin gözlemlenmesidir. Analizler sonucunda tren geçişi için her üç doğrultuya ait ivme-zaman geçmişleri elde edilmiştir. Dinamik analizlerde, zemin davranış modeli olarak elastik malzeme davranışı seçilmiştir. Bu model yaklaşımında, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu yani gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin lineer olduğu tanımlanmaktadır. Oluşturulan sayısal modelde, modelin doğrulanmasında Bölüm 3.2.3'te verilen zemin özellikleri kullanılmıştır. Dinamik analizlerde tren hızı V = 250 km/h olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan titreşim analizlerinden elde edilmiş ivme-zaman ilişkileri, daha önce saha çalışmaları sırasında dinamik yük kaynağından farklı mesafelerde demiryolu hattına dik (N-S), paralel (E-W) ve düşey (U-D) doğrultuda serbest zemin yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla elde edilen titreşim verileri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen sayısal modelin, gerçek saha koşullarına benzer dalga yayılımını simüle etmesini sağlamak için ivme genliklerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır.

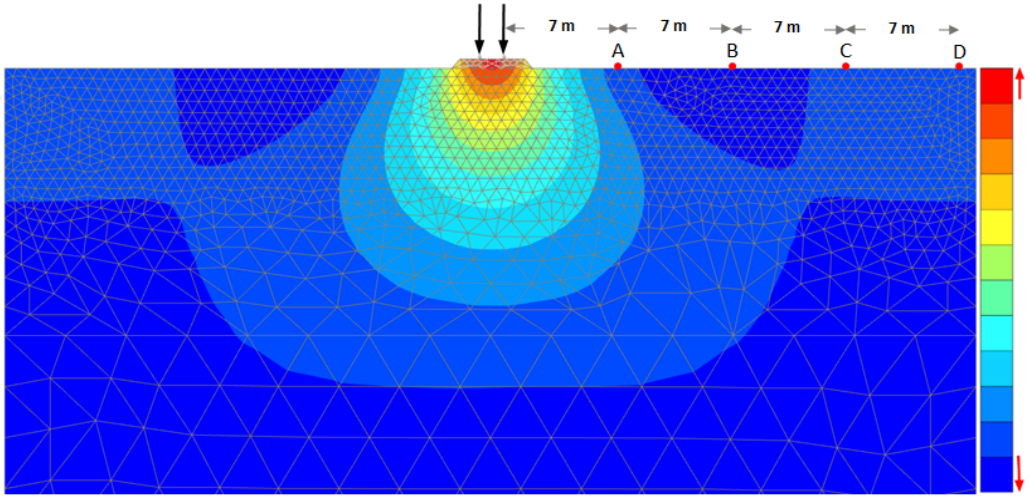


(a)

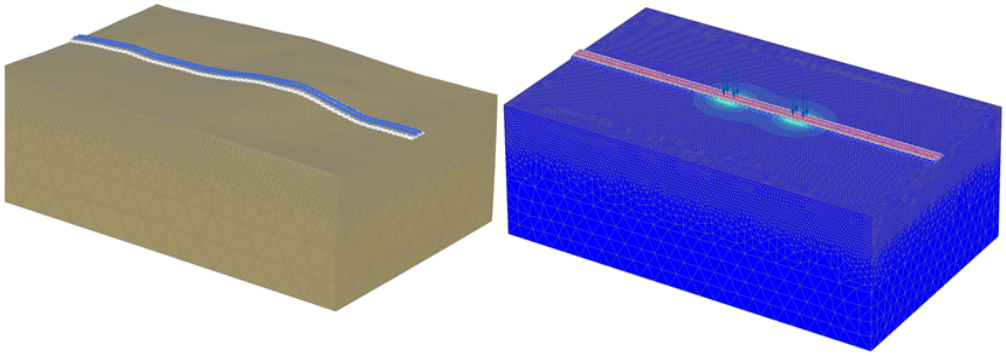


(b)

Şekil 4.17 : İncelenecek test sahasının doğal saha koşullarındaki (a) saha ve (b) 3D model görünüşü.



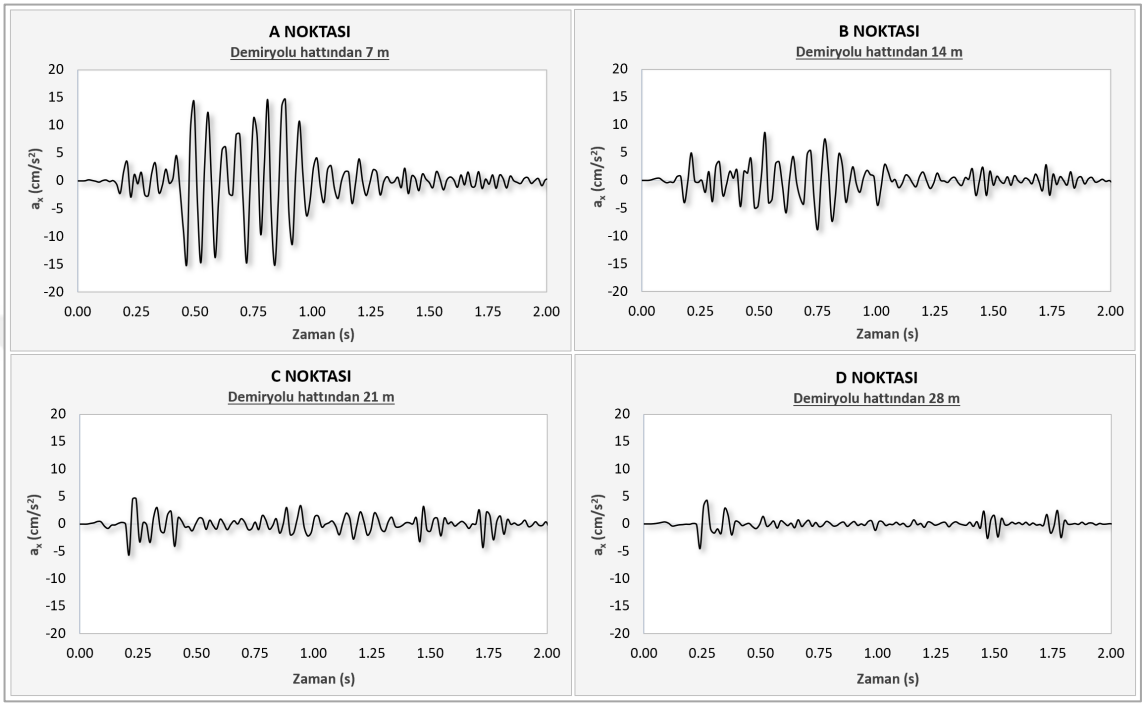
(a)



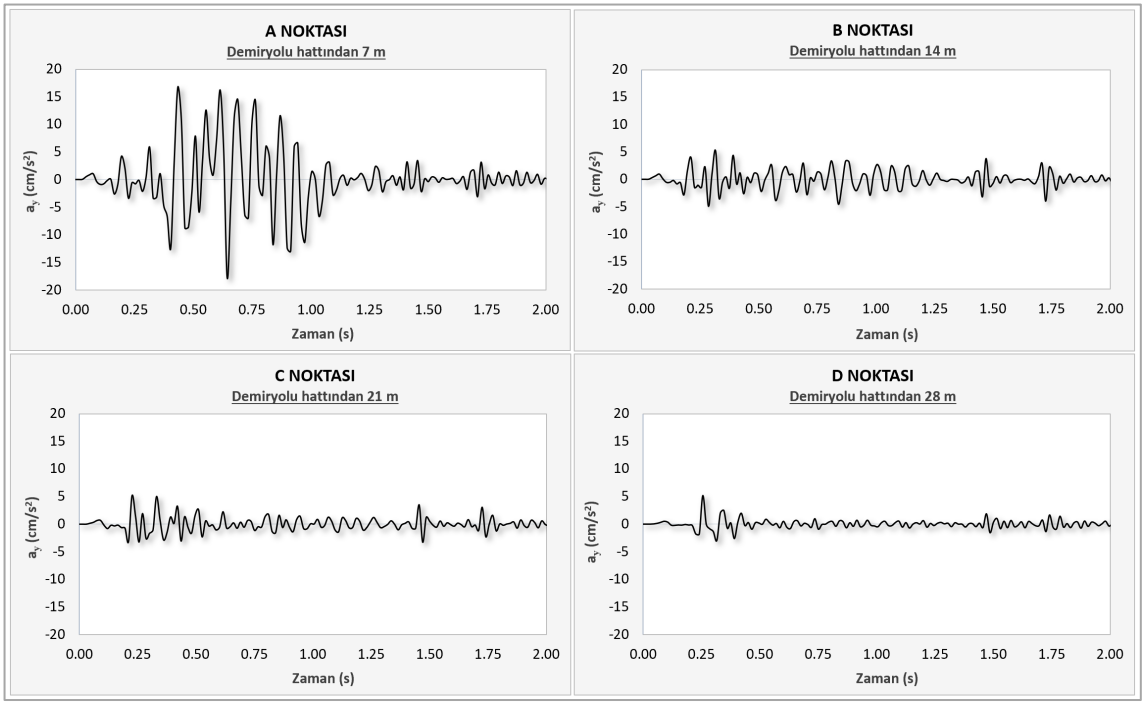
(b)

Şekil 4.18 : Sonlu eleman modelinin deformasyon ve gerilme dağılımı.

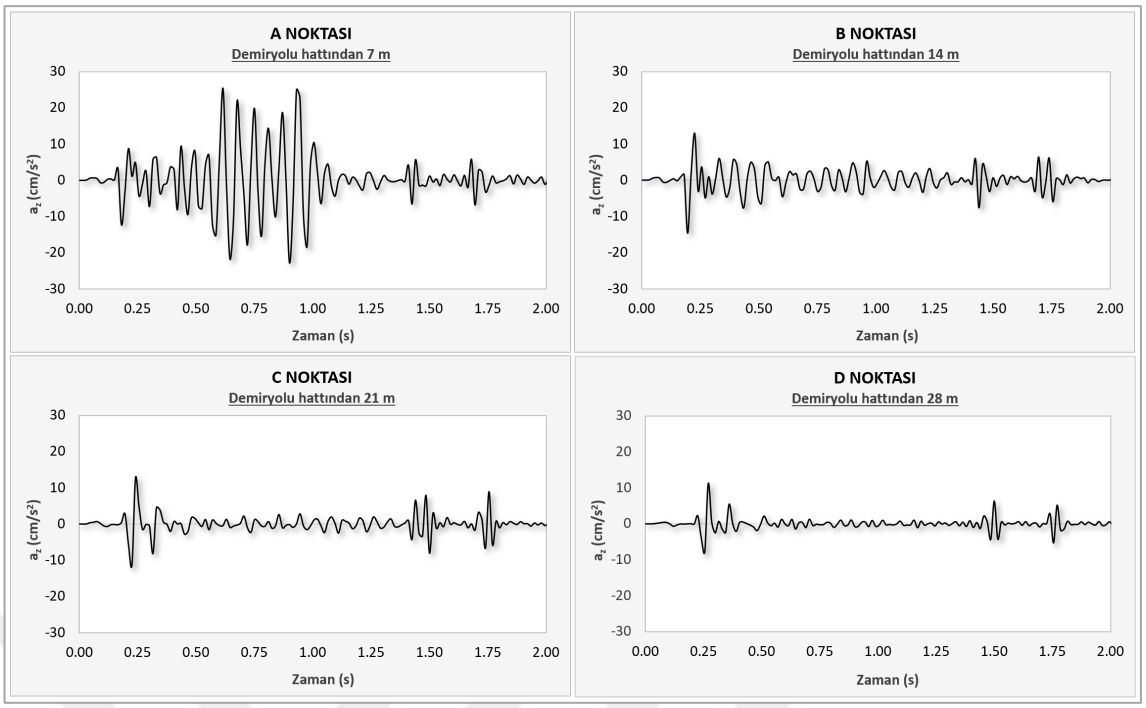
Geliştirilen sonlu eleman modeli kullanılarak, her üç dalga yayılımı doğrultusu için (x, y, z) ivme-zaman değişimleri, demiryolu güzergâhına olan mesafeye bağlı olarak grafikler şeklinde sunulmuştur (Şekil 4.19-4.21). Grafiklerde, x ekseni zamanı temsil ederken, y ekseni ivme genliklerini göstermektedir. Seçilen noktalardaki maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri Tablo 4.8'de sunulmuştur.



Şekil 4.19 : Demiryolu hattına dik doğrultuda (x bileşeni) zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği.



Şekil 4.20 : Demiryolu hattına paralel doğrultuda (y bileşeni) zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği.



Şekil 4.21 : Düşey doğrultuda (z bileşeni) zemin titreşimlerine ait ivme-zaman grafiği.

Tablo 4.8 : Maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri.

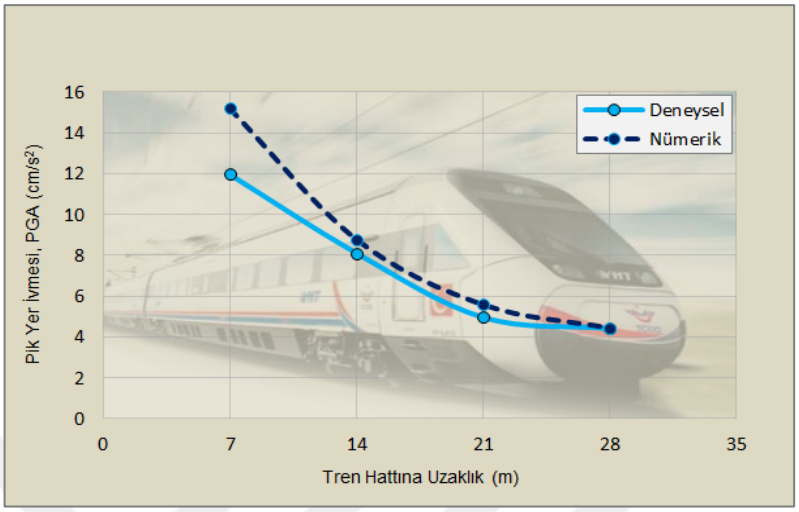
Ölçüm noktası	Tren hattına uzaklık (m)	PGA (cm/s^2)		
		a_x	a_y	a_z
A	7	15.204	17.790	25.379
B	14	8.787	5.235	14.643
C	21	5.590	5.168	12.583
D	28	4.440	5.183	11.247

Kurulan sayısal modelin doğrulaması, Bölüm 3.3.4'te sunulan saha ölçüm verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hızlı tren geçişinin serbest zemin yüzeyinde oluşturduğu titreşim etkileri sonlu eleman analizlerinden elde edilmiş ve saha çalışması sırasında ölçülen ivme-zaman kayıtlarının maksimum yer ivme (PGA) değerleri ile karşılaştırmalı olarak Tablo 4.9 ve Şekil 4.22'de verilmiştir.

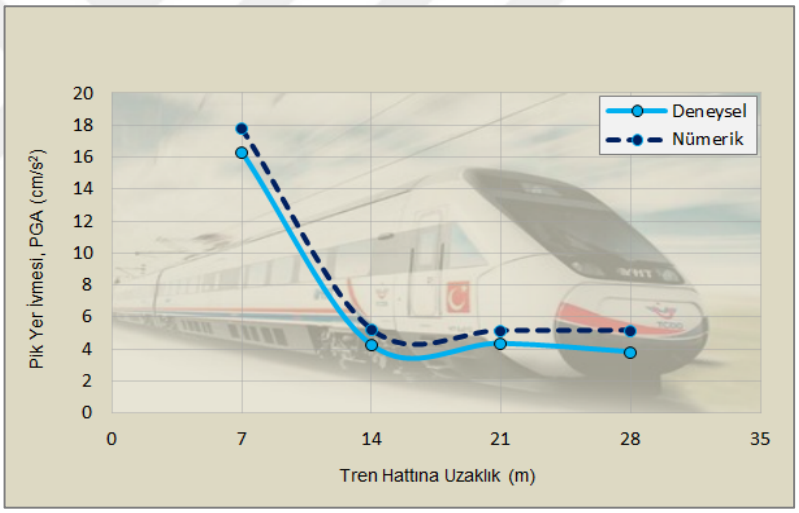
Tablo 4.9 : Karşılaştırmalı maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri (cm/s^2)

Ölçüm noktası	Tren hattına uzaklık (m)	Deneysel	Nümerik	Deneysel	Nümerik	Deneysel	Nümerik
		$a_{(N-S)}$	a_x	$a_{(E-W)}$	a_y	$a_{(U-D)}$	a_z
M168/A	7	11.971	15.204	16.332	17.790	28.856	25.379
M166/B	14	8.116	8.787	4.262	5.235	17.428	14.643
M171/C	21	4.966	5.590	4.366	5.168	9.595	12.583
M150/D	28	4.416	4.440	3.838	5.183	8.793	11.247

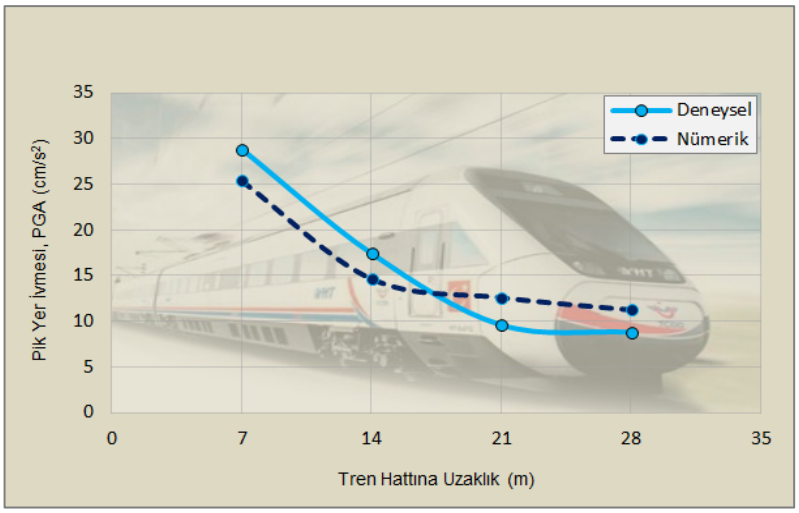
Serbest zemin hareketinde Karşılaştırmalı olarak nümerik analiz ve saha ölçümlerinden elde edilen ivme-zaman kayıtlarına ait pik yer ivme grafikleri karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir.



(a)



(b)

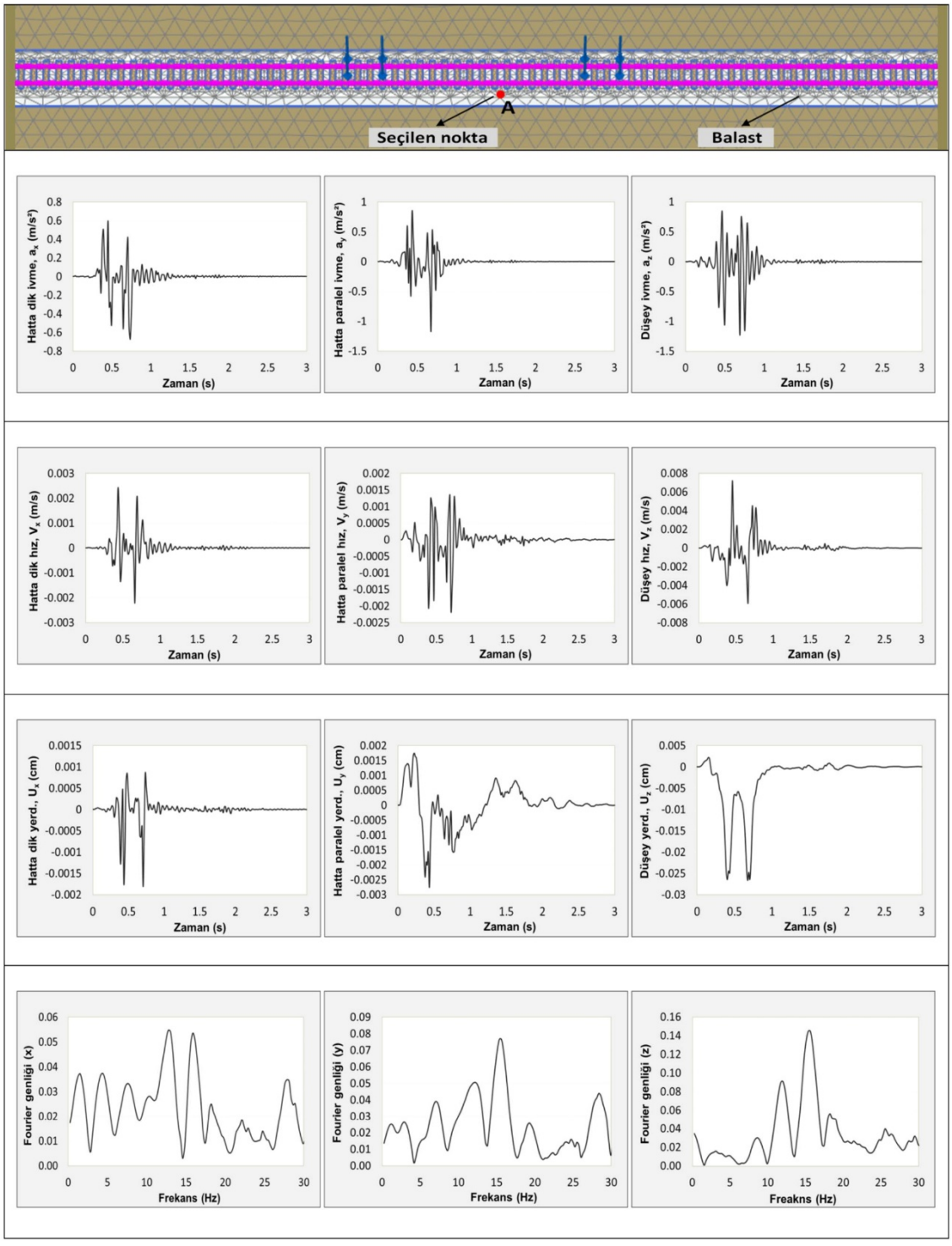


(c)

Şekil 4.22 : Yayılan titreşim etkilerinin karşılaştırmalı azalım eğrileri
(a) hatta dik, (b) hata paralel ve (c) düşey doğrultuda.

Şekil 4.22 incelendiğinde, kurulan sonlu eleman modelinde, genel olarak saha çalışmasında görülen dalga yayılımı ve titreşim etkilerine ait maksimum yer ivmesi değerleri ile kabul edilebilir bir yakınsama görülmüştür. Bu nedenle, sonuçların uyumluluğu, doğrulanmış sonlu elemanlar modelinin hızlı tren geçişlerine ait dinamik analizlerde uygulanabileceğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, mevcut model kullanılarak pahalı ve zaman alıcı deneysel çalışmalar yapmak yerine gerekli ve ihtiyaç duyulan parametrik araştırmaların yapılmasına da olanak sağlayacaktır.

Doğrulanan model kullanılarak, balast üzerindeki titreşim kayıtları elde edilmiştir (Şekil 4.23). Elde edilen sonuçlara göre, tren kaynaklı titreşim değerlerinin etkili frekans içeriği 10 ile 18 Hz arasındadır. Bu bulgulara dayanarak, 0.1–1.0 s aralığında baskın bir periyoda sahip olan yapılar, yüksek hızlı tren geçişlerinden daha fazla etkilenmiştir.



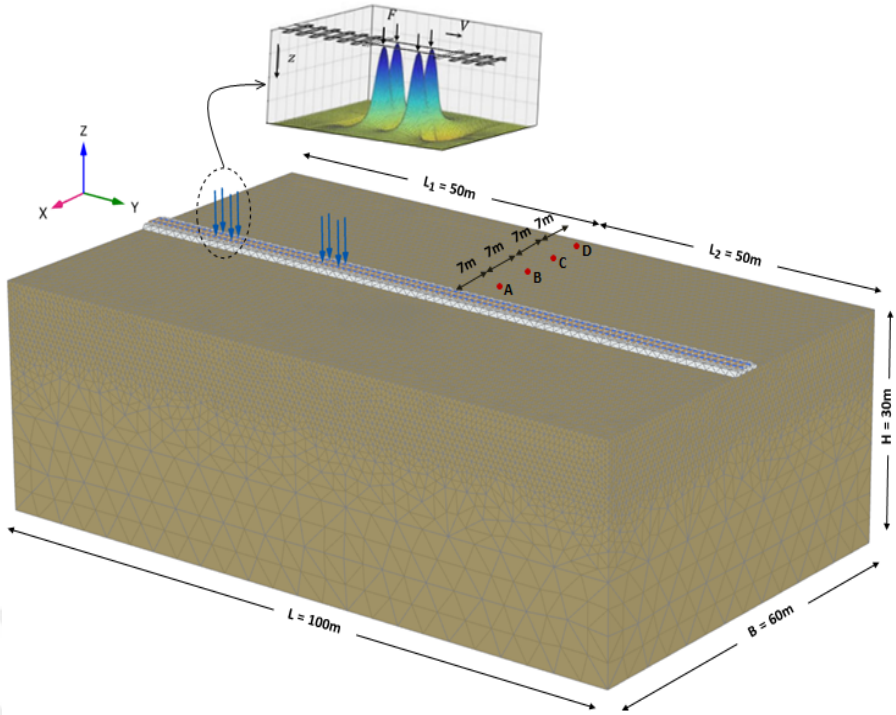
Şekil 4.23 : Balast üzerindeki titreşimlere ait ivme, hız, yerdeğiştirme ve Fourier genlik grafikleri.

BÖLÜM 5. PARAMETRİK ÇALIŞMALAR VE SONUÇ ANALİZİ

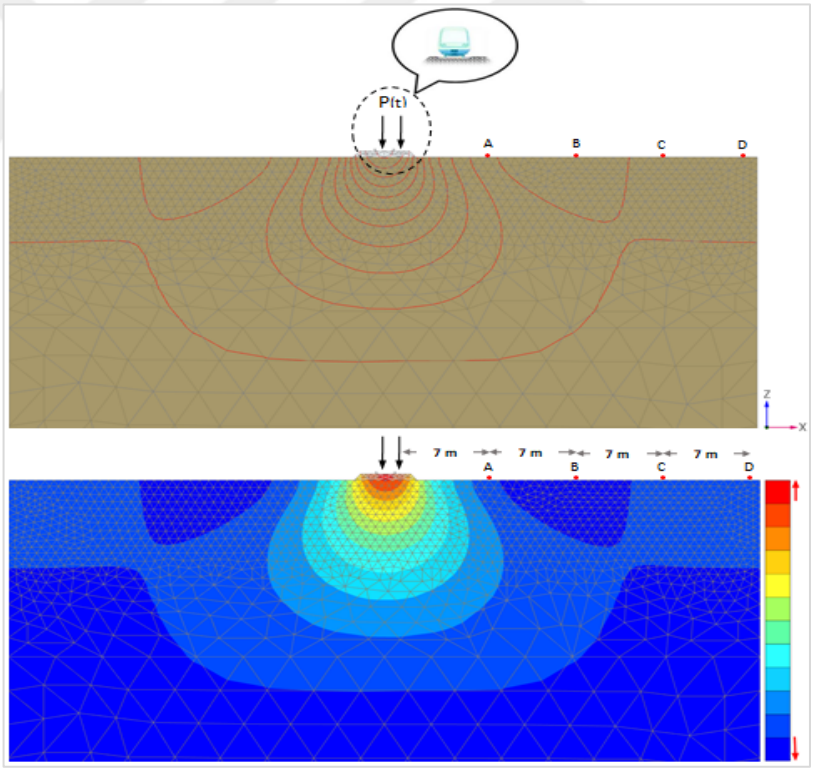
Bu bölümde, demiryolu titreşimlerinin serbest zemin ve üstyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile, kurulan ve doğrulaması yapılan sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Farklı zemin malzemelerinin ve tren parametrelerinin etkisini inceleyen kapsamlı bir analiz yapılmış ve bu analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Dikkate alınan anahtar parametreler, zemin dinamik özelliklerini ve tren hızlarını içermektedir. Parametrik çalışmayı yürütmek için Bölüm 4'te gösterildiği gibi deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanan gelişmiş bir üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Sayısal model, serbest zeminde farklı zemin koşullarının ve çeşitli tren hızlarının titreşimler üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Bununla birlikte, titreşimlere maruz kalan bir yapının davranışını incelemek te ilgi çekicidir. Bu yüzden, demiryolu titreşimlerinin üstyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla daha önce parametrik çalışmada kullanılan zemin modeline farklı yüksekliklerde bir betonarme bina eklenmiştir. Sonuçları analiz edilip, yorumlanıp ve araştırılan parametrelerin önemine ilişkin bazı yönergeler özetlenmiştir.

5.1. Tren Hızının ve Zemin Özelliklerinin Titreşim Davranışına Etkisi

Yüksek hızlı tren geçişi nedeniyle zemin ortamında yayılan titreşimler üzerinde, tren hızı ve zemin özellikleri önemli rol oynamaktadır. Farklı zemin parametrelerinin ve tren hızlarının serbest zemindeki titreşim seviyelerini nasıl etkilediğini belirlemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, her bir parametrenin önemini değerlendirmek ve titreşim seviyelerini tahmin etmek için hangi parametrelerin doğru bir şekilde ölçülmesi gerektiğine karar vermektir. Analiz, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi doğrulanmış üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde ölçüm noktaları olarak zeminin serbest yüzeyi (A, B, C ve D noktaları) seçilmiştir. Tanımlanan noktalardaki yerdeğiştirme ve hız spektrum eğrileri, farklı hızlı tren geçişleri için zemin özelliklerinin değişimi de dikkate alınarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.1 : Problemde ele alınan sayısal model (a) 3D görünüşü ve (b) gerilme dağılımı.

Demiryolu platformu ile zeminin birlikte davranışını doğrudan hesaba katan sonlu eleman modeli üzerinde yürütülen sayısal analizlerde, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde 2018 yılında belirlenen yerel zemin sınıfları (ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE)

kullanılarak farklı zemin özellikleri dikkate alınmıştır. Bu analizlerde, beş farklı zemin türü için (sert kaya zemin, sağlam kaya zemin, sıkı kum, orta sıkı kum ve gevşek kum) özellikler kullanılmıştır. Bu zeminlerin karşı gelen kayma dalga hızı (V_S) aralıkları Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 : Yerel zemin sınıfları (TBDY-2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama
		$(V_s)_{30}$ [m/s]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya ve koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası içeren profiller	< 180

Yönetmelikteki sınır durumlar $(Vs)_{30}$ dikkate alınarak ilgili zeminlere ait mekanik özellikleri literatürden yararlanılarak belirlenmiştir. Zeminlerin mekanik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 : Zemin mekanik özellikleri (Tatone, 2015; Behnamfar, 2016; Zhao, 2018).

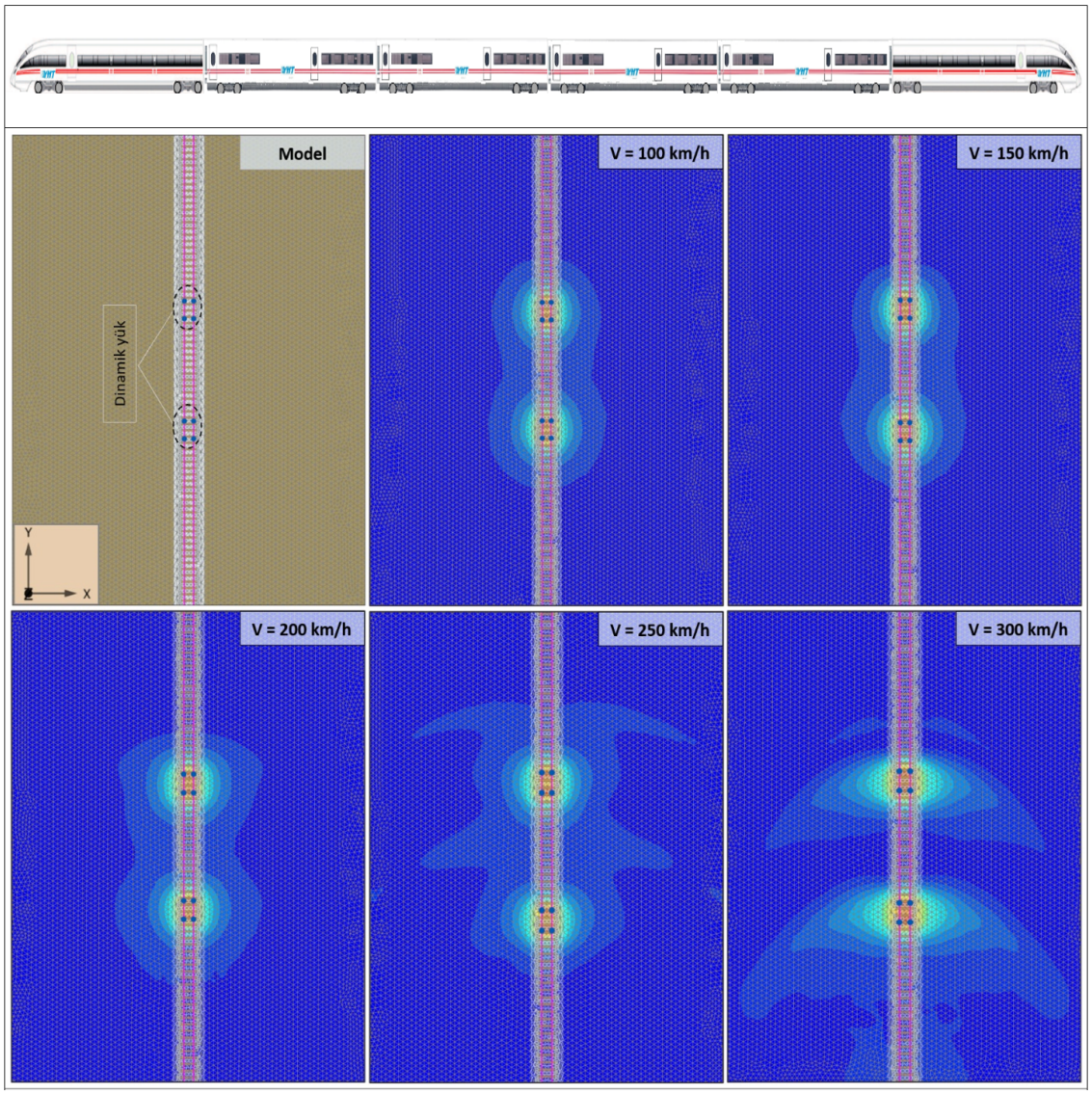
Zemin Cinsi	Yerel Zemin Sınıfı	Parametre			
		γ (kN/m^3)	E (kN/m^2)	υ (-)	V_S (m/s)
Sert kaya	ZA	27.45	5.10×10^7	0.25	2700
Sağlam kaya	ZB	27.45	1.00×10^7	0.29	1177
Sıkı kum	ZC	18.63	1.55×10^6	0.35	550
Orta-sıkı kum	ZD	17.65	3.15×10^5	0.40	250
Gevşek kum	ZE	16.67	4.93×10^4	0.45	100

Tablo 5.3 : Farklı kayma dalgası hızına sahip zeminlerin baskın frekansları.

Yerel zemin sınıfı	V_s (m/s)	Frekans (Hz)
ZA	2700	22.73
ZB	1177	10.00
ZC	550	4.54
ZD	250	2.08
ZE	100	0.83

Zemin özelliklerinin yanı sıra tren hızı da yer titreşiminde önemli bir rol oynamaktadır. Önemli bir soru, tren hızının, demiryolu hattından çeşitli mesafelerde serbest zemin yüzeyindeki etkisinin zaman geçmişini nasıl etkilediğidir. Çeşitli tren hızlarının etkisini araştırmak için farklı sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Bu çalışmada, yüksek hızlı trenin demiryolu hattı üzerinde 100 km/h, 150 km/h, 200 km/h, 250 km/h ve 300 km/h farklı hızlarda geçişinden kaynaklanan serbest zemin etkisi doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak incelenmiştir.

Şekil 5.2'den de görülebileceği gibi, 100 km/h'lik hızla tren geçişinin oluşturduğu titreşim etkileri aks konumlarının yakınında meydana gelirken beklendiği gibi hatta dik doğrultuda hafif bir dalga yayılımı vardır. Tren geçiş hızının artması ile, 300 km/h'lik hız değerine ulaşmasıyla birlikte dalga yayılımı artmakta ve sonunda titreşim etkileri sadece aks konumlarının yakınında değil, aynı zamanda çevredeki zeminde de yayılır. Elde edilen sonuçlar, sonlu eleman modellemesinin güvenilir olduğunu ve bu demiryolu hattı davranışını tahmin etmek için güvenle kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Şekil 5.2, simüle edilmiş yüksek hızlı trenin yumuşak zeminli bir sahada farklı hızlarda geçişini göstermektedir.



Şekil 5.2 : Simüle edilmiş yüksek hızlı trenin çeşitli hızlarda geçişi.

Yapılan sonlu eleman analizlerinin işlem hacmi-zaman ilişkisi de incelenmiş olup, farklı hızlı tren geçişleri için ortalama hesaplama süresi Tablo 5.4'te verilmiştir.

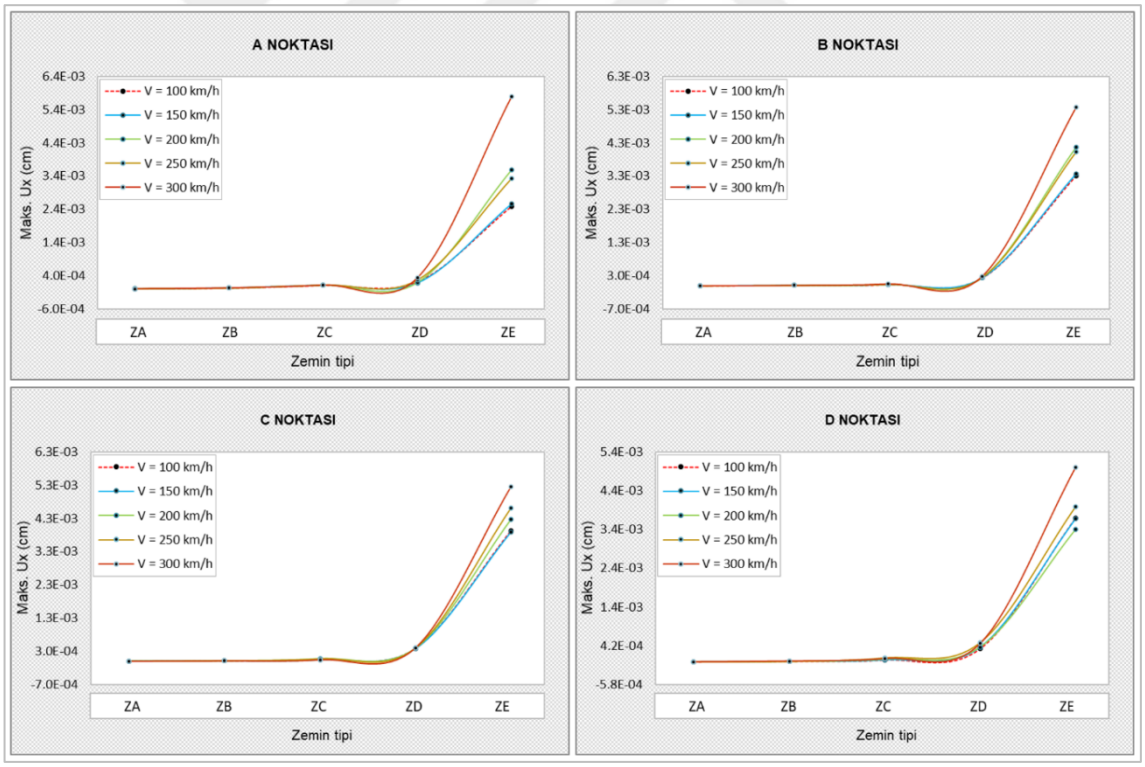
Tablo 5.4 : Sonlu elemanlar analizi için işlem hacmi.

Tren hızı	100 km/h	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h
Tren geçiş mesafesi (m)	100	100	100	100	100
Dinamik yük etki süresi (s)*	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
Sonlu eleman sayısı (Mesh)	85992	85992	85992	85992	85992
Ortalama hesaplama süresi (h)	8.51	8.31	8.21	7.83	7.75

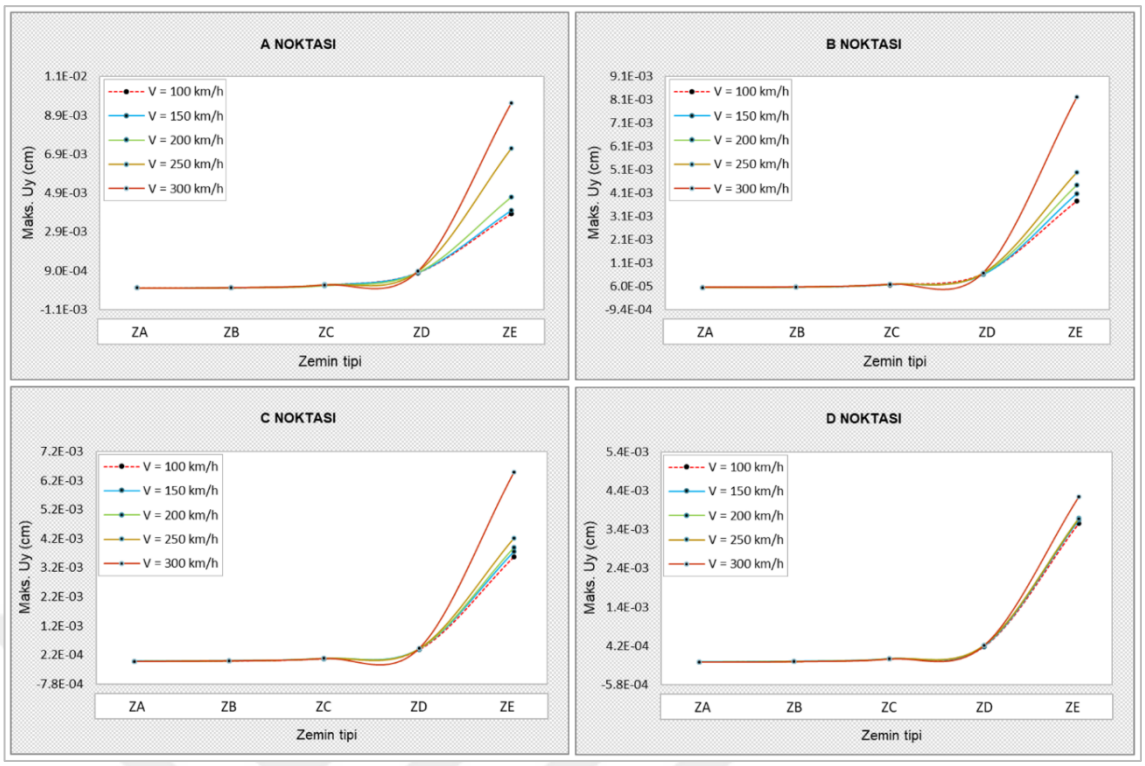
*Dinamik hesaplamalarda hızlı tren geçişinin sonrasına ait zemin deformasyonlarını da dikkate almak adına ek bir süre (relaxation time) düşünülmüştür.

5.1.1. Titreşim genliğinin değişimi

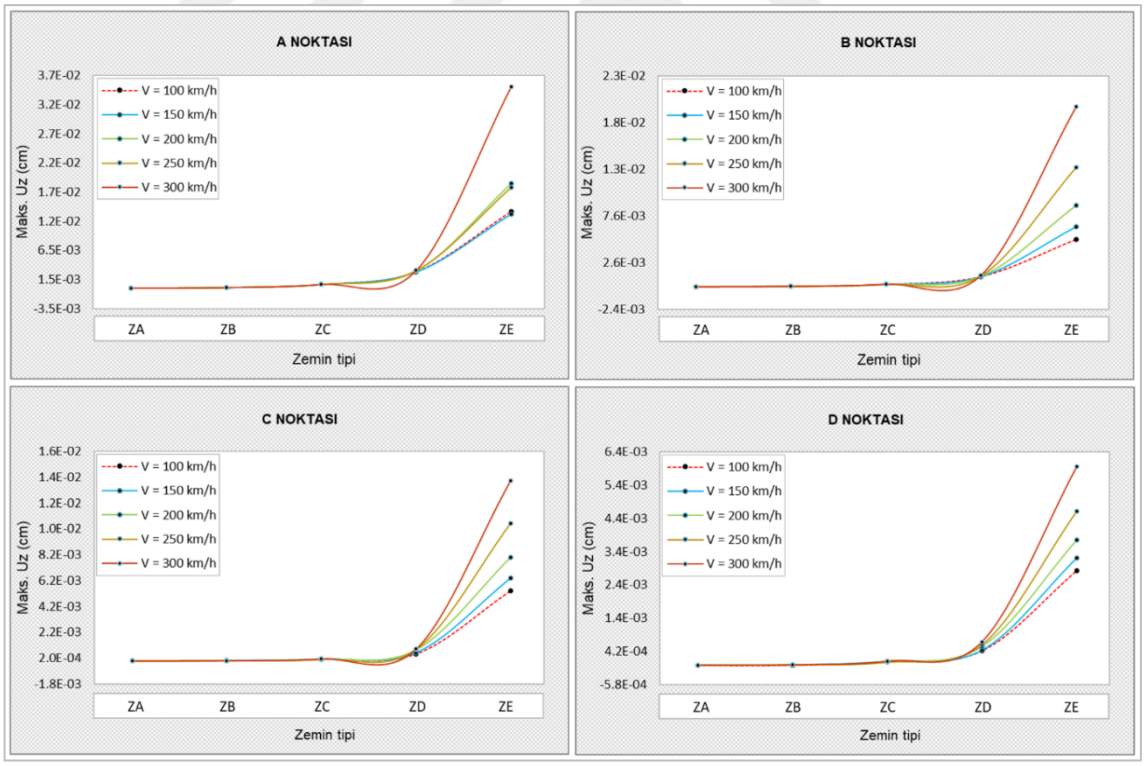
Simüle edilmiş model kullanılarak demiryolu hattından belirli mesafelerde serbest zemin yüzeyinde düşey (z), hatta paralel (y) ve hatta dik (x) doğrultudaki titreşimler elde edilmiştir. Yüksek hızlı bir trenin farklı zemin koşullarında demiryolu üzerinde 100 km/h ile 300 km/h arasında değişen hızlarda geçişi sırasında serbest zemin titreşim analizleri yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Hızlı tren-demiryolu-zemin etkileşimi nümerik modelinin dinamik analizi sonuçları, serbest zemin yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin farklı zemin tipi ve tren hızına bağlı olarak incelenmiştir. Farklı hızlar ve zemin türleri için seçilen noktalarda maksimum yerdeğiştirme değerleri Şekil 5.3-5.5'te gösterilmiştir. Sırasıyla tren hattından 7 m, 14 m, 21 m ve 28 m'de serbest zemin yüzeyinde seçilen noktaların titreşim verilerinden oluşturulan maksimum yerdeğiştirme değerleri, hatta dik, hatta paralel ve düşey olmak üzere üç doğrultu için gösterilmiştir. Grafiklerde yatay eksen zemin tipini ve düşey eksen ise maksimum yerdeğiştirme genliklerini göstermektedir.



Şekil 5.3 : Farklı zemin koşullarında tren hızlarının hatta dik doğrultuda yayılan titreşime etkisi.



Şekil 5.4 : Farklı zemin koşullarında tren hızlarının hatta paralel doğrultuda yayılan titreşime etkisi.

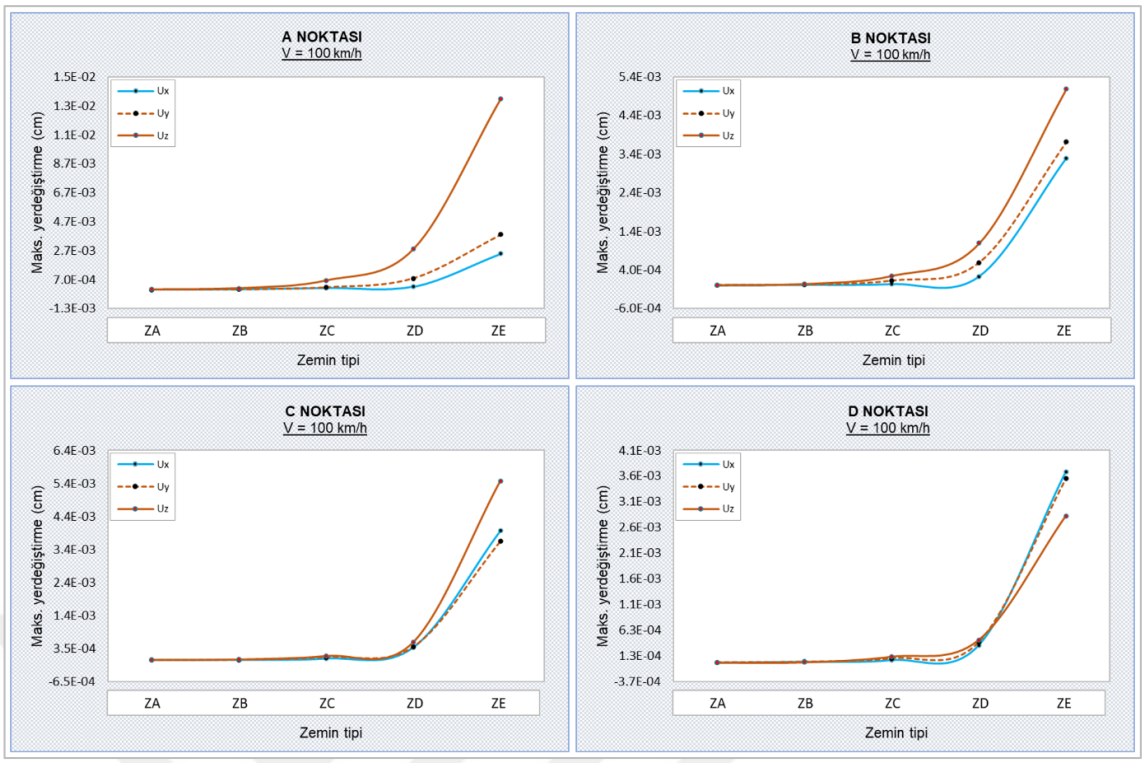


Şekil 5.5 : Farklı zemin koşullarında tren hızlarının düşey doğrultuda yayılan titreşime etkisi.

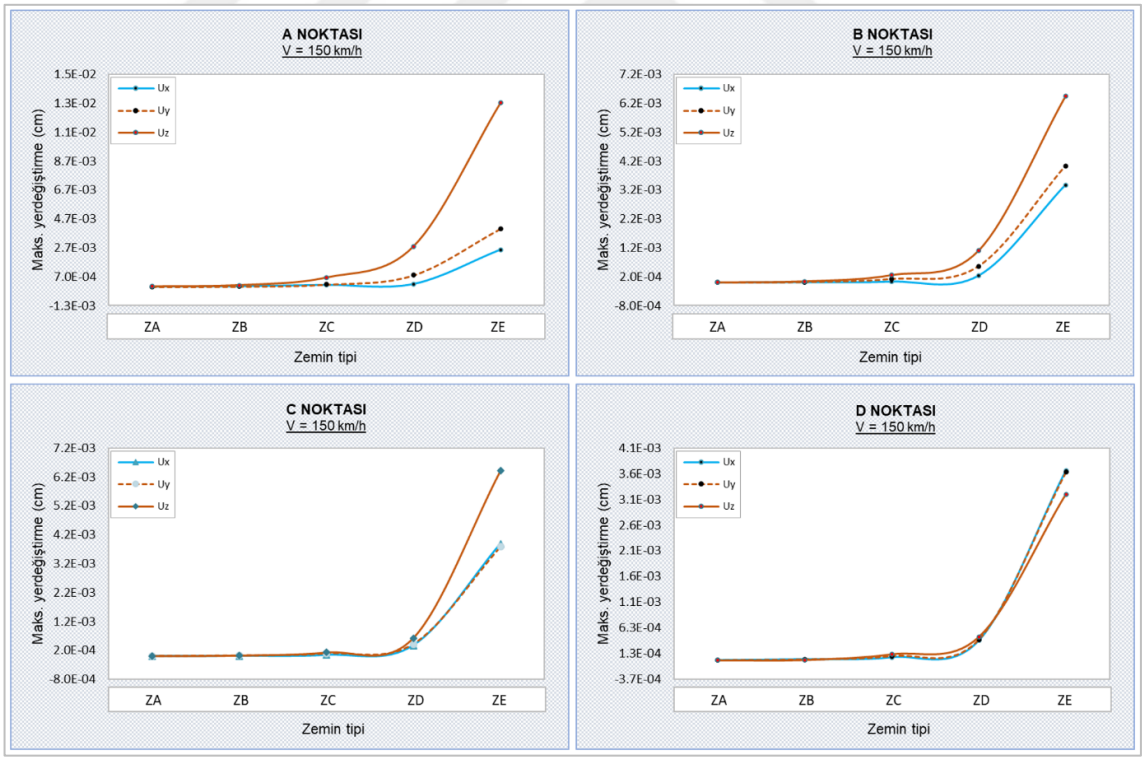
Şekil 5.3-5.5, farklı zemin koşulları altında farklı tren hızları için seçilen noktalarda maksimum yerdeğiştirmeleri göstermektedir. Şekillerden, 100-300 km/h hızlar için seçilen noktaların tüm yönlerde maksimum yerdeğiştirmelerinin demiryolu hattı

merkezinden uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Tren hızı artırılarak yerdeğiştirme de arttırılmış ve en yüksek yerdeğiştirme trenin 300 km/h hızla hareket ettiği zaman kaydedildiği bulunmuştur. Bu nedenle, demiryolu hatlarının mesafesi, tren hızı ve pik yerdeğiştirmeleri doğru orantılıdır. Seçilen noktalar için tren hızının artmasıyla pik yerdeğiştirmesi de artar. Böylece, tren hızının tepe yer değiştirme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 5.3-5.5 incelendiğinde, tüm tren geçiş hızları için yumuşak ve rijit zemin durumlarında düşey doğrultudaki dalga yayılımı benzer şekilde azalım göstermiş olup hatta en yakın ve en uzak noktalardaki genlik değeri arasında %78 - %91 arasında bir değişim görülmüştür.

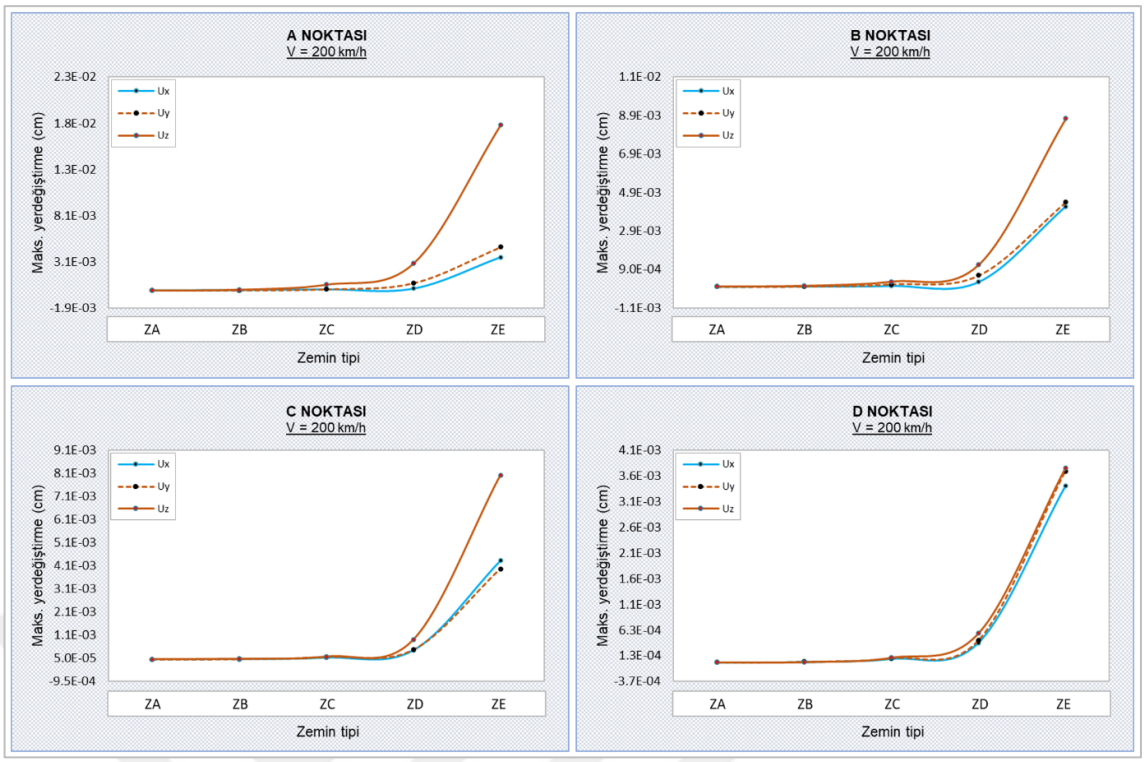
Farklı zemin koşulları altında yapılan dinamik analizlerden, zeminlerin rijitliği nedeniyle tren kaynaklı titreşimlerin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Pik yerdeğiştirme değerleri sert kayadan yumuşak zemine doğru artmaktadır. Serbest zemin yüzeyinde zemin türüne bağlı dalga yayılımı incelendiğinde, zemin rijitliği azaldıkça dalga yayılımında beklendiği gibi bir artma trendinin olduğu ancak kötü zemin durumu için (özellikle gevşek zemin türünde) oluşan maksimum yerdegistirme genlikleri her ne kadar çok küçük olsa da kendi içerisinde dalga yayılımının her üç doğrultusunda bazen azalma trendi olduğu gözlemlenmiştir. Bu da zemin ortamının baskın doğal titreşim frekansının değişmesi/azalması ve dış yükün frekansına yaklaşması ile açıklanabilir. Her zemin tipi için tren kaynaklı yer titreşimlerinin mekanik özelliklerine göre değiştiği sonucuna varılmıştır. Şekil 5.6-5.10, demiryolu hattından farklı mesafelerde zemindeki titreşimin üç yönlü bileşenini göstermektedir.



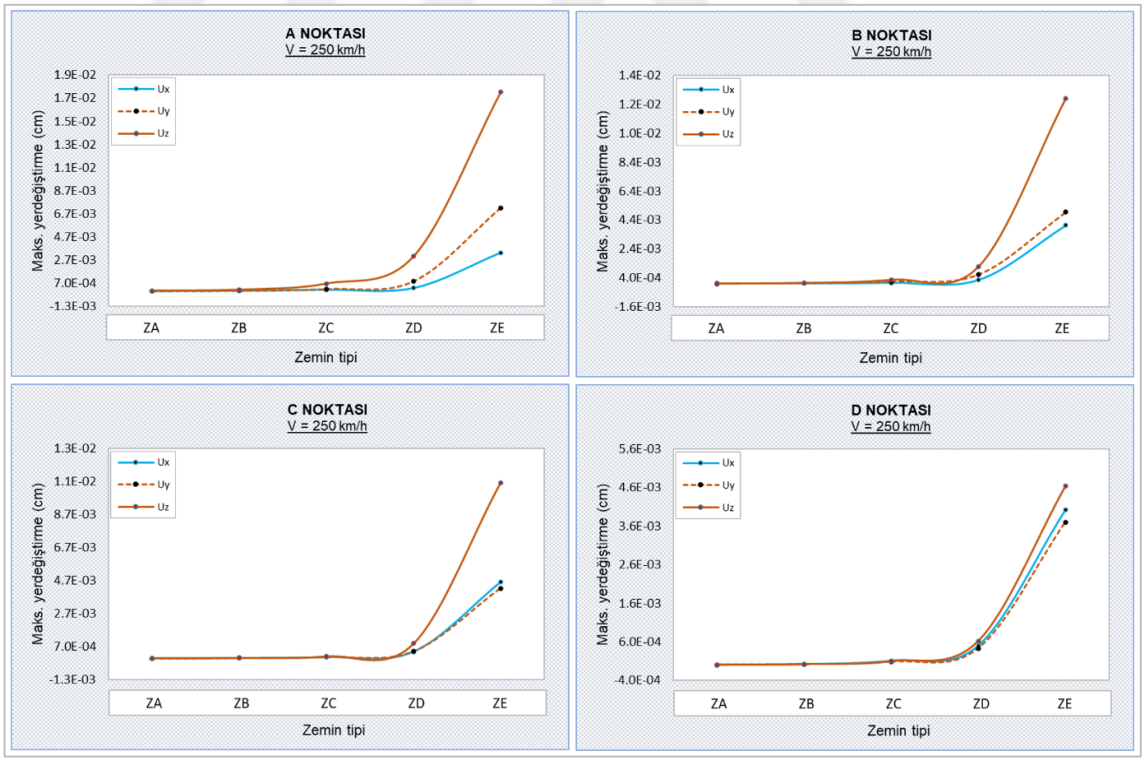
Şekil 5.6 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 100 km/h).



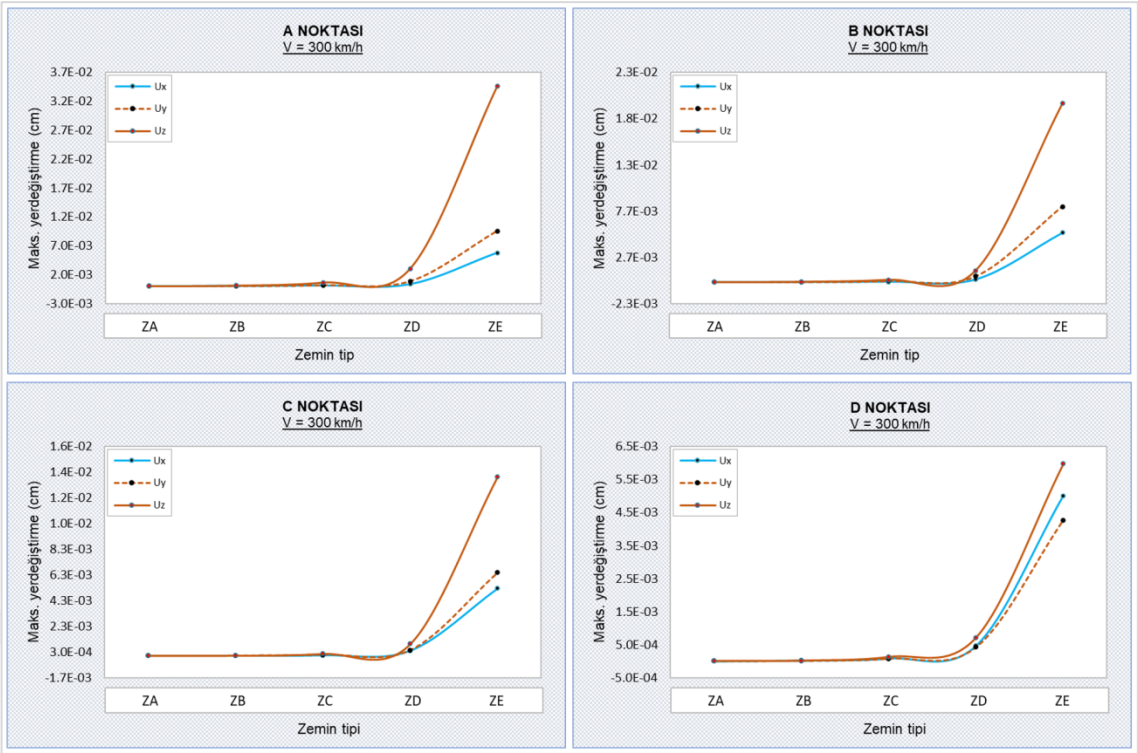
Şekil 5.7 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 150 km/h).



Şekil 5.8 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 200 km/h).



Şekil 5.9 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 250 km/h).



Şekil 5.10 : Hızlı tren geçişinden kaynaklanan üç yönlü maksimum yerdeğiştirmelerin karşılaştırma grafiği (v = 300 km/h).

Yüksek hızlı trenin farklı zemin koşullarında geçişinden dolayı demiryolu hattından dışa doğru yayılan titreşimlerin oluşturduğu etkilerin maksimumları Şekil 5.6-5.10'da gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, genellikle düşey yerdeğiştirme değerlerinin (U_z) tipik olarak en büyük olduğu, hatta dik olarak yayılan titreşimlere ait yerdeğiştirme değerlerinin (U_x) en az olduğu görülmektedir. Tren hattından uzaklaştıkça titreşim genliklerinin sönüm etkisi ile azaldığı ve düşey bileşenin diğer iki bileşene göre daha baskın hale geldiği görülmektedir. Zemin rijitliği azaldıkça (ZD ve ZE zemin sınıfı için) yatay doğrultuda yayılan titreşimlerde maksimum genlikler değişkenlik göstermektedir. Bu da zemin ortamının baskın doğal titreşim frekansının değişmesine ve dalga yayılma yönüne ve özelliklerine bağlıdır.

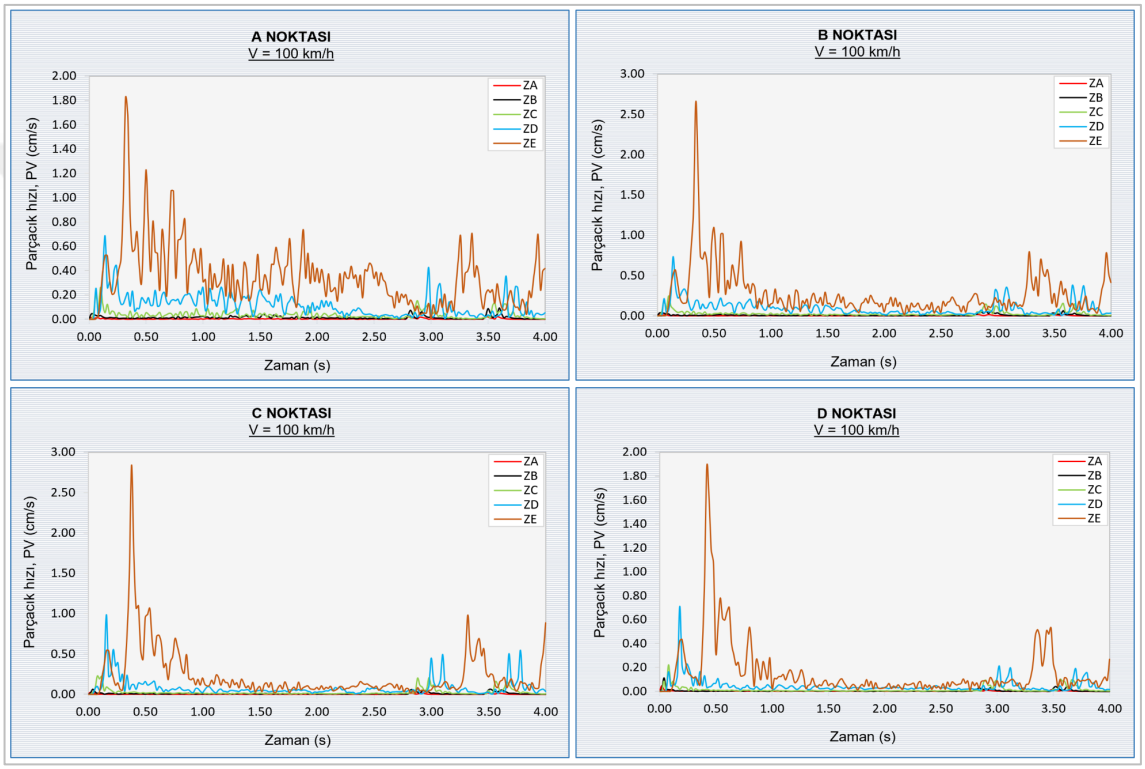
5.1.2. Parçacık hız değerlerinin değişimi

Trenin neden olduğu titreşimin özelliklerini araştırmak için, doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak mesafe boyunca üç dogrultuda yüzey parçacık hızları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, farklı tren hızları ve zemin türleri için Şekil 5.11-5.15'te sunulmaktadır. Hız zaman sinyalinin mutlak genliği olarak tanımlanan parçacık hızı (PV), farklı zemin koşulları için hesaplanmış ve grafik olarak verilmiştir. Çoklu yönler

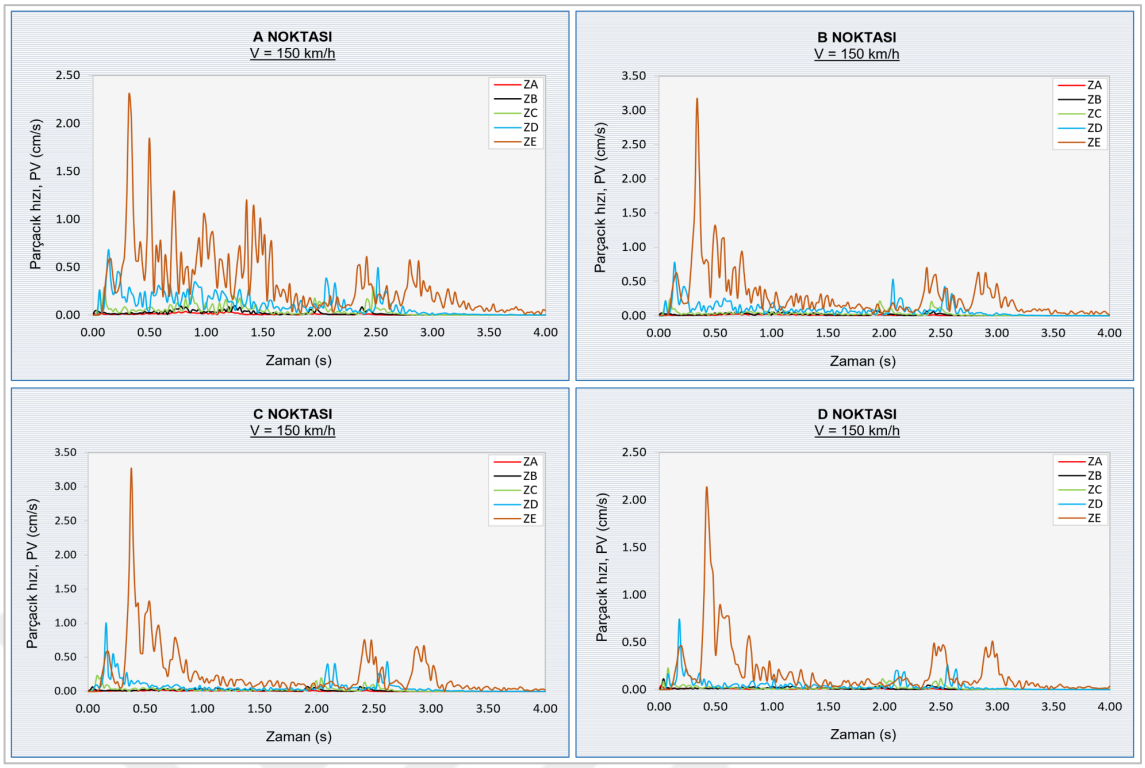
ölçüldüğünden, üç bileşenin (x, y, z) vektör hızı (parçacık hızı) denklem 5.1 kullanılarak elde edilmiştir.

$$PV = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \tag{5.10}$$

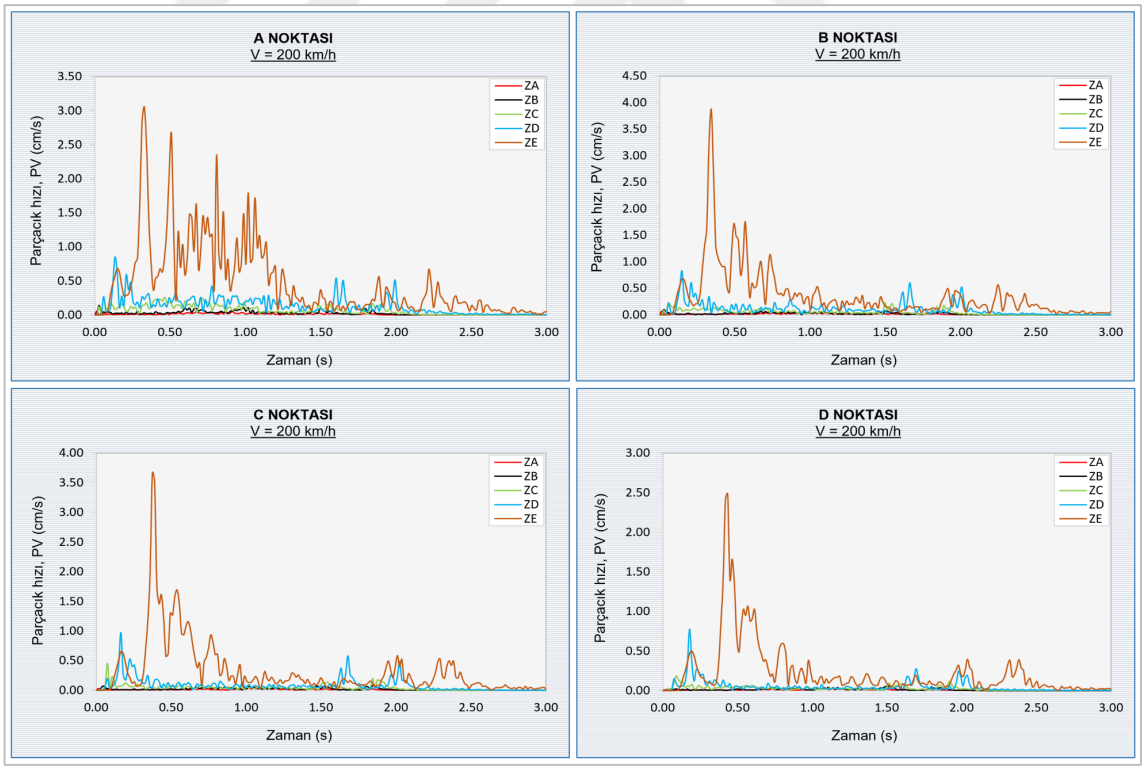
Yapılan nümerik analizler sonucunda, ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, farklı hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin oluşturduğu titreşimlerin parçacık hız-zaman ilişkisi serbest zemin yüzeyinde hattan uzaklığa bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 5.11-5.15).



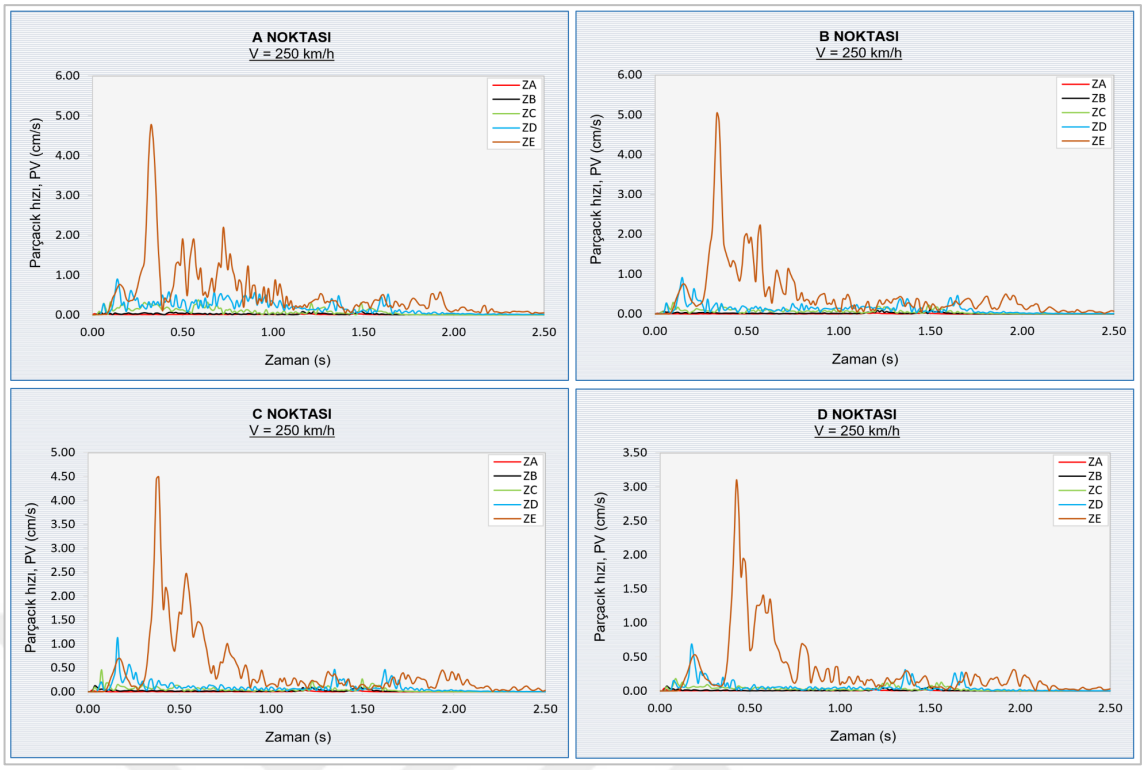
Şekil 5.11 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 100 km/h).



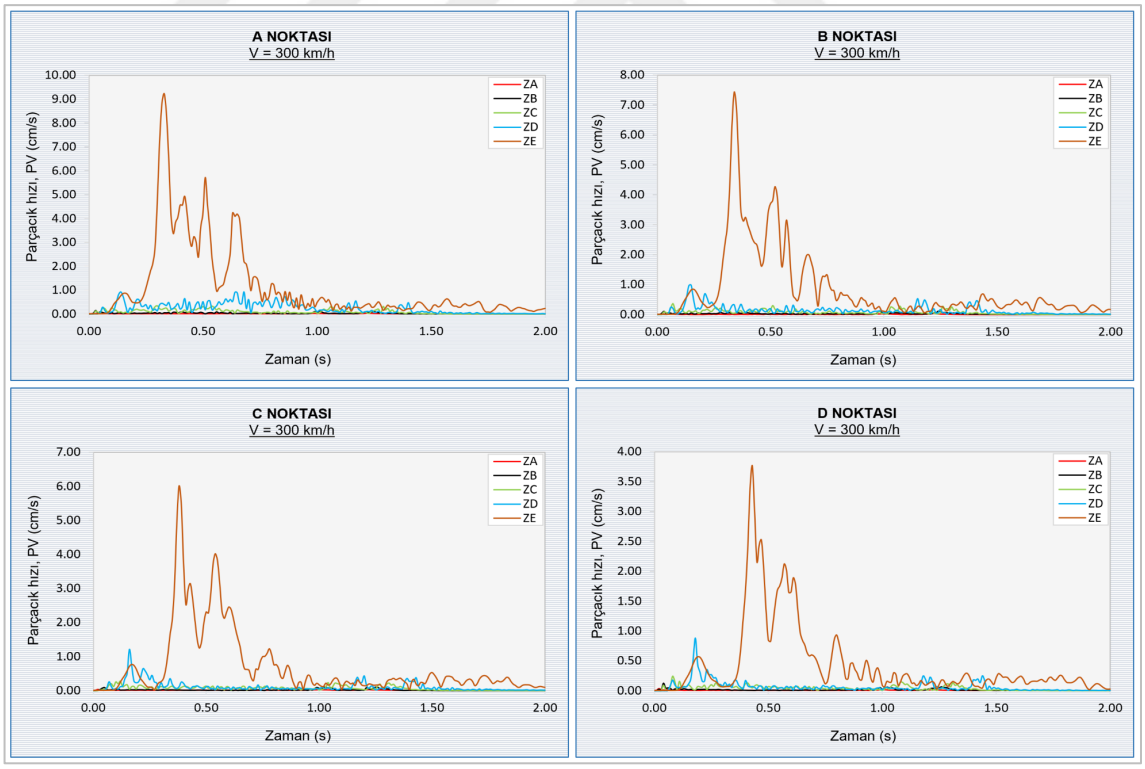
Şekil 5.12 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 150 km/h).



Şekil 5.13 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 200 km/h).



Şekil 5.14 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 250 km/h).



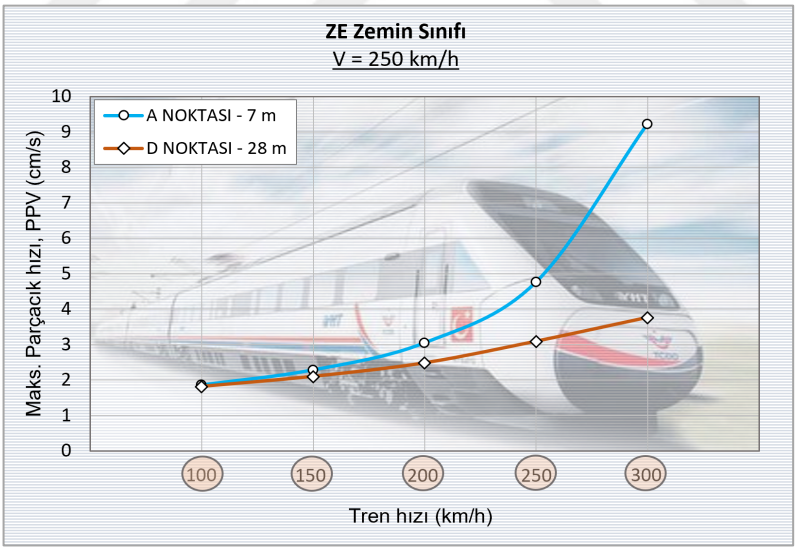
Şekil 5.15 : Tren hızının ve farklı zemin türlerinin serbest alan parçacık hızına etkisi (v = 300 km/h).

Şekil 5.11-5.15'ten, tren hızının artmasıyla serbest zemindeki parçacık hızının arttığı görülebilmektedir. Farklı zemin koşulları için pik parçacık hızı, tren 300 km/h hızla hareket ederken kaydedilmiştir. Farklı zemin türleri için en düşük parçacık hızı, 100

km/h hızda tren geçişi için kaydedilmiştir. Böylece, tren hızının, özellikle parçacık hızları için tren kaynaklı titreşimler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Farklı zemin özelliklerinin tren kaynaklı yer titreşimi üzerindeki etkisi incelendiğinde, zemin rijitliğinin azalmasıyla birlikte serbest zemin üzerindeki parçacık hızının arttığı gözlemlenmiştir. Parçacık hızı değerleri sert kayadan yumuşak zemine doğru artmaktadır. ZA zemin sınıfı en düşük parçacık hızına sahip olduğunda, ZE zemin sınıfı için en yüksek parçacık hızı kaydedilmektedir. Zemin rijitliği arttıkça, dalga yayılımının doğrultusunda parçacık hızlarında büyük oranlarda azalmaların meydana geldiği görülmüştür. Serbest zemin yüzeyinde zemin türüne bağlı dalga yayılımı incelendiğinde, zemin rijitliği azaldıkça dalga yayılımında beklendiği gibi bir artma trendinin olduğu gözlemlenmiştir. Zeminlerin rijitliği nedeniyle tren kaynaklı yer titreşimlerinin farklı zemin koşulları için önemli ölçüde değiştiği sonucuna varılmıştır.

Parçacık hız-zaman titreşim ilişkilerinden maksimum parçacık hızları elde edilerek, serbest zemin yüzeyindeki değişimi hattan uzaklığa bağlı olarak (hatta en yakın ve uzak noktası) en kötü zemin sınıfı için örnek olarak Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16 : Yumuşak zeminde farklı tren hızları için demiryoluna en yakın ve uzak mesafedeki maksimum parçacık hızı.

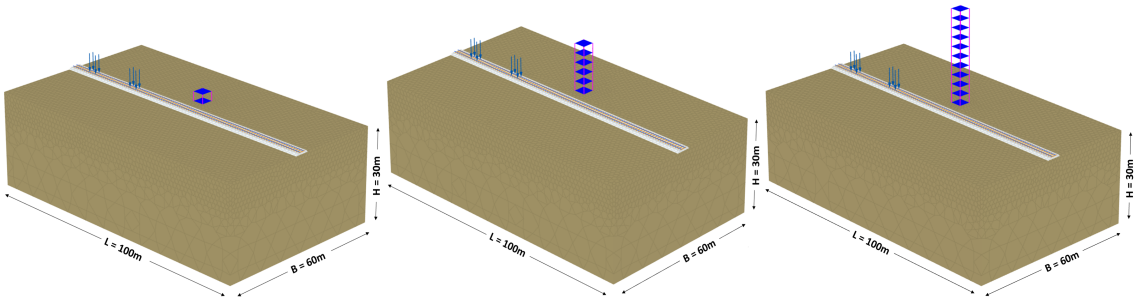
Serbest zemin yüzeyinde tren hızına bağlı dalga yayılımı incelendiğinde, tren hızı arttıkça dalga yayılımında bir artma trendinin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 100-300 km/h hızlar için seçilen noktaların pik parçacık hızının demiryolu hattı merkezinden uzaklaştıkça azaldığı görülebilmektedir.

5.2. Demiryolu Titreşimlerinin Üstyapı Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Incelenmesi

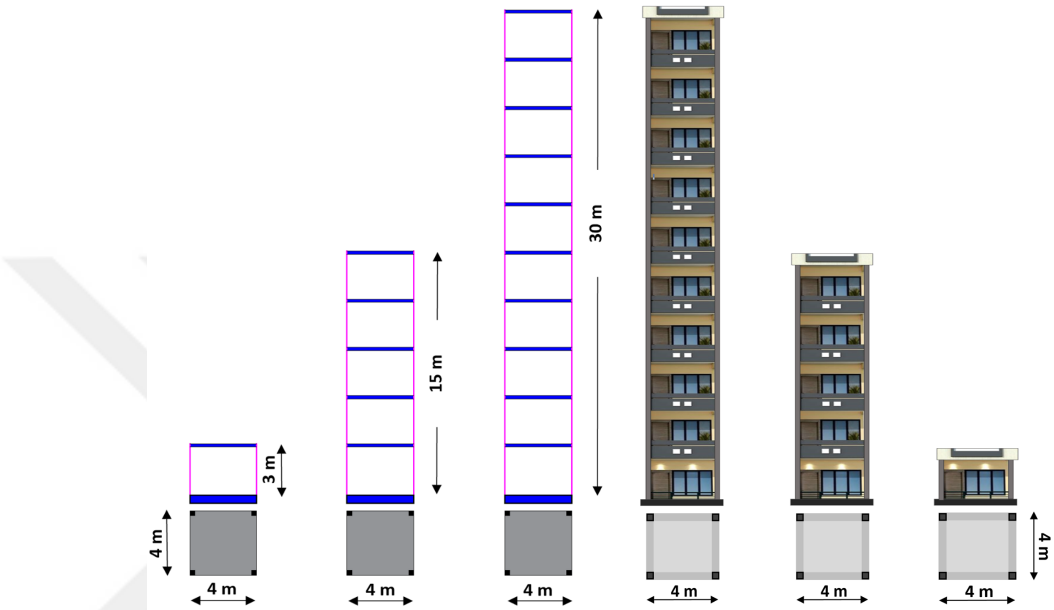
Tipik olarak bir binanın içindeki bir kişi, demiryolu trafiğinin neden olduğu titreşimleri fark edecek olan alıcıdır. Bu nedenle, titreşimlere maruz kalan bir yapının davranışını incelemek ilgi çekicidir. Bu bölümde, demiryolu titreşimlerinin üstyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, daha önce doğrulaması yapılan zemin modeline farklı yüksekliklerde tek açıklıklı bina modelleri eklenerek demiryolu-yapı-zemin ortak sistemini ifade eden sonlu eleman modeli üzerinde farklı yapı modelleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Binaların titreşimlere tepkisini değerlendirmek için yine dinamik titreşim analizleri yapılmıştır. Binaların farklı kat seviyelerindeki titreşim seviyeleri karşılaştırılmıştır.

5.2.1. Yapı-tren-zemin sisteminde bina modeli

Tren kaynaklı titreşimlere karşı çevresel yapıların dinamik tepkisini incelemek amacıyla, saha deneylerinden elde edilen veriler ile doğrulanmış hızlı tren-zemin sonlu eleman modeli üzerinde farklı doğal titreşim periyotlarına ve serbestlik derecelerine sahip binalar için kapsamlı parametrik çalışmalar yapılmıştır. Dinamik davranışın incelendiği yapı modelleri; 1, 5 ve 10 katlı olup betonarme çerçeveli taşıyıcı sisteme sahiptir. Analizlerde binanın bütün kat yükseklikleri 3m ve genişliği 4m olarak belirlenmiştir. Kolonların kesitleri 0.3m x 0.3m, döşeme kalınlığı 0.2m ve beton sınıfı ise C25 olarak seçilmiştir. Demiryolu hattı ve bina arasındaki mesafe 7m olarak belirlenmiştir. Temel için kullanılan beton sınıfı C35 olup ve gömülme derinliği 0.5m'dir. Kolonlar çubuk elemanları ile, döşemeler ve temeller ise düzlem elemanlar ile modellenmiştir. Şekil 5.17'de analizler için geliştirilmiş olan sayısal model gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.17 : Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modelin 2D ve 3D görünümü.

Zemin davranış modeli olarak elastik malzeme davranışı seçilmiştir. Bu model yaklaşımında, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu yani gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineer olduğu tanımlanmaktadır. Sayısal analizlerinde, zemin ortamının üstyapının dinamik davranışına etkisini daha iyi ortaya koyabilmek amacıyla zemin özellikleri olarak; gevşek kum (ZE), sıkı kum (ZC) ve kaya zemin (ZA) durumunu temsil eden üç tip zemin gurubuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bu zemin türlerinin malzeme özellikleri Tablo 5.5'te sunulmuştur. Bu çalışmada, yüksek hızlı tren hızı 250 km/h olarak kabul edilmiştir. Sayısal işlemlerde tren hızı V = 250 km/h = 69.44 m/s olarak alınmıştır.

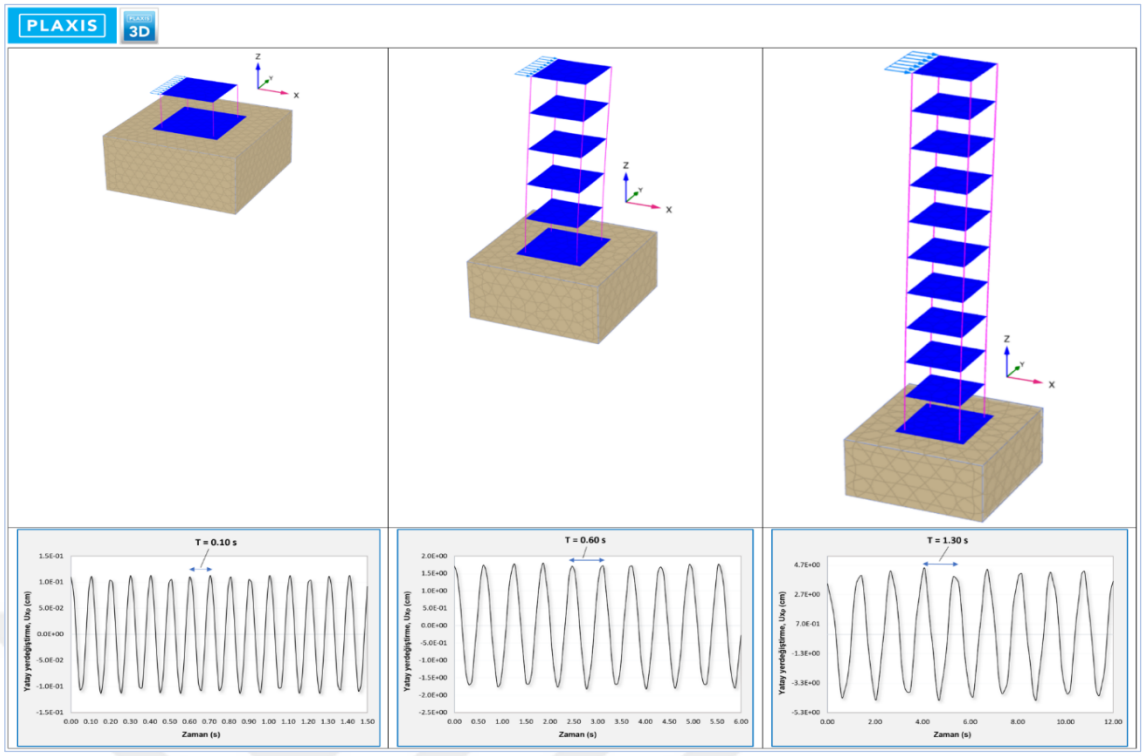
Tablo 5.5 : Zemin mekanik özellikleri (Tatone, 2015; Behnamfar, 2016).

Zemin Cinsi	Yerel Zemin Sınıfı	Parametre			
		γ (kN/m^3)	E (kN/m^2)	υ (-)	V_S (m/s)
Sert kaya	ZA	27.45	5.10×10^7	0.25	2700
Sıkı kum	ZC	18.63	1.55×10^6	0.35	550
Gevşek kum	ZE	16.67	4.93×10^4	0.45	100

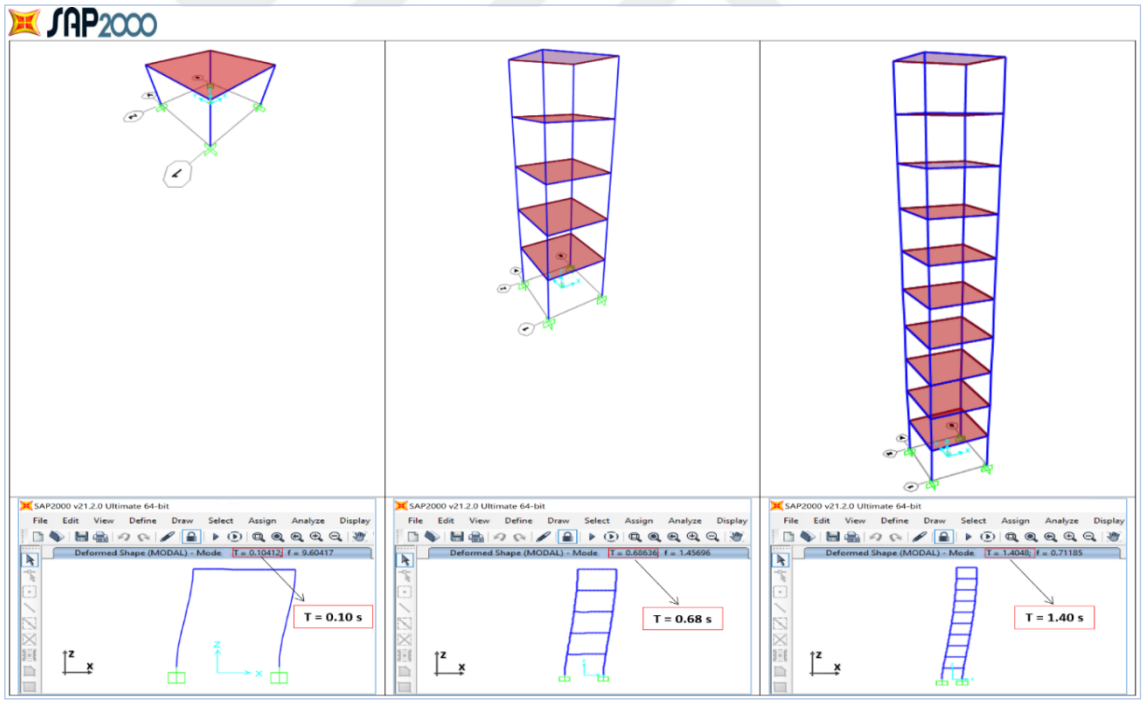
5.2.2. Yapı modelinin doğrulanması

Binaların yükseklikleri 3 m, 15 ve 30 m arasında değişmektedir. Bu yapıların tasarımında kullanılan ana değişken, hakim titreşim periyotlarıdır. Her yapının kütlesi ve rijitliği, 1 katlı yapının doğal titreşim periyodun 0,1 s olacak şekilde referans alınması ile belirlenmiştir.

Demiryolu üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman alanında çözümü için, PLAXIS 3D yazılımında serbest titreşim analizleri tüm yapı modelleri için yapılmıştır. Farklı yüksekliklerdeki yapılar için gerçekleştirilen analizlerde, zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini belirten kayma dalga hızı (V_s) değeri, ankastre mesnetli durumu temsil etmek üzere 5000 m/s olarak seçilmiştir. Ardından, yapı modelinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla SAP2000 yazılımı kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirildi. Her iki analizden elde edilen hakim moda ait periyot değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.18-5.19).

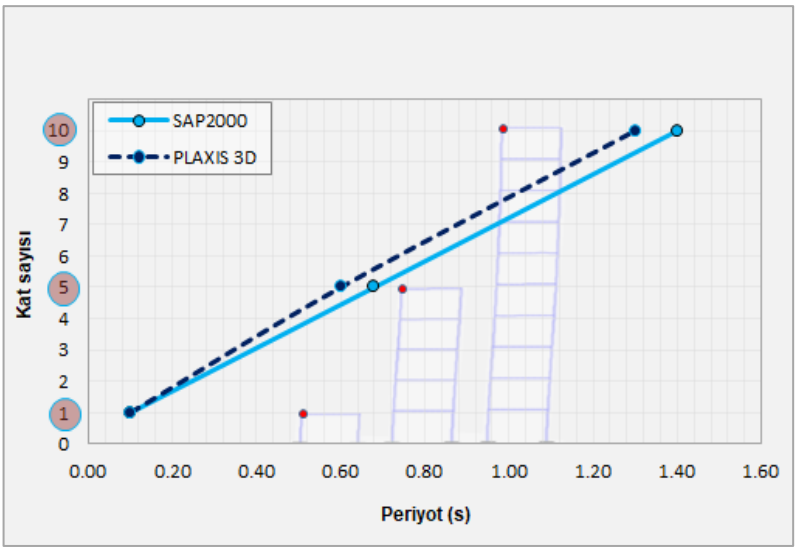


(a)



(b)

Şekil 5.18 : Bina kat sayısına bağlı periyot değişimi (a) Plaxis 3D ve (b) SAP2000 programında.



Şekil 5.19 : Bina kat sayısına bağlı periyot değişiminin karşılaştırılması.

Tablo 5.6 : Yapıya ait modal periyot değerlerinin karşıastırılması.

Kat sayısı	Periyot (s)	
	PLAXIS 3D	SAP2000
1	0.10	0.10
5	0.68	0.60
10	1.40	1.30

1, 5 ve 10 katlı betonarme tek açıklıklı çerçeve sistemlerinin dinamik davranışını daha gerçekçi bir şekilde inceleyebilmek için, x doğrultusundaki hakim moda ait periyot değerleri karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. PLAXIS yazılımda tanımlanan yapı modellerinde %92-%100 aralığında periyot değerlerinde bir uyuşum elde edilmiştir.

5.2.3. Sayısal uygulama ve sonuçlar

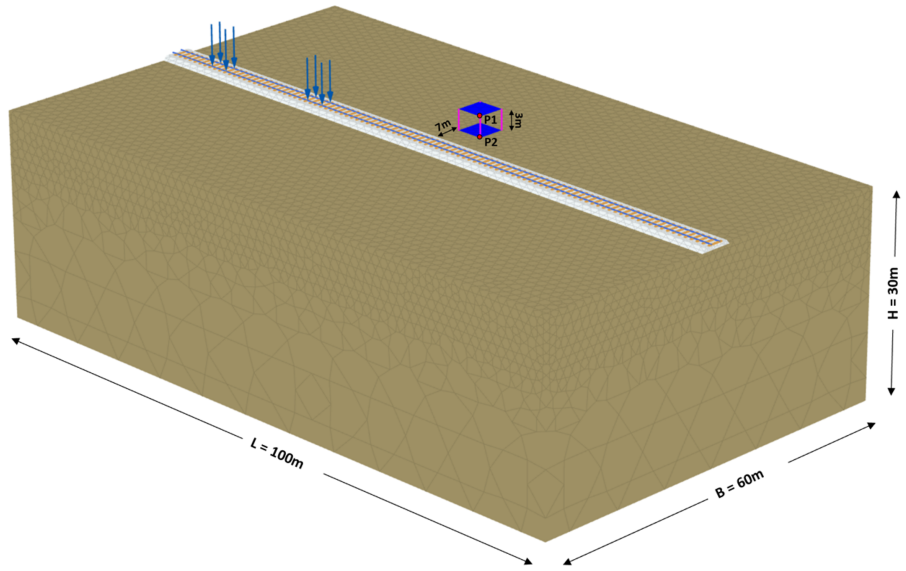
Yüksek hızlı trenlerin geçişi sırasında oluşan titreşim hareketlerinin, üstyapı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirebilmek amacıyla, yapı ve zeminin birlikte gösterdiği davranışı doğrudan dikkate alarak bir sonlu eleman modeli kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu araştırmada, hızlı trenin hareketiyle titreşen betonarme yapıların dinamik davranışını incelemek amacıyla demiryolu üstyapı-zemin etkileşimini hesaba katan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model, farklı zemin parametrelerine bağlı olarak sistematik bir program akışı içinde sayısal analizlere tabi tutulmuş ve elde edilen

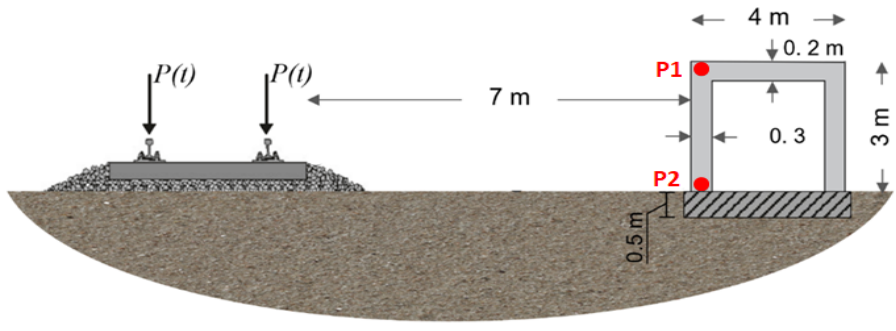
sonuçlar grafiklerle sunulmuştur. İlk olarak, tek katlı bir açıklıklı basık yapının dinamik davranışı, trenin dinamik yükleri altında incelenmiş ve yapı-zemin ortak sistemine ait yerdeğiştirme ile hız grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra, değişik yüksekliklere sahip betonarme düzlem çerçeveli yapılar için bu analizlere devam edilmiştir.

5.2.3.1. Bir katlı yapı için dinamik analiz sonuçları

Çalışmanın ilk aşamasında, hızlı tren ile titreşen bir katlı ve periyodu 0.1 saniye olan yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Tren dalgalarının üstyapı yüksekliği boyunca meydana gelen hız ve konum değişiklikleri, bina yüksekliğine göre değişen yapı-zemin etkileşimini hesaba katarak, çeşitli zemin tipleri arasında karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak binanın çatı katı düzeyi (P1 noktası) ve binanın temel tabanı (P2 noktası) seçilmiştir (Şekil 5.20).



(a)

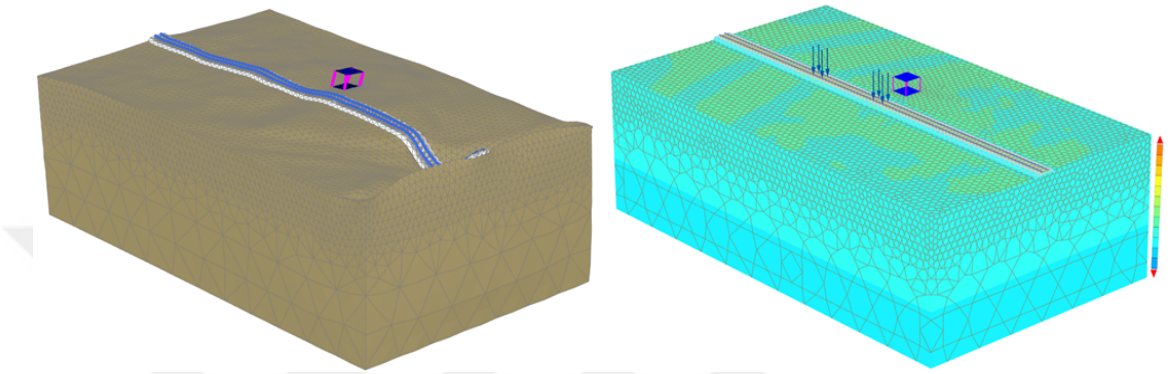


(b)

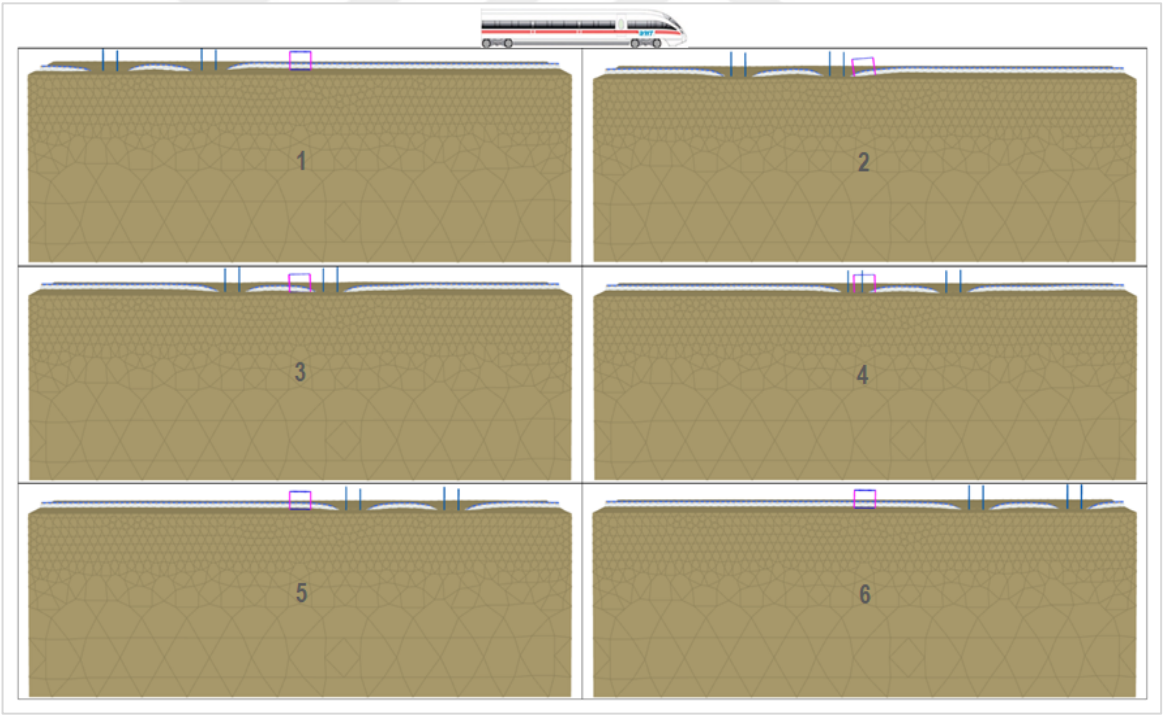
Şekil 5.20 : Demiryolu-yapı-zemin modelinin 2D ve 3D geometrik gösterimi.

Hızlı trenin sebep olduğu titreşim hareketlerinin üstyapı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, yapı ile zeminin ortak davranışını doğrudan dikkate alan

sonlu eleman modeli kullanılarak, çeşitli zemin tipleri için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Zemin özellikleri olarak; gevşek kum, sıkı kum ve kaya zemin durumunu temsil eden üç tip zemin gurubuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, yüksek hızlı trenin hızı 250 km/h olarak alınmıştır. Şekil 5.21, yüksek hızlı trenin gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla geçişinden dolayı simüle edilmiş yapı-zemin modelinde oluşan deformasyon ve gerilme dağılımını göstermektedir.



(a)

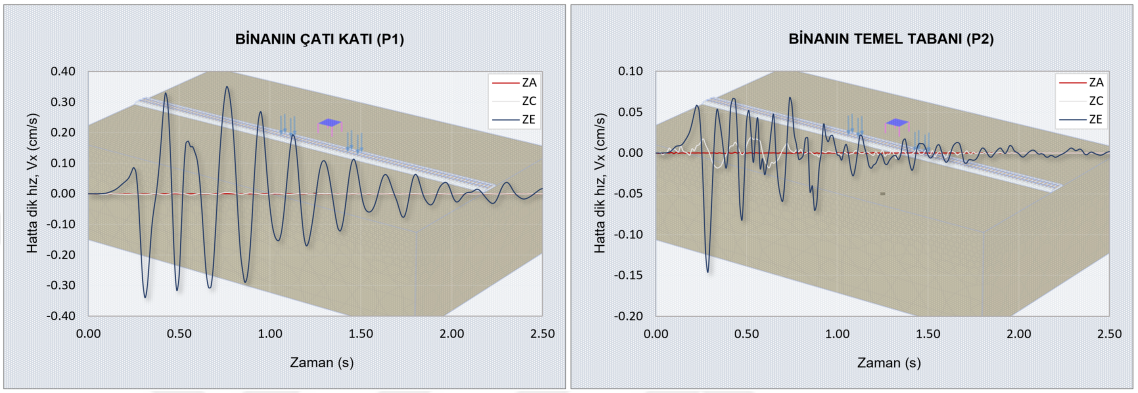


(b)

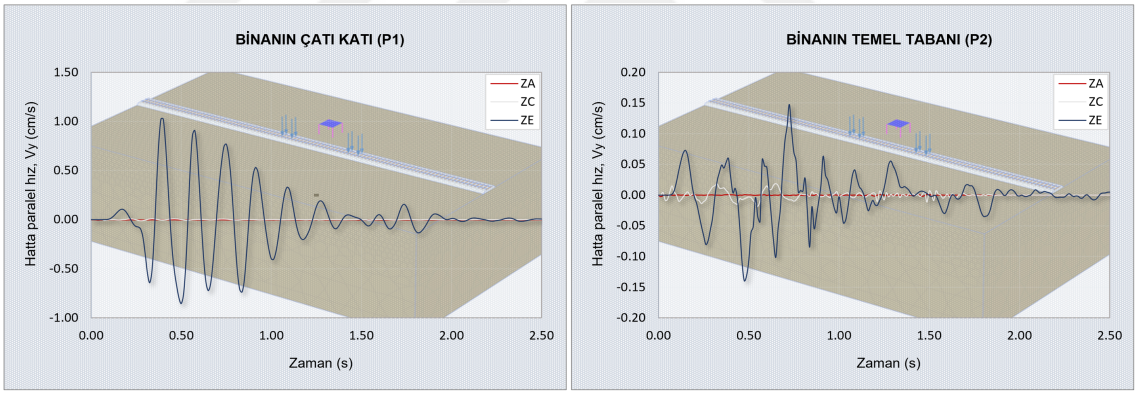
Şekil 5.21 : Gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı yapı-zemin sistemin davranışı (a) gerilme ve (b) deformasyon.

Hız sonuçları

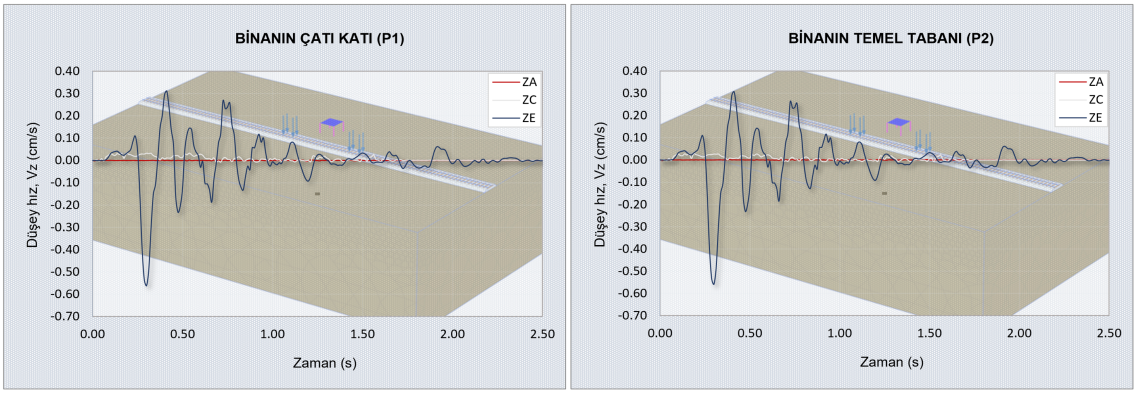
Hızlı demiryolu trafiğinin yapıda oluşturduğu titreşim etkilerini gözlemlemek için PLAXIS 3D yazılımında geliştirilen sonlu eleman modelinin analiz sonuçları hız-zaman ilişkisi açısından hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda farklı zemin türü için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.22'de verilmiştir. Ayrıca, hız-zaman ilişkilerinden maksimum hız değerleri elde edilerek üç doğrultuda Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



(a)

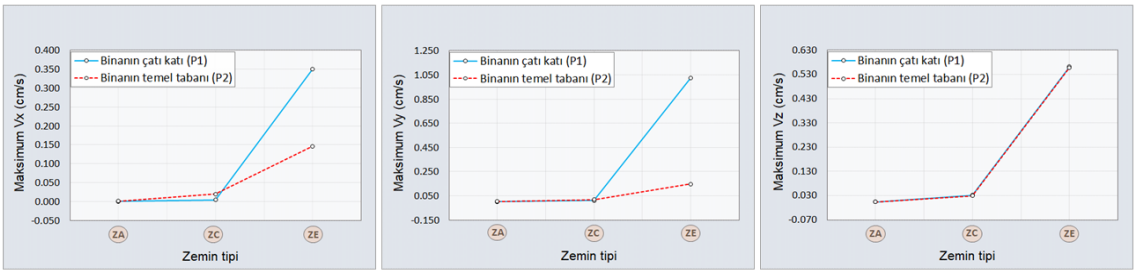


(b)



(c)

Şekil 5.22 : Farklı zemin sınıfı için hız-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.



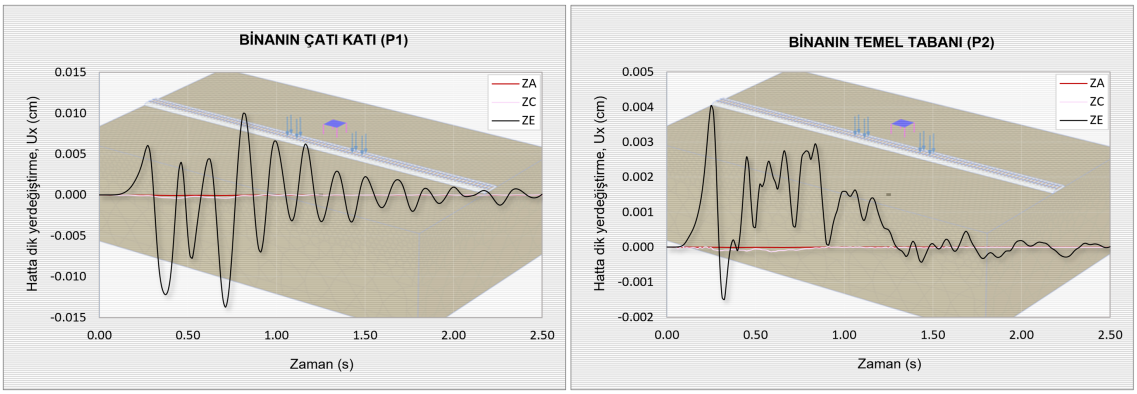
Şekil 5.23 : Tek katlı yapı içerisinde hız değişimi.

Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin hız-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum hız değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 5.22); üstyapı tepe ve temel noktalarının en büyük hız değerleri, gevşek zemin durumunda gözlenmektedir. Yani zemin rijitliği azaldıkça, dalga yayılımının her üç doğrultusunda da hız değerlerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum hız değeri, sıkı ve kaya zeminlerden sırasıyla %98,77 ve %99,95 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum hız değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden yaklaşık olarak %98,92 ve %99,97 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum hız değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden sırasıyla %94,19 ve %99,15 civarında daha büyük olduğu görülmektedir.

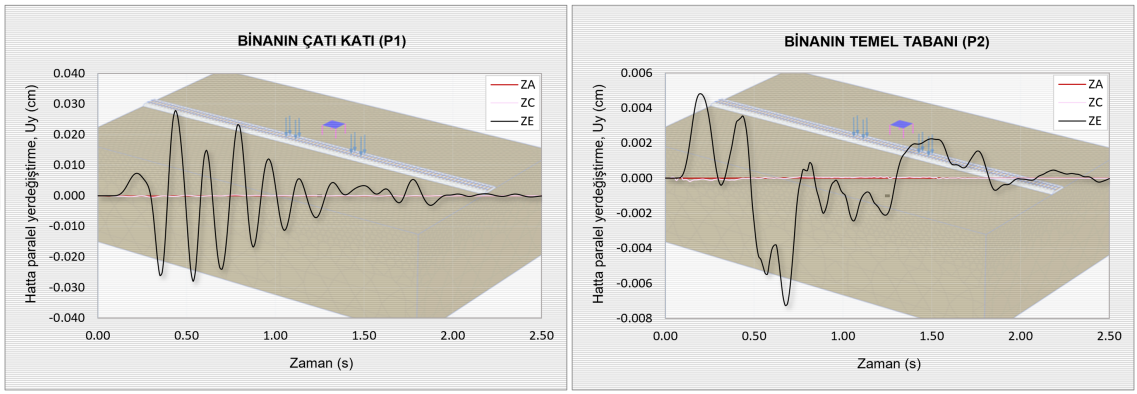
Grafik 5.23 incelendiğinde, titreşimlere ait hız değerlerinde, yapısal anlamda yumuşak zeminlerde hız değerlerinde büyük bir artış görülmüştür. Ayrıca yapı tepe noktasında ölçülen hız değerlerinde de temel kotuna göre bir büyüme gözlemlenmiştir.

Yerdeğiştirme sonuçları

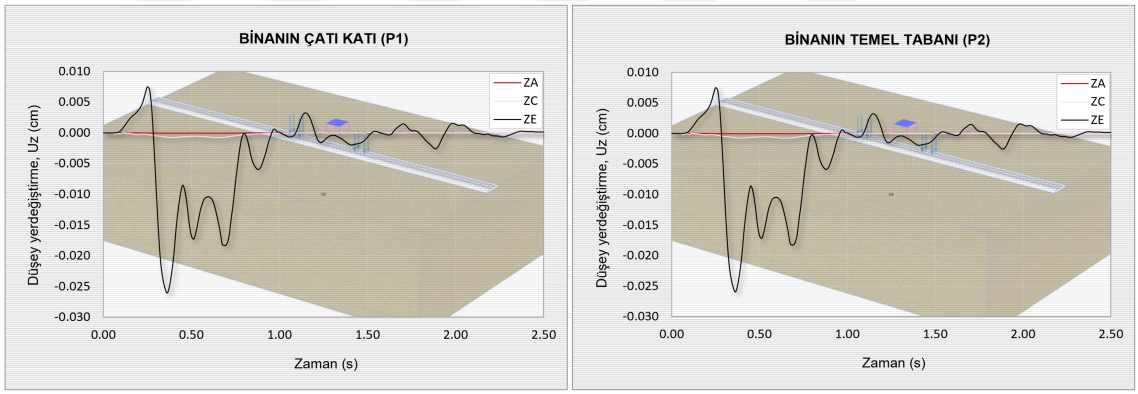
Yapılan nümerik analizler sonucunda, ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi yapıda ve binanın yüksekliğine bağlı olarak her bir zemin sınıfı için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.24'te verilmiştir. Ayrıca, yerdeğiştirme-zaman ilişkilerinden maksimum yerdeğiştirmeleri elde edilerek üç doğrultuda Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



(a)

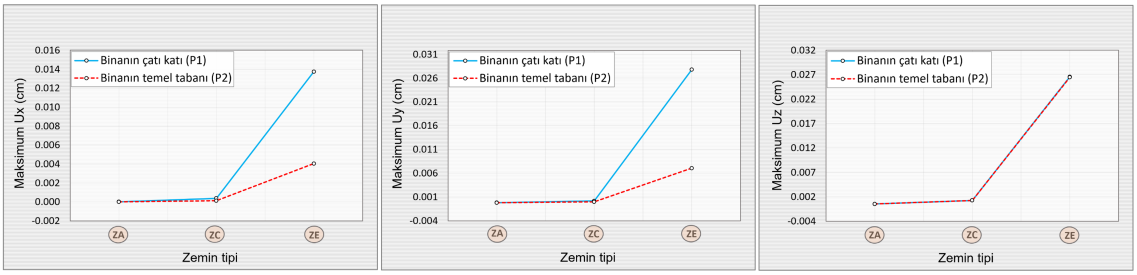


(b)



(c)

Şekil 5.24 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.



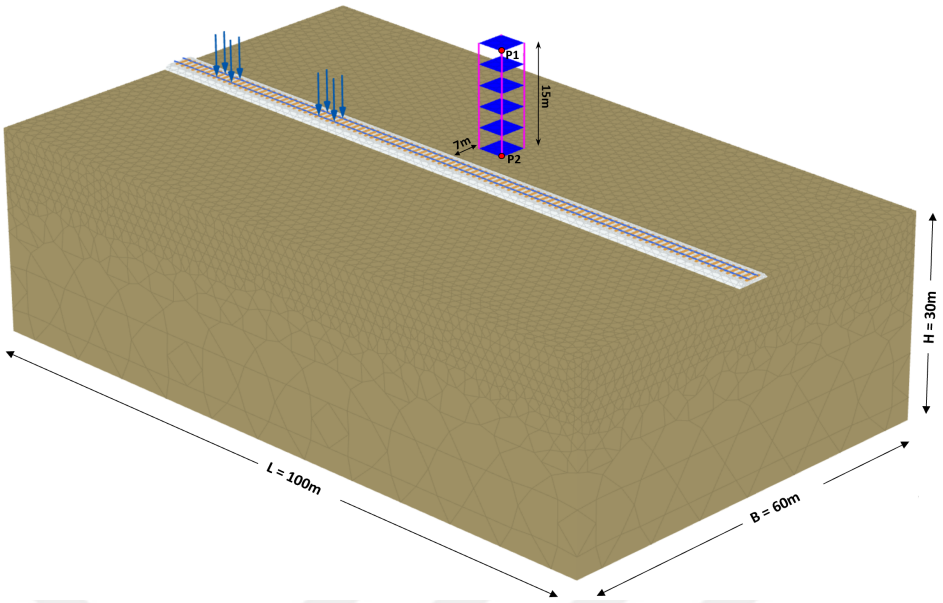
Şekil 5.25 : Tek katlı yapı içerisinde yerdeğiştirmenin değişimi.

Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum yerdeğiştirmelerinin değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 5.24-5.25); üstyapı tepe noktasının maksimum yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin durumunda gözlenmektedir. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı ve kaya zeminlerden sırasıyla %97,27 ve %99.88 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden yaklaşık olarak %98,61 ve %99,96 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden sırasıyla %97,09 ve %99,90 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak; zemin rijitliği azaldıkça, yerdeğiştirme değerlerinde dalga yayılımının her üç doğrultusunda da yerdeğiştirmelerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür.

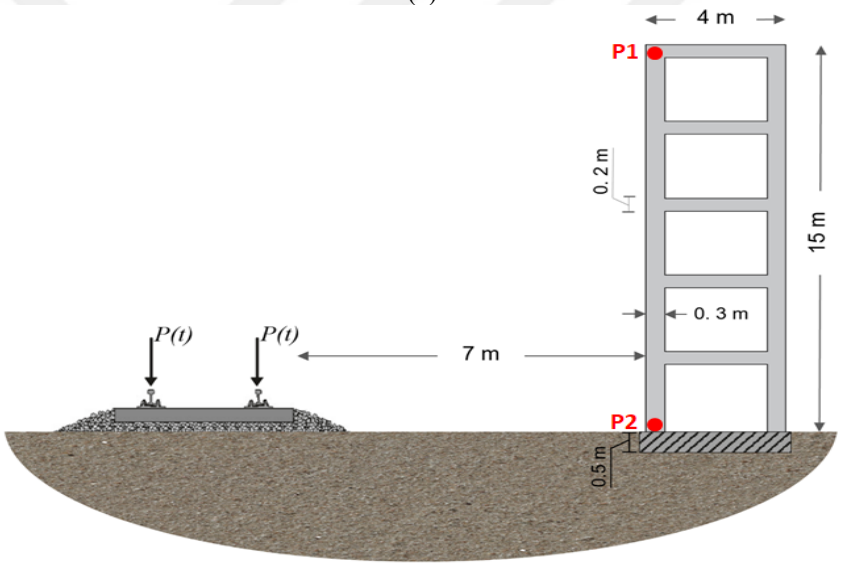
Şekil 5.25 incelendiğinde, bina tepe noktası (P1) maksimum yerdeğiştirme değerlerinin bina temel (P2) yerdeğiştirme değerlerine göre farklı zemin koşullarına bağlı olarak her üç doğrultuda büyüdüğü görülmüştür. Bina tepe noktasının hatta dik maksimum yerdeğiştirme değerleri; kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %48, %65 ve %71 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Hatta paralel durumu için ise bina tepe noktasının maksimum yerdeğiştirme değerleri; kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %37, %51 ve %74 artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda bina tepe ve temel noktalarının maksimum yerdeğiştirme değerleri, tüm zemin sınıfları için birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

5.2.3.2. Beş katlı yapı için dinamik analiz sonuçları

Çalışmanın ikinci aşamasında, hızlı tren ile titreşen beş katlı ve periyodu 0.6 saniye olan yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Tren dalgalarının üstyapı yüksekliği boyunca meydana getirdiği hız ve yerdeğiştirmelerin, bina yüksekliğine göre değişimi, yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak farklı zemin tipleri için karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak binanın çatı katı düzeyi (P1 noktası) ve binanın temel tabanı (P2 noktası) seçilmiştir (Şekil 5.26).



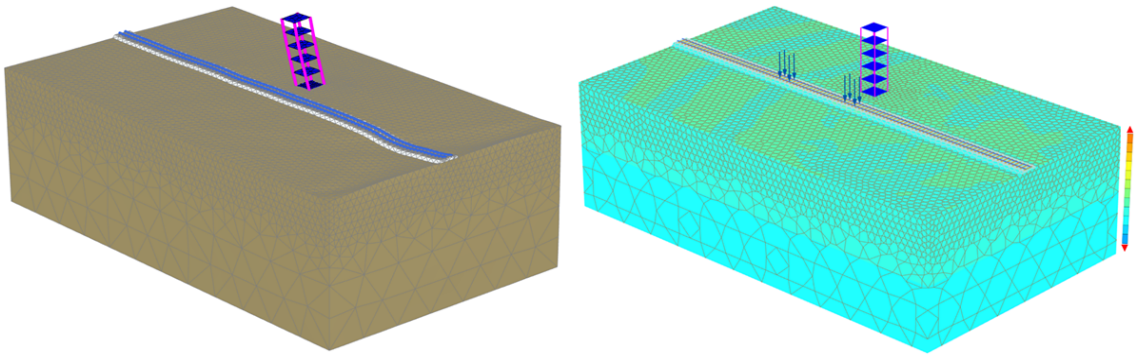
(a)



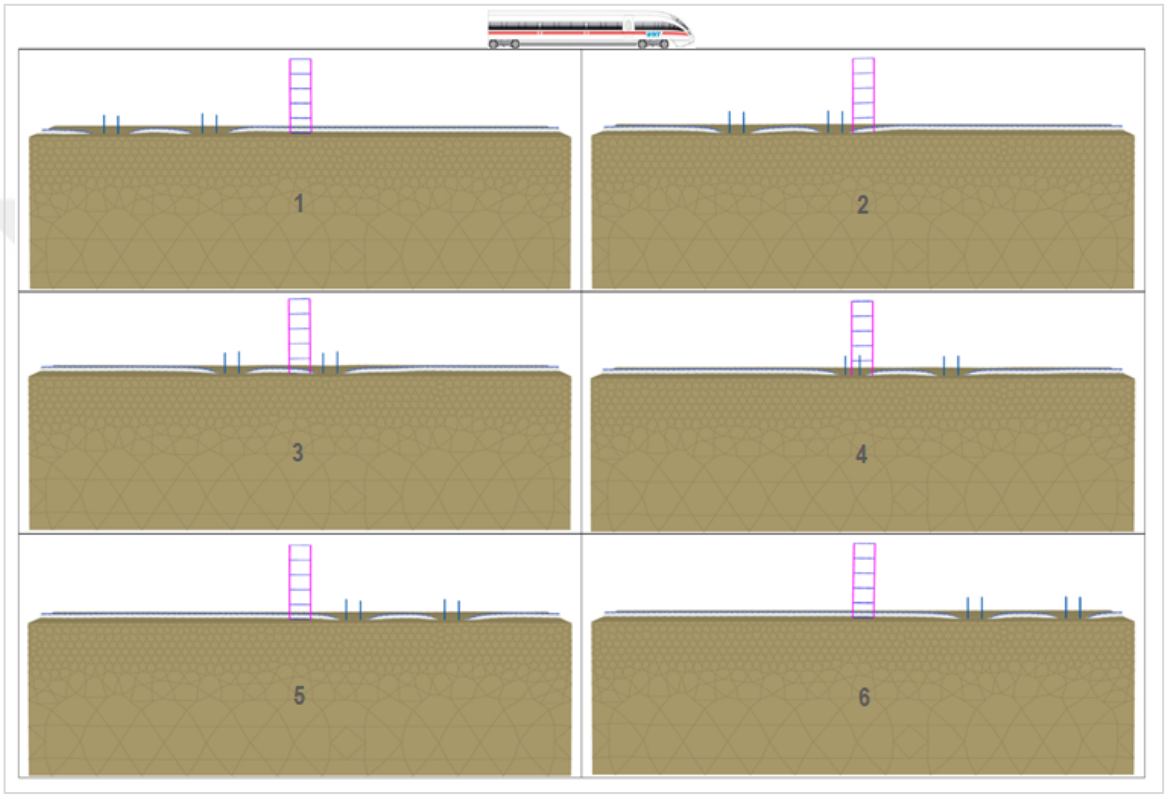
(b)

Şekil 5.26 : Demiryolu-yapı-zemin modelinin 2D ve 3D geometrik gösterimi.

Hızlı trenin neden olduğu titreşim hareketlerinin üstyapıda nasıl etkiler yaratacağını değerlendirebilmek amacıyla, yapı ile zemin arasındaki ortak davranışı doğrudan dikkate alan sonlu eleman modeli kullanılarak farklı tip zeminler için sayısal analizler yapılmıştır. Zemin özellikleri olarak; gevşek kum, sıkı kum ve kaya zemin durumunu temsil eden üç tip zemin gurubuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, yüksek hızlı trenin hızı 250 km/h olarak alınmıştır. Şekil 5.27, yüksek hızlı trenin gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla geçişinden dolayı simüle edilmiş yapı-zemin modelinde oluşan deformasyon ve gerilme dağılımını göstermektedir.



(a)

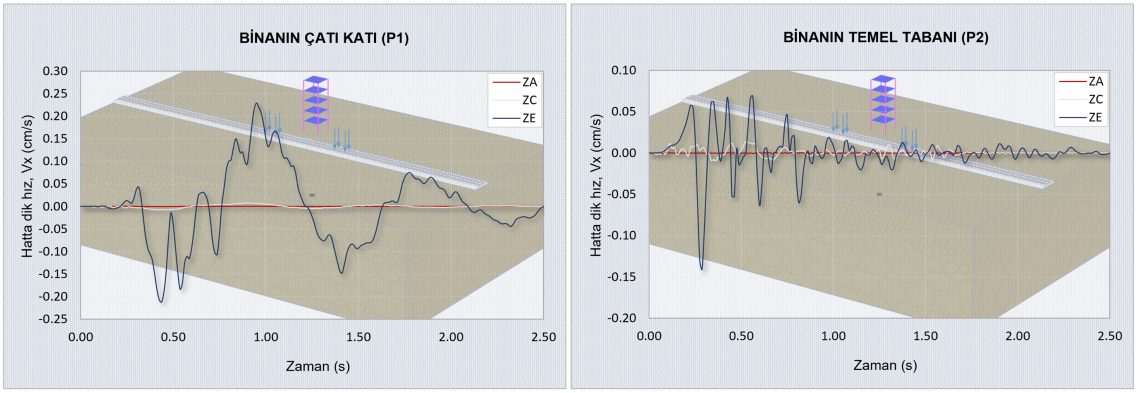


(b)

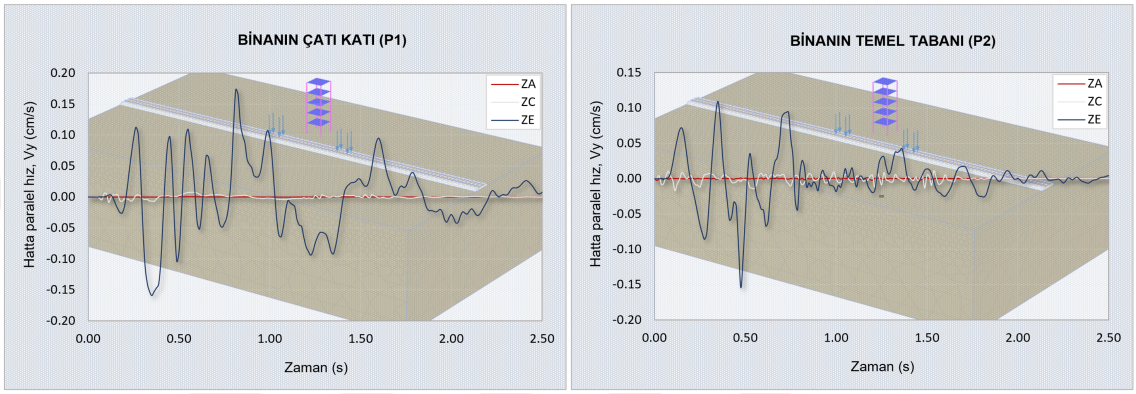
Şekil 5.27 : Gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı yapı-zemin sistemin davranışı (a) gerilme ve (b) deformasyon.

Hız sonuçları

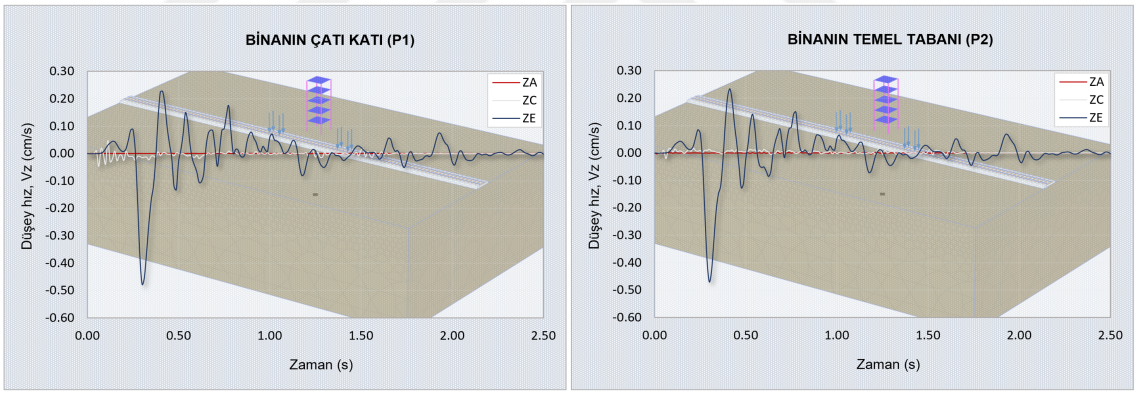
Hızlı demiryolu trafiğinin yapıda oluşturduğu titreşim etkilerini gözlemlemek için PLAXIS 3D yazılımında geliştirilen sonlu eleman modelinin analiz sonuçları hız-zaman ilişkisi açısından hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda farklı zemin türü için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Ayrıca, hız-zaman ilişkilerinden maksimum hız değerleri elde edilerek üç doğrultuda Şekil 5.29'de verilmiştir.



(a)

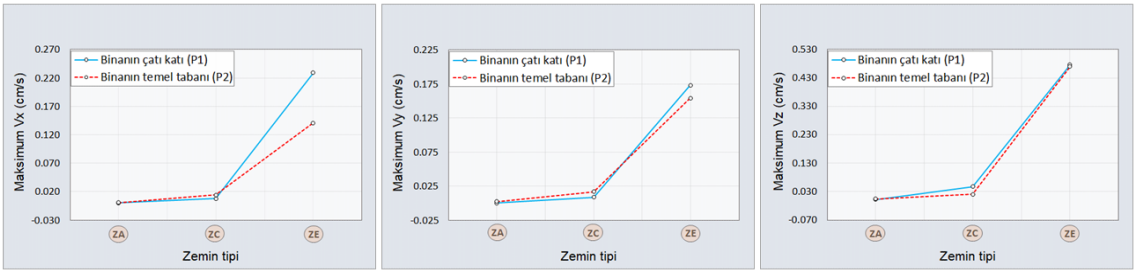


(b)



(c)

Şekil 5.28 : Farklı zemin sınıfı için hız-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.



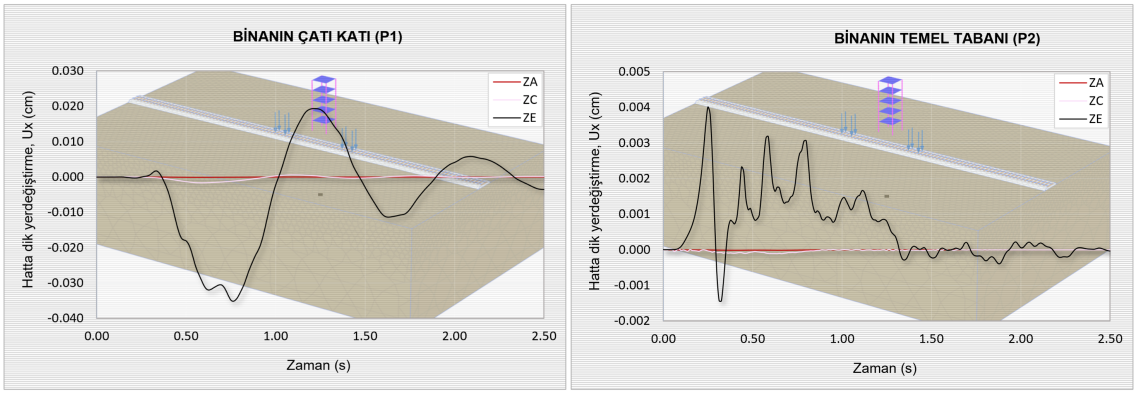
Şekil 5.29 : Beş katlı yapı içerisinde hız değişimi.

Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin hız-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum hız değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 5.28); üstyapı tepe ve temel noktalarının en büyük hız değerleri, gevşek zemin durumunda gözlenmektedir. Yani zemin rijitliği azaldıkça, dalga yayılımının her üç doğrultusunda da hız değerlerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum hız değeri, sıkı ve kaya zeminlerden sırasıyla %96,53 ve %99,86 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum hız değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden yaklaşık olarak %94,84 ve %99,87 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum hız değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden sırasıyla %89,94 ve %99,55 civarında daha büyük olduğu görülmektedir.

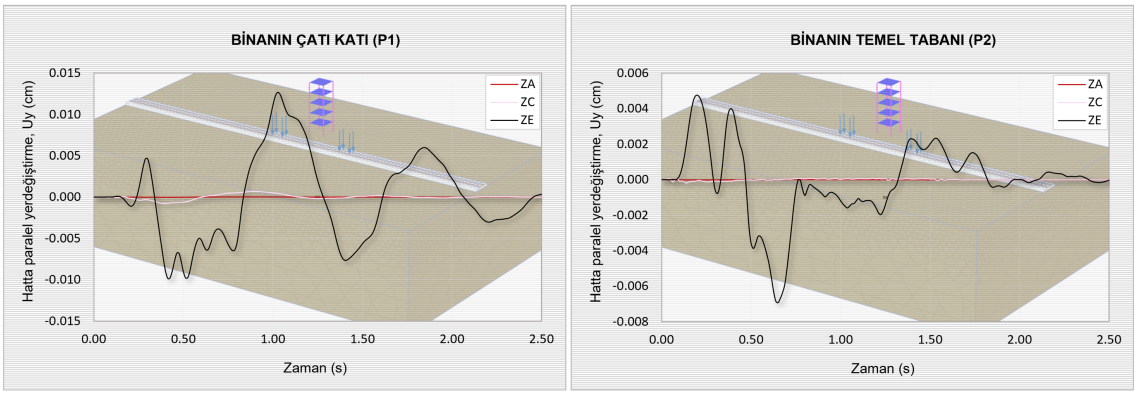
Grafik 5.29 incelendiğinde, titreşimlere ait hız değerlerinde, yapısal anlamda yumuşak zeminlerde hız değerlerinde büyük bir artış görülmüştür. Ayrıca yapı tepe noktasında ölçülen hız değerlerinde de temel kotuna göre bir büyüme gözlemlenmiştir.

Yerdeğiştirme sonuçları

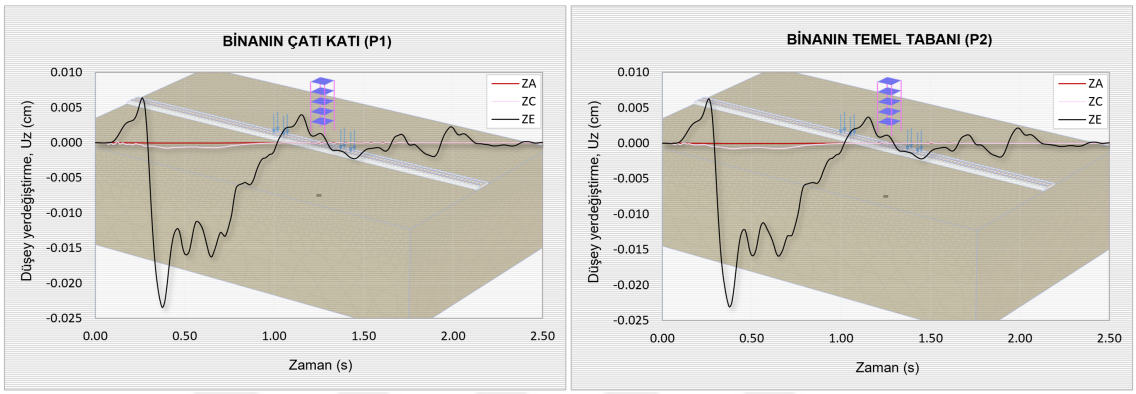
Yapılan nümerik analizler sonucunda, ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi yapıda ve binanın yüksekliğine bağlı olarak her bir zemin sınıfı için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.30'de verilmiştir. Ayrıca, yerdeğiştirme-zaman ilişkilerinden maksimum yerdeğiştirmeleri elde edilerek üç doğrultuda Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



(a)

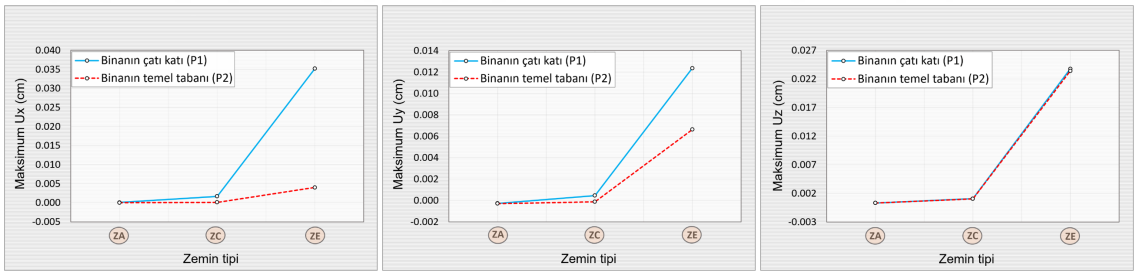


(b)



(c)

Şekil 5.30 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.



Şekil 5.31 : Beş katlı yapı içerisinde yerdeğiştirmenin değişimi.

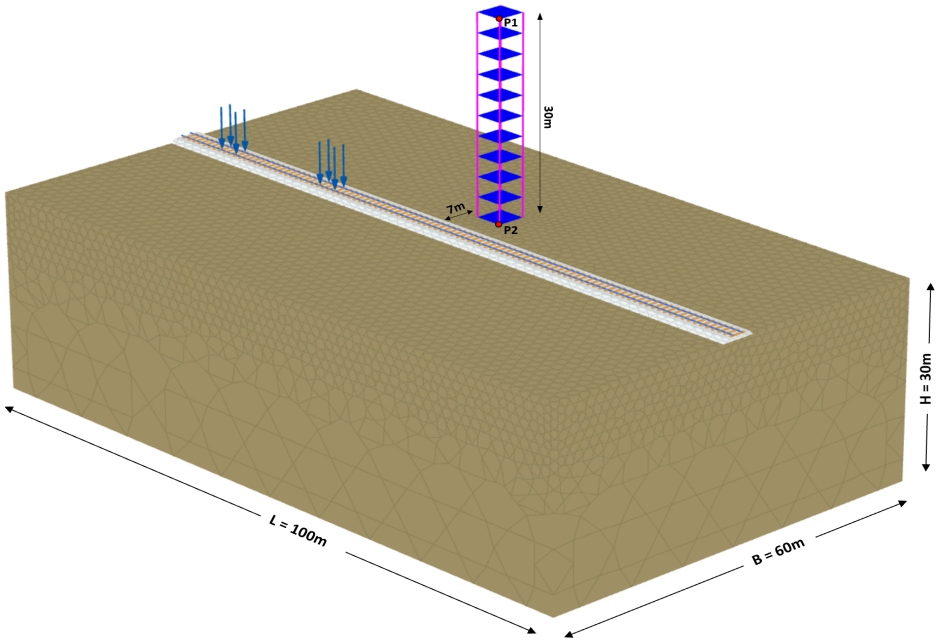
Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum yerdeğiştirmelerinin değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 5.30-5.31); üstyapı tepe noktasının maksimum yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin durumunda gözlenmektedir. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı ve kaya zeminlerden sırasıyla %95,24 ve %99,82 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden yaklaşık olarak %94,03 ve %99,80

civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden sırasıyla %96,72 ve %99,88 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak; zemin rijitliği azaldıkça, yerdeğiştirme değerlerinde dalga yayılımının her üç doğrultusunda da yerdeğiştirmelerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür.

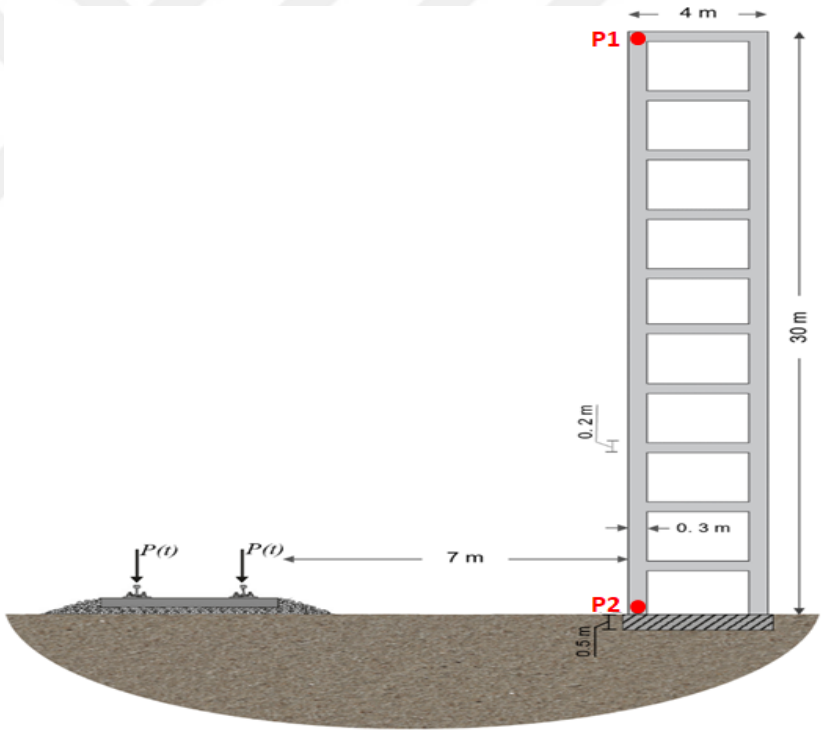
Şekil 5.31 incelendiğinde, bina tepe noktası (P1) maksimum yerdeğiştirme değerlerinin bina temel (P2) yerdeğiştirme değerlerine göre farklı zemin koşullarına bağlı olarak her üç doğrultuda büyüdüğü görülmüştür. Bina tepe noktasının hatta dik maksimum yerdeğiştirme değerleri; kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %87, %93,5 ve %89 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Hatta paralel durumu için ise bina tepe noktasının maksimum yerdeğiştirme değerleri; kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %76,5, %76 ve %45 artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda bina tepe noktasının maksimum yerdeğiştirme değerleri, kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %9, %2 ve %1,5 civarında daha büyük olduğu görülmektedir.

5.2.3.3. On katlı yapı için dinamik analiz sonuçları

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında, hızlı tren ile titreşen on katlı ve periyodu 1.3 saniye olan yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Tren dalgalarının üstyapı yüksekliği boyunca meydana getirdiği hız ve yerdeğiştirmelerin, bina yüksekliğine göre değişimi yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak, farklı zemin tiplerine göre karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde, gözlem noktaları olarak binanın çatı katı düzeyi (P1 noktası) ve binanın temel tabanı (P2 noktası) belirlenmiştir (Şekil 5.32).



(a)

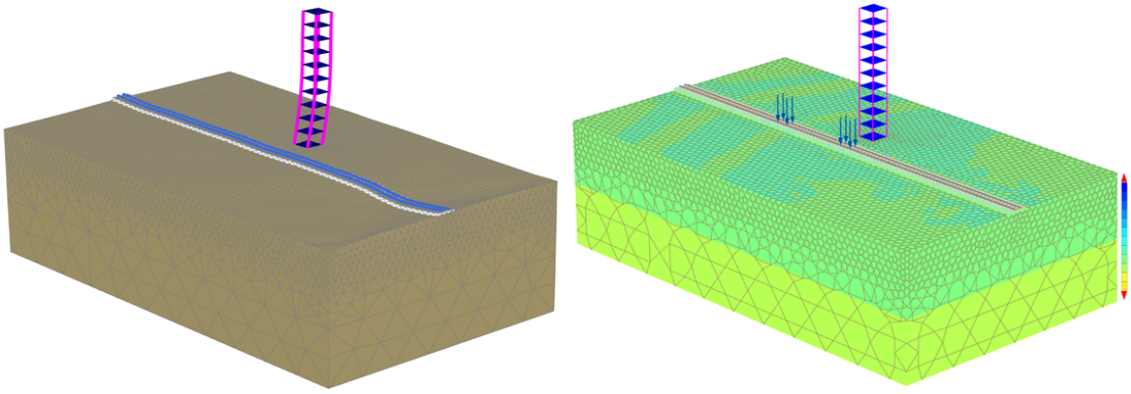


(b)

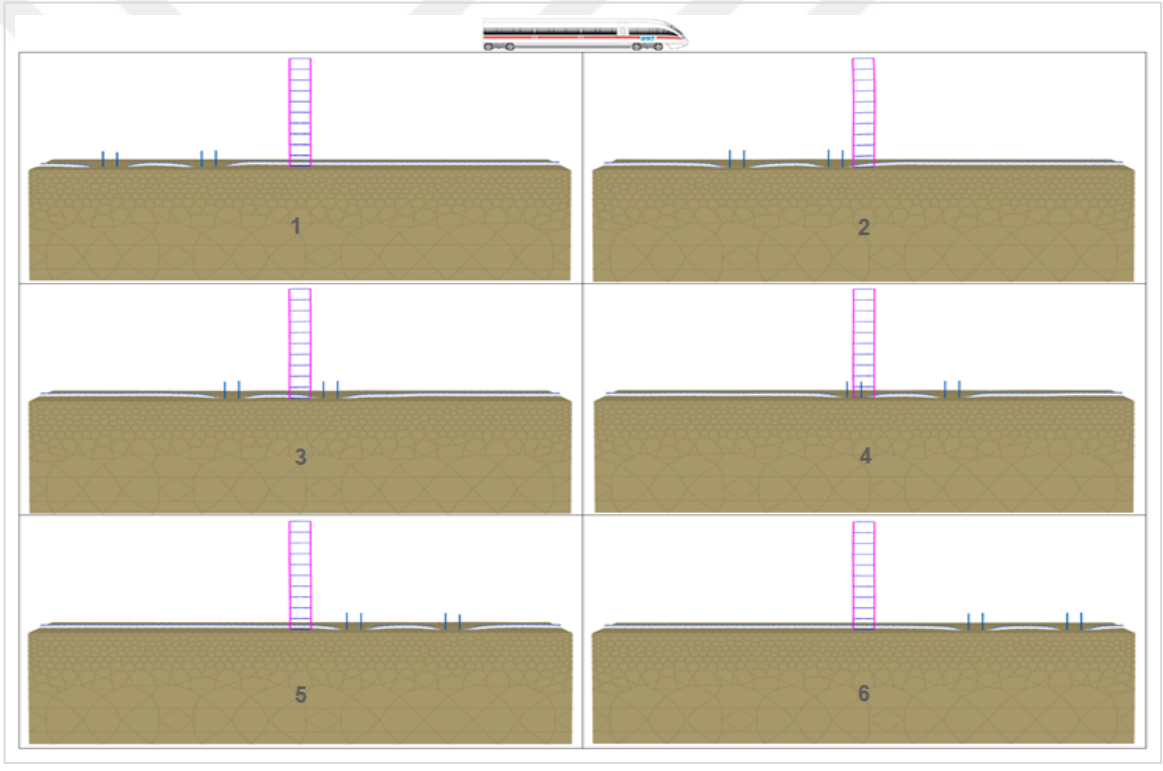
Şekil 5.32 : Demiryolu-yapı-zemin modelinin 2D ve 3D geometrik gösterimi.

Hızlı trenin sebep olduğu titreşim hareketlerinin üstyapı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, yapı ile zeminin ortak davranışını doğrudan dikkate alan sonlu eleman modeli kullanılarak, çeşitli zemin tipleri için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Zemin özellikleri olarak; gevşek kum, sıkı kum ve kaya zemin durumunu temsil eden üç tip zemin gurubuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bu

çalışmada, yüksek hızlı trenin hızı 250 km/h olarak alınmıştır. Şekil 5.33, yüksek hızlı trenin gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla geçişinden dolayı simüle edilmiş yapı-zemin modelinde oluşan deformasyon ve gerilme dağılımını göstermektedir.



(a)



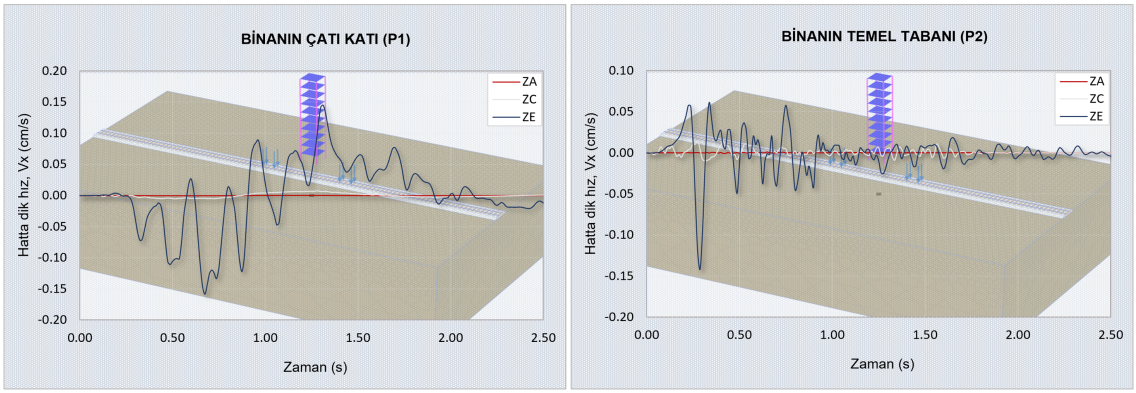
(b)

Şekil 5.33 : Gevşek zemin üzerinde 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı yapı-zemin sistemin davranışı (a) gerilme ve (b) deformasyon.

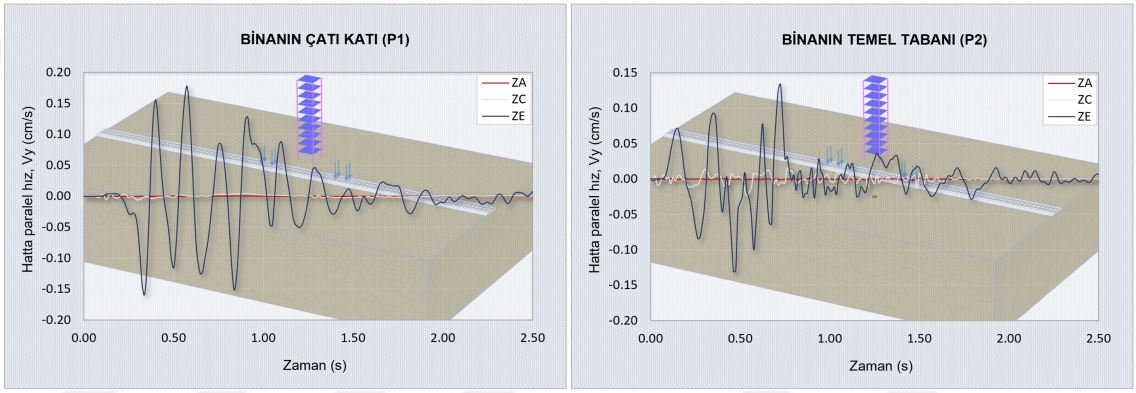
Hız sonuçları

Hızlı demiryolu trafiğinin yapıda oluşturduğu titreşim etkilerini gözlemlemek için PLAXIS 3D yazılımında geliştirilen sonlu eleman modelinin analiz sonuçları hız-zaman ilişkisi açısından hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda farklı zemin türü için

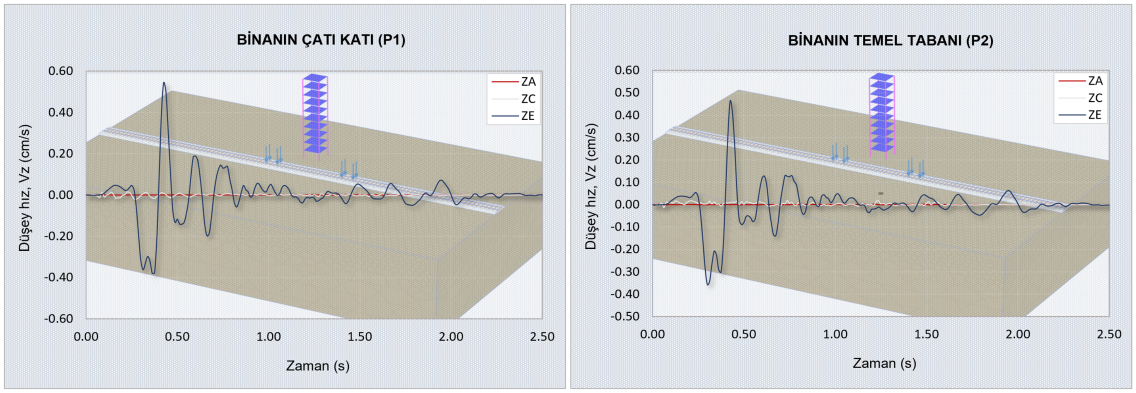
karşılaştırmalı olarak Şekil 5.34'te verilmiştir. Ayrıca, hız-zaman ilişkilerinden maksimum hız değerleri elde edilerek üç doğrultuda Şekil 5.35'te gösterilmiştir.



(a)

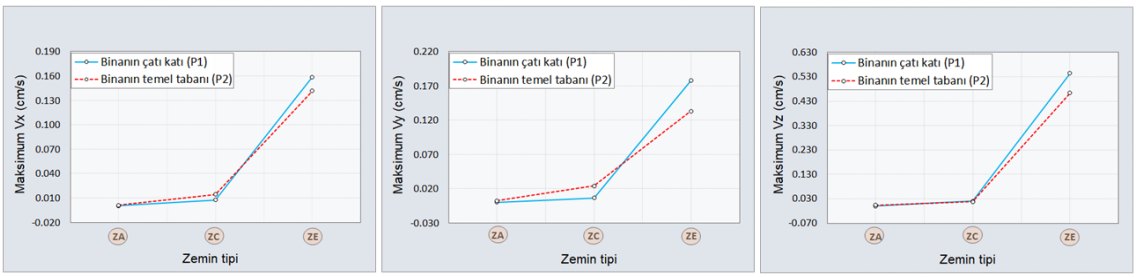


(b)



(c)

Şekil 5.34 : Farklı zemin sınıfı için hız-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.



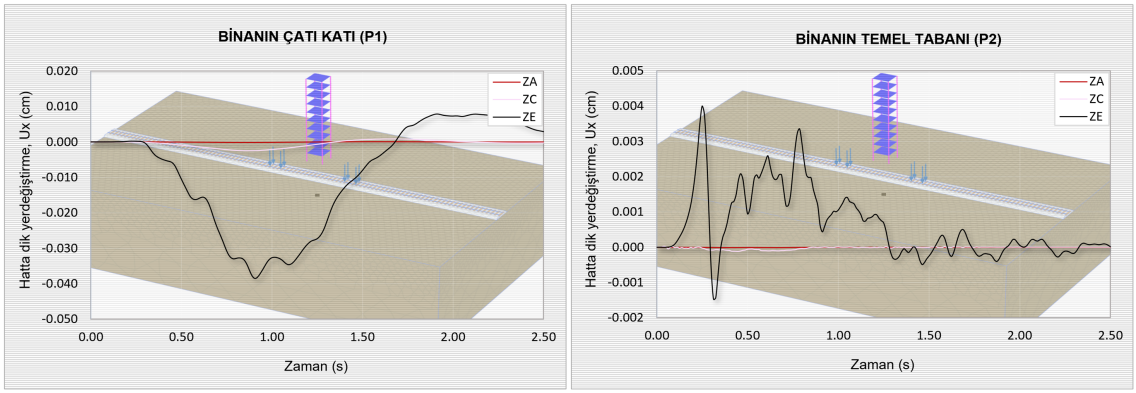
Şekil 5.35 : On katlı yapı içerisinde hız değişimi.

Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin hız-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum hız değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 5.34); üstyapı tepe ve temel noktalarının en büyük hız değerleri, gevşek zemin durumunda gözlenmektedir. Yani zemin rijitliği azaldıkça, dalga yayılımının her üç doğrultusunda da hız değerlerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum hız değeri, sıkı ve kaya zeminlerden sırasıyla %95,30 ve %99,82 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum hız değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden yaklaşık olarak %96,32 ve %99,91 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum hız değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden sırasıyla %96,21 ve %99,80 civarında daha büyük olduğu görülmektedir.

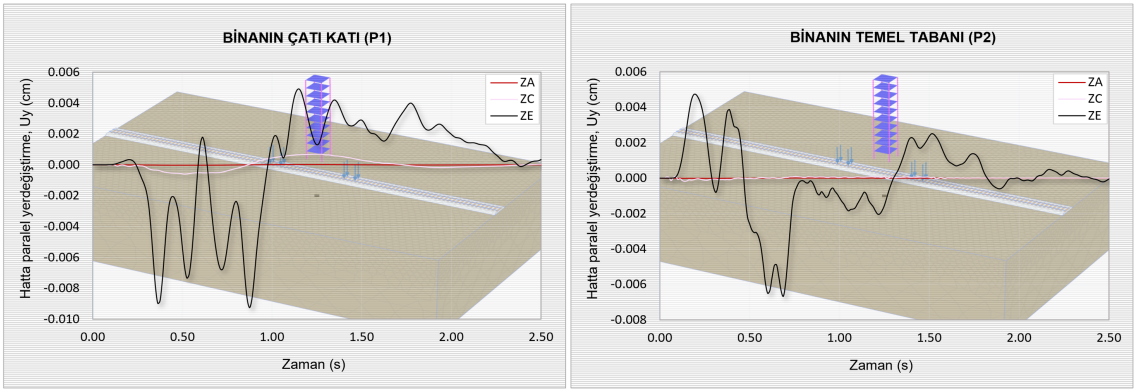
Şekil 5.35 incelendiğinde, titreşimlere ait hız değerlerinde, yapısal anlamda yumuşak zeminlerde hız değerlerinde büyük bir artış görülmüştür. Ayrıca yapı tepe noktasında ölçülen hız değerlerinde de temel kotuna göre bir büyüme gözlemlenmiştir.

Yerdeğiştirme sonuçları

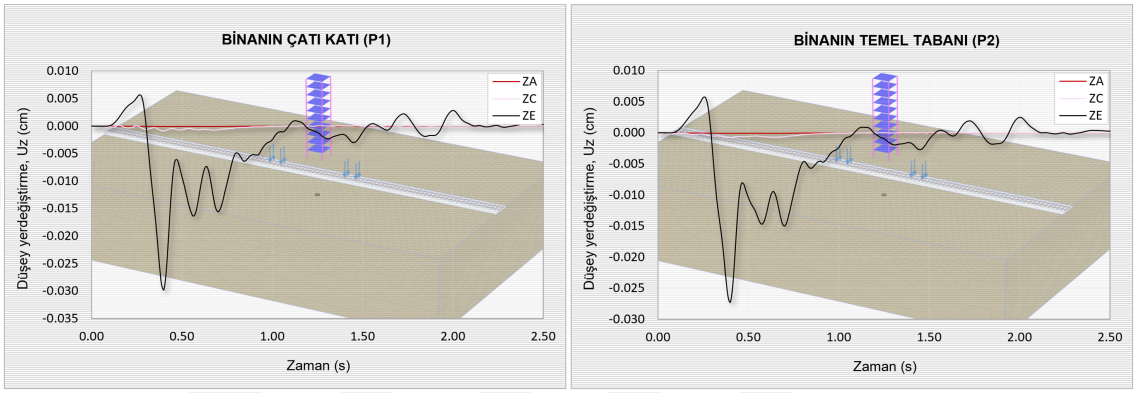
Yapılan nümerik analizler sonucunda, ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi yapıda ve binanın yüksekliğine bağlı olarak her bir zemin sınıfı için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.36'da verilmiştir. Ayrıca, yerdeğiştirme-zaman ilişkilerinden maksimum yerdeğiştirmeleri elde edilerek üç doğrultuda Şekil 5.37'de gösterilmiştir.



(a)

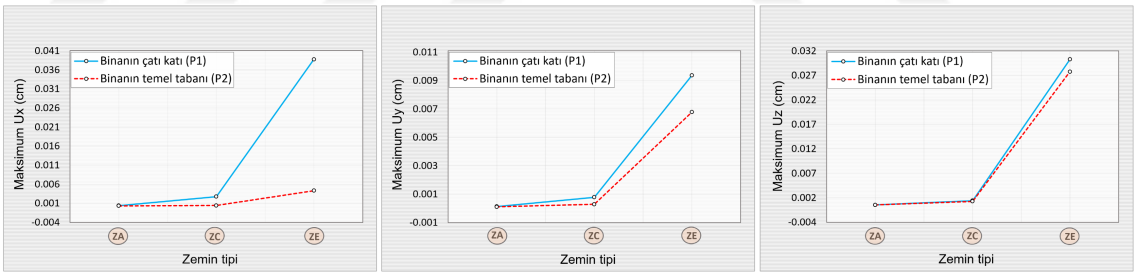


(b)



(c)

Şekil 5.36 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.



Şekil 5.37 : On katlı yapı içerisinde yerdeğiştirmenin değişimi.

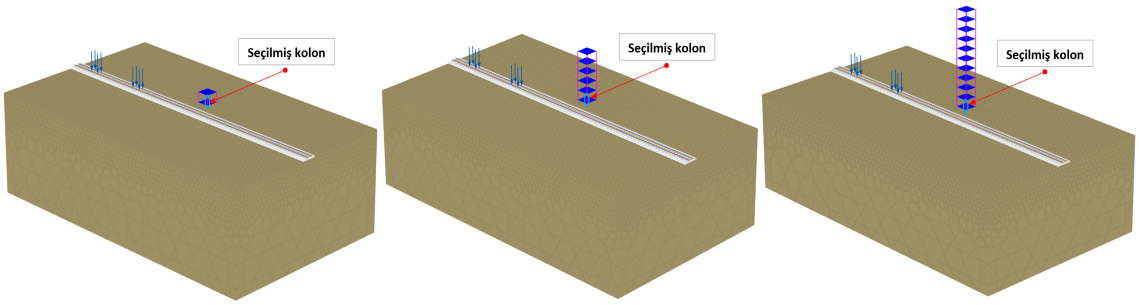
Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum yerdeğiştirmelerinin değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 5.36-5.37); üstyapı tepe noktasının maksimum yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin durumunda gözlenmektedir. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı ve kaya zeminlerden sırasıyla %93,66 ve %99,76 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden yaklaşık olarak %92,69 ve %99,69

civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum yerdeğiştirme değeri, sıkı kum ve kaya zeminlerden sırasıyla %96,97 ve %99,91 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak; zemin rijitliği azaldıkça, yerdeğiştirme değerlerinde dalga yayılımının her üç doğrultusunda da yerdeğiştirmelerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 5.37 incelendiğinde, bina tepe noktası (P1) maksimum yerdeğiştirme değerlerinin bina temel (P2) yerdeğiştirme değerlerine göre farklı zemin koşullarına bağlı olarak her üç doğrultuda büyüdüğü görülmüştür. Bina tepe noktasının hatta dik maksimum yerdeğiştirme değerleri; kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %91, %95 ve %90 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Hatta paralel durumu için ise bina tepe noktasının maksimum yerdeğiştirme değerleri; kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %79, %73 ve %28 artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda bina tepe noktasının maksimum yerdeğiştirme değerleri, kaya, sıkı ve gevşek zeminlerde bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %4, %15 ve %8 civarında daha büyük olduğu görülmektedir.

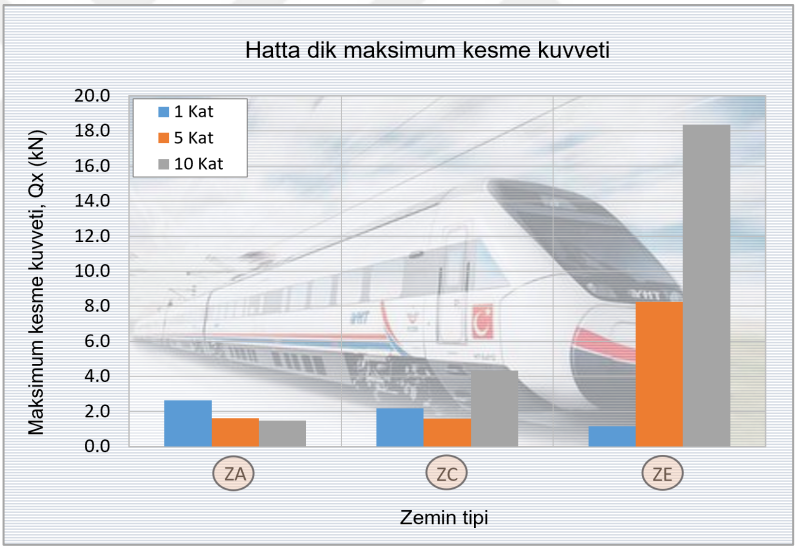
5.2.3.4. Farklı periyotlara sahip yapılar için kesme kuvvet sonuçları

Zemin özelliklerinin yüksek hızlı tren geçişi altındaki yapısal tepki üzerindeki etkisini göstermek için, farklı zemin türleri üzerine kurulmuş çerçeve yapıların tepkisini değerlendirmek için dinamik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, 1, 5 ve 10 katlı üç farklı yapıyı dikkate alınarak, sert (ZA), orta (ZC) ve yumuşak zemin (ZE) koşulları için analiz edilmiştir (Şekil 5.38). Bu çalışmanın amacı, 250 km/h hızla yüksek hızlı trenin geçişinden dolayı binaların çeşitli zemin koşullarındaki dinamik davranışını araştırmaktır. Binaların birinci kat kolonunun maksimum kesme kuvveti tepkileri her iki doğrultuda (hatta dik ve hatta paralel) incelenmiştir.

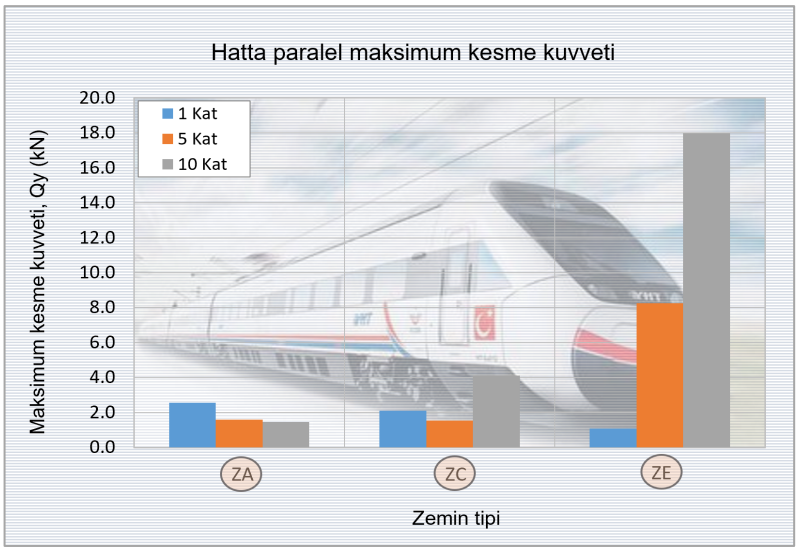


Şekil 5.38 : Yap-zemin sonlu eleman modeli.

Yapılan analizlerin sonuçları diyagramlar halinde özetlenmiş ve Şekil 5.39-5.40'te gösterilmiştir. Bu şekiller, 1, 5 ve 10 katlı binalar için farklı zemin tiplerinin, yüksek hızlı tren geçişi sırasında yapı-zemin sisteminin maksimum kesme kuvveti üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 5.39, kat sayısı arttıkça binaların her iki yöndeki maksimum kesme kuvvetlerinin sert zeminden yumuşak zemine doğru arttığını göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.39 : Farklı yükseklikteki binalar için maksimum kesme kuvvetleri.

Şekil 5.40, bina yüksekliği boyunca çizilen x (hatta dik) ve y (hatta paralel) doğrultularda bınaların maksimum kesme kuvveti değerlerini göstermektedir. Şekilden x yönündeki maksimum kesme kuvvetlerinin y yönünden daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapı yüksekliği arttıkça ve zemin rijitliği azaldıkça, maksimum kesme kuvvet değerlerinde dalga yayılımının her iki doğrultusunda kesme kuvvetlerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.40 : Binaların hatta paralel ve dik doğrultularda maksimum kesme kuvvetleri.

5.2.4. Bina titreşimlerinin dünya standartlarına göre değerlendirilmesi

5.2.4.1. Amerikan yönetmeliğine (FTA 2006) göre titreşim değerlendirmeleri

Tablo 5.7'de, titreşim düzeyi değerlendirmelerinde kullanılan FTA'nın tanımlamalarına göre dönüştürülmüş ölçüm sonuçlarının maksimum değerleri bulunmaktadır.

Tablo 5.7 : FTA değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları.

	1-KATLI YAPI								
Nokta	*Zemin Sınıfı - ZA*								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.0004	0.0007	0.0119	0.0014	0.0028	0.0476	23.0457	28.8842	53.4070
P1	*Zemin Sınıfı - ZE*								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.8770	2.5602	1.4041	3.5081	10.2408	5.6164	90.7635	100.0688	94.8514
	5-KATLI YAPI								
Nokta	*Zemin Sınıfı - ZA*								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.0008	0.0006	0.0053	0.0031	0.0022	0.0210	29.6154	26.8900	46.3123
P1	*Zemin Sınıfı - ZE*								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.5727	0.4328	1.1905	2.2910	1.7313	4.7622	87.0625	84.6295	93.4183
	10-KATLI YAPI								
Nokta	*Zemin Sınıfı - ZA*								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.0007	0.0004	0.0026	0.0028	0.0015	0.0104	28.8856	23.2056	40.2359
P1	*Zemin Sınıfı - ZE*								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.3966	0.4447	1.3625	1.5863	1.7787	5.4500	83.8700	84.8639	94.5900

x: Hatta dik doğrultu | **y**: Hatta paralel doğrultu | **z**: Düşey doğrultu | **P1**: Bina tepe noktası

Tablo 5.7'de belirtilen titreşim parametreleri, Tablo 2.3 ve Tablo 2.5'te gösterilen FTA kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

1-Katlı yapı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altında kalarak insan sağlığı ve konforuna uygun olduğu tespit edilmiştir.

ZA zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

ZE zemin sınıfı için, titreşim seviyesi insan sağlığı ve konforu bakımından yönetmelikte verilen tüm kategorilerin hepsinin sınır değerini aşmıştır ve bu durumun insan sağlığı ve konforuna uygun olmadığı tespit edilmiştir. Titreşim seviyesi yönetmelikte kategori üç için verilen 85 VdB'lik eşik değerini en az 5.763 VdB, en en fazla 15.068 VdB aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede yönetmelikte verilen kategorilerin üst sınır değeri 83 VdB'dir. Titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında sınır sınır değerini aşmıştır. Titreşim seviyesi bu değeri en az 7.763 VdB, en fazla 17.068 VdB aşmıştır. Bu titreşim seviyesi yapılar için uygun değildir.

5-Katlı yapı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altında kalarak insan sağlığı ve konforuna uygun olduğu tespit edilmiştir.

ZA zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

ZE zemin sınıfı için, titreşim seviyesi insan sağlığı ve konforu bakımından yönetmelikte verilen ilk iki kategorinin sınır değerini aşmıştır ve bu durumun ilk iki kategori için insan sağlığı ve konforuna uygun olmadığı belirlenmiştir. Titreşim seviyesi yönetmelikte kategori üç için verilen 85 VdB'lik eşik değerini en az 2.062 VdB, en en fazla 8.418 VdB aşmıştır.

Tren hattına paralel doğrultuda titreşim seviyesi kategori üçte verilen binalar (gündüz kullanılan kamusal araziler) için uygundur.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede yönetmelikte verilen kategorilerin üst sınır değeri 83 VdB'dir. Titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında sınır sınır değerini aşmıştır. Titreşim seviyesi bu değeri en az 1.629 VdB, en fazla 10.418 VdB aşmıştır. Bu titreşim seviyesi tüm yapılar için uygun değildir.

10-Katlı yapı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altında kalarak insan sağlığı ve konforuna uygun olduğu tespit edilmiştir.

ZA zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

ZE zemin sınıfı için titreşim seviyesi, insan sağlığı ve konforu bakımından yönetmelikte verilen ilk iki kategorinin sınır değerini aşmıştır ve bu durumun ilk iki kategori için insan sağlığı ve konforuna uygun olmadığı belirlenmiştir. Tren hattına dik ve paralel doğrultuda titreşim seviyesi kategori üçte verilen binalar (gündüz kullanılan kamusal araziler) için uygundur ancak titreşim düzeyi sınır değere oldukça yaklaşmıştır. Yönetmelikte kategori iki için verilen 80 VdB'lik eşik değeri tren hattına dik doğrultuda 3.869 VdB, tren hattına paralel doğrultuda 4.863 VdB aşılmıştır. Titreşim seviyesi yönetmelikte kategori üç için verilen 85 VdB'lik eşik değerini 9.590 VdB aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede yönetmelikte verilen kategorilerin üst sınır değeri 83 VdB'dir. Titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında sınır sınır değerini aşmıştır. Titreşim seviyesi bu değeri en az 0.869 VdB, en fazla 1.590 VdB aşmıştır. Bu titreşim seviyesi tüm yapılar için uygun değildir.

5.2.4.2. Alman yönetmeliğine (DIN 4150-2/3) göre titreşim değerlendirmeleri

Bina tepe noktası titreşimleri için elde edilen hız değerleri Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8 : DIN'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları.

1-KATLI YAPI						
	Zemin Sınıfı - ZA					
Nokta	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	0.0014	5.6250	0.0028	30.0000	0.0476	29.6875
	Zemin Sınıfı - ZE					
P1	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	3.5081	5.6250	10.2408	5.9375	5.6164	5.6250
5-KATLI YAPI						

	Zemin Sınıfı - ZA					
Nokta	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	0.0031	15.0000	0.0022	15.3125	0.0210	15.0000
	Zemin Sınıfı - ZE					
P1	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	2.2910	6.2500	1.7313	6.8750	4.7622	7.1875
10-KATLI YAPI						
	Zemin Sınıfı - ZA					
Nokta	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	0.0028	0.9375	0.0015	39.6875	0.0104	15.0000
	Zemin Sınıfı - ZE					
P1	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	1.5863	5.6250	1.7787	5.6250	5.4500	6.5625

x: Hatta dik doğrultu | **y**: Hatta paralel doğrultu | **z**: Düşey doğrultu | **P1**: Bina tepe noktası

Tablo 5.8'de belirtilen nümerik analizlerden elde edilen titreşim sonucları, insan konforu ve yapısal hasar bakımından değerlendirme için Tablo 2.4 ve Tablo 2.6'da gösterilen DIN 4150-2/3 kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

1-Katlı yapı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altında kalarak insan sağlığı ve konforuna uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

ZE zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, yönetmelikte verilen kategorilerden tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi kolayca fark edilir düzeyini 1.308 mm/s, tren hattına paralel doğrultuda kesinlikle farkedilir düzeyini 4.240 mm/s, düşey doğrultuda kolayca fark edilir düzeyini 3.416 mm/s aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede sadece tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi hassas tarihi binalar için uygun değildir. Bu tür yapıların dışındaki yapılar için uygundur.

5-Katlı yapı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altında kalarak insan sağlığı ve konforuna uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

ZE zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, yönetmelikte verilen kategorilerden tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi kolayca fark edilir düzeyini 0.091 mm/s, tren hattına paralel doğrultuda farkedilebilir düzeyini 0.731 mm/s, düşey doğrultuda kolayca fark edilir düzeyini 2.562 mm/s aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

10-Katlı yapı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altında kalarak insan sağlığı ve konforuna uygun olduğu tespit edilmiştir. Yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

ZE zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, yönetmelikte verilen kategorilerden tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi farkedilebilir düzeyini 0.586 mm/s, tren hattına paralel doğrultuda farkedilebilir düzeyini 0.778 mm/s, düşey doğrultuda kolayca fark edilir düzeyini 3.250 mm/s aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerinin altındadır ve tüm yapı kategorileri için uygundur.

BÖLÜM 6. TREN KAYNAKLI YAPISAL TİTREŞİMLERİN İLERİ DÜZEY SAYISAL MODELLEME YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

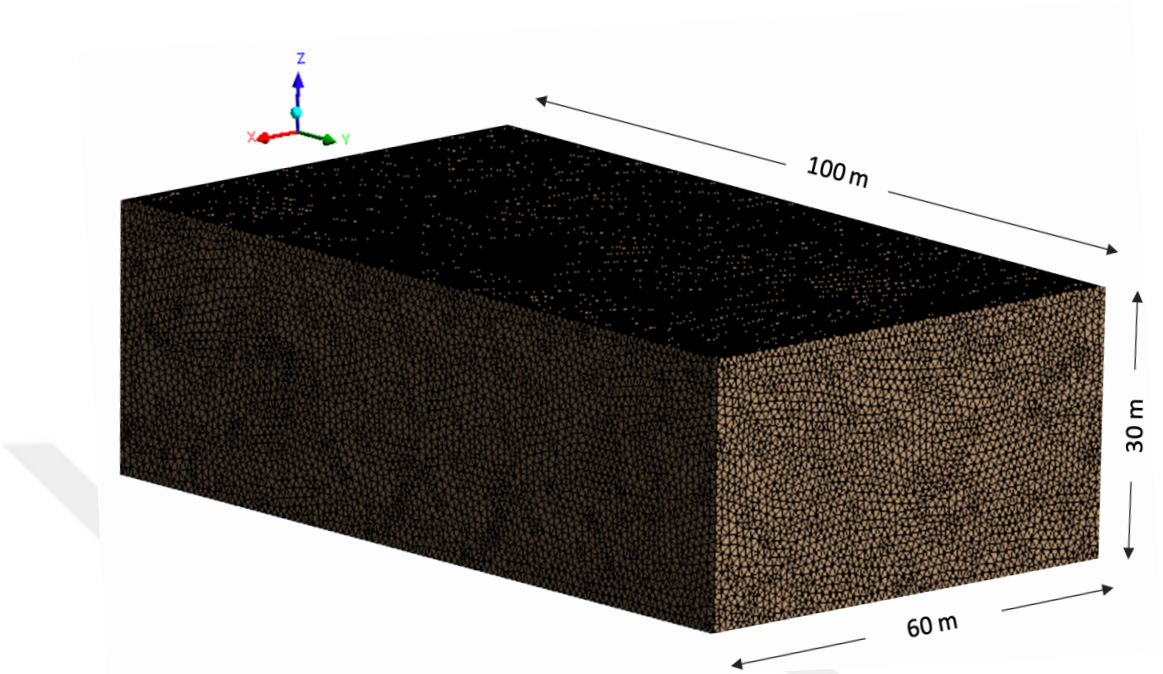
Bu bölüm, ANSYS programını kullanarak kapsamlı bir sayısal analiz ile tren kaynaklı titreşimlerin yakındaki binalar üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan analiz yapılmştır. Ayrıklaştırılan sonlu zemin ortamının boyutları önceki PLAXIS modelinde belirtildiği gibi korunmuştur. ANSYS programında kurulan zemin modeli deney sonuçları ve PLAXIS ile doğrulanmıştır. Ardından doğrulanan zemin modeline çok katlı betonarme bir bina eklenmiştir. Bu araştırma, farklı beton dayanımlarının ve betonarme davranışın etkisini inceleyerek, tren kaynaklı titreşimlerin binalar üzerindeki etkisini daha kapsamlı bir çerçevede değerlendirmeye katkıda bulunmaktadır. Bu analizin sonuçları, yakın çevredeki betonarme yapılarda hızlı tren kaynaklı olası titreşim risklerini daha iyi anlama açısından önemli bir katkı sağlayacaktır.

6.1 Sonlu Eleman Modellemesi

6.1.1 Sonlu eleman modelinin geometrisi ve sınır koşulları

Titreşim alanını simüle etmek için, zemin sisteminin üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve ANSYS 2022 R1 kullanılarak sayısal olarak simüle edilmiştir (Şekil 6.1). Zemin alanının SE modeli, PLAXIS modelindekilerle tutarlı olarak 30 metre yükseklik, 60 metre genişlik ve 100 metre uzunluk boyutlarıyla oluşturulmuştur (bkz. Bölüm 4, Kısım 4.1.6). Bu çalışmada viskoz sınır koşulları uygulanmıştır. Zemin tabanı, sağlam bir şekilde sabitlenmiştir. Çerçeve ve temel birbirine bağlanmıştır. Yapıyı oluşturan betonarme çerçeve ve temel sistemi, 25 cm boyutlarında dörtgen şekilli sonlu elemanlara bölünmüştür. Zemin ortamı herhangi bir düzensizlik olmaması adına boyutları değişkenlik gösteren bir şekilde sonlu elemanlara bölünmüştür. Kullanılan sonlu elamanların kenar uzunlukları, yüzeye yakın bölgede 25 cm iken tabana yakın

bölümde 50 cm'ye ulaşmaktadır. Elemanların boyutları zeminin ortamının yüksekliğine bağlı olarak doğrusal bir şekilde 25 ila 50 cm arasında değişmektedir. Zemin modelinde toplam 1.043.748 tetrahedral eleman ve 1.607.636 düğüm kullanılmıştır.



Şekil 6.1 : Üç boyutlu sonlu eleman modeli

6.1.2 Zemin modelinin malzeme özellikleri

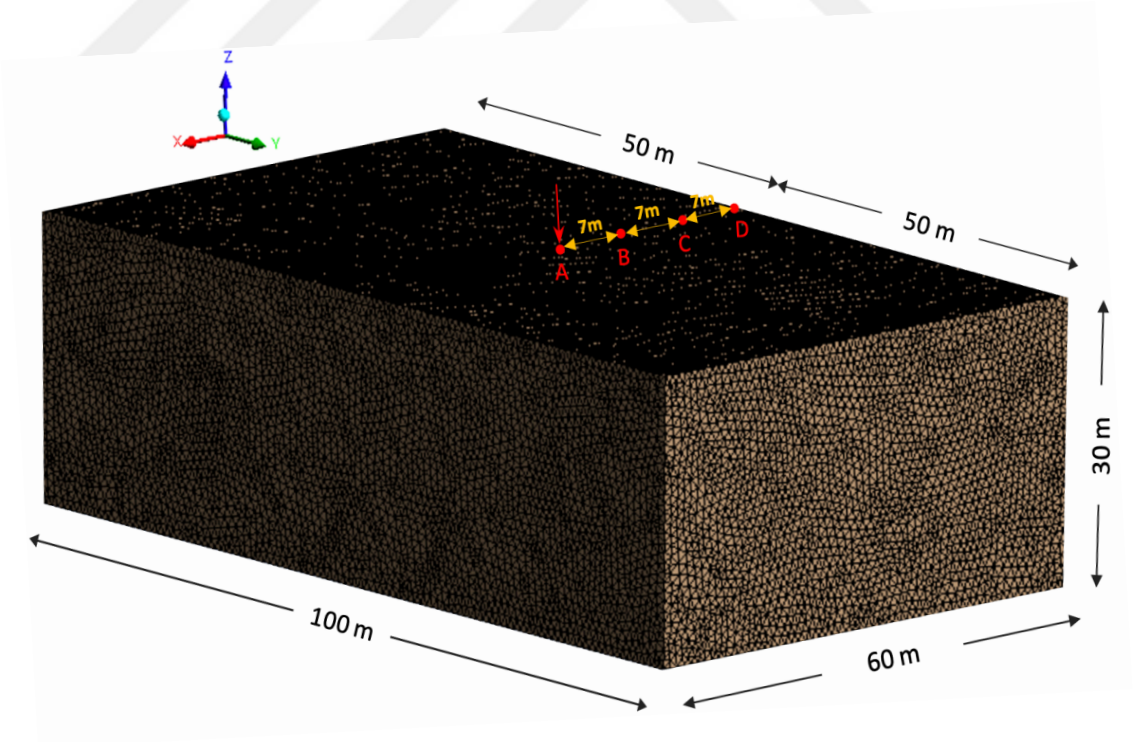
Dalga yayılma problemlerini incelerken uygun bir zemin davranış modelinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Zemin ortamının mekanik özellikleri analiz sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Öncelikle zemin yüzeyini etkileyen ve nispeten küçük zemin deformasyonlarına neden olan tren kaynaklı titreşimler etkilerinde, zemin modelini homojen ve doğrusal olarak elastik olacak şekilde basitleştirmek mümkündür. Bu nedenle zemin ortamı doğrusal elastik olarak seçilmiş ve tek tabakalı olarak modellenmiştir. Daha önce PLAXIS modelinde kullanılan aynı zemin özellikleri ve sönüm parametreleri bu çalışmada da dikkate alınmıştır (Tablo 6.1).

Tablo 6.1 : Sayısal modellemede kullanılan zemin özellikleri

Parametre	Birim	Gevşek Zemin (ZE)
Yoğunluk (γ)	kN/m^3	16.18
Elastisite Modülü (E)	kN/m^2	141×10^3
Poisson Oranı (ν)	-	0.478
Kayma dalgası (V_s)	m/s	170
Kayma Modülü (G)	kN/m^2	47.7×10^3
Rayleigh sönüm katsayısı (α)	-	0.040
Rayleigh sönüm katsayısı (β)	-	1.68×10^{-4}

6.1.3 Sonlu eleman modelinin doğrulanması

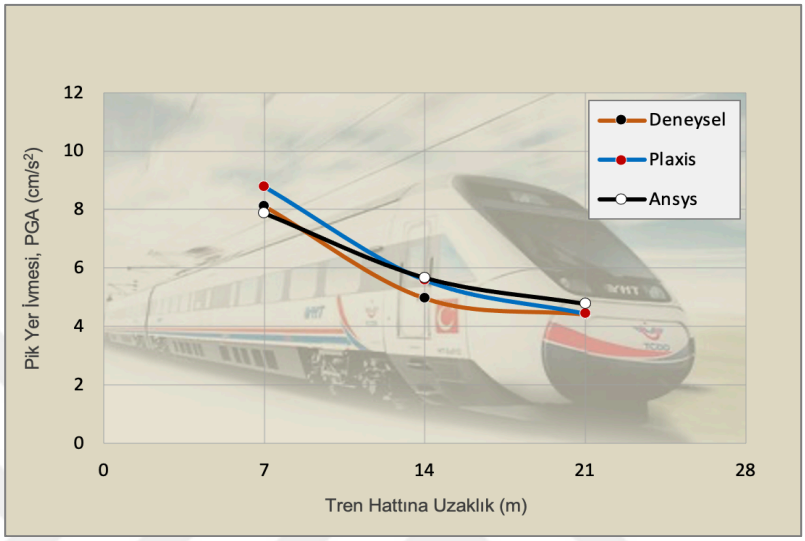
Geliştirilen sonlu eleman modelinin sayısal analizi, Şekil 6.2'de gösterildiği gibi zemin yüzeyinde seçilmiş belirli noktalarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, zemin üzerinde daha önce PLAXIS analizi ile elde edilen A noktası için titreşim kaydı, dinamik etki olarak kullanılmıştır (bkz. Bölüm 4, Bölüm 4.1.7). Daha sonra B, C ve D noktalarında meydana gelen titreşim etkileri elde edilmiş ve modeli doğrulamak için hem PLAXIS verileri hem de deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.



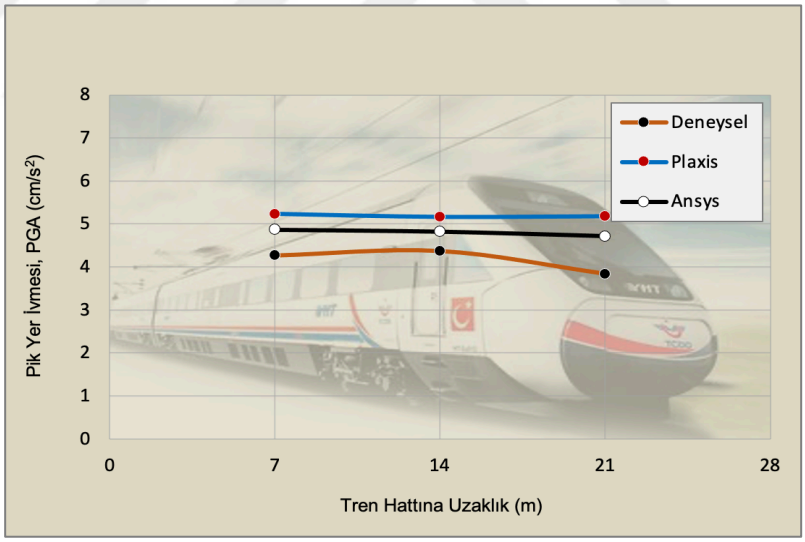
Şekil 6.2 : Geliştirilen sonlu eleman modelinin şematik gösterimi

Şekil 6.3 (a-c), demiryolu hattından çeşitli mesafelerde hesaplanan ve ölçülen maksimum yer ivmeleri (PGA'lar) arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Bu şekiller, yük ekseninden (A noktası) 7, 14 ve 21 metre uzaklıkta bulunan seçilmiş

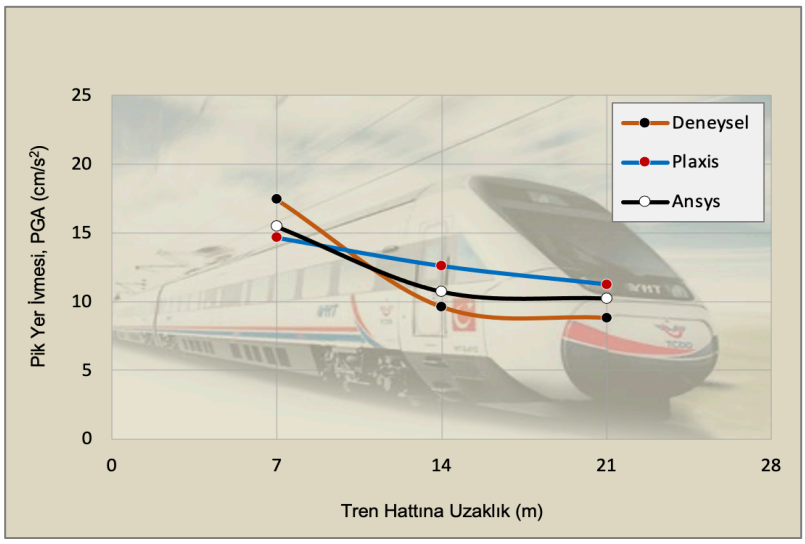
noktalar için ilgili PGA'lara ilişkin bilgi sağlamaktadır. Bu bulgular, seçilen bu konumlardaki ivme değerlerinin mesafeye göre nasıl değiştiğine dair değerli bir anlayış sunmaktadır. ANSYS, PLAXIS ve deneysel tireşim verilerine ait PGA'lar arasında bu şekillerde gözlemlenen tutarlılık, doğrulanmış sonlu elemanlar modelinin tren kaynaklı titreşimleri araştırmak için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



(a)



(b)



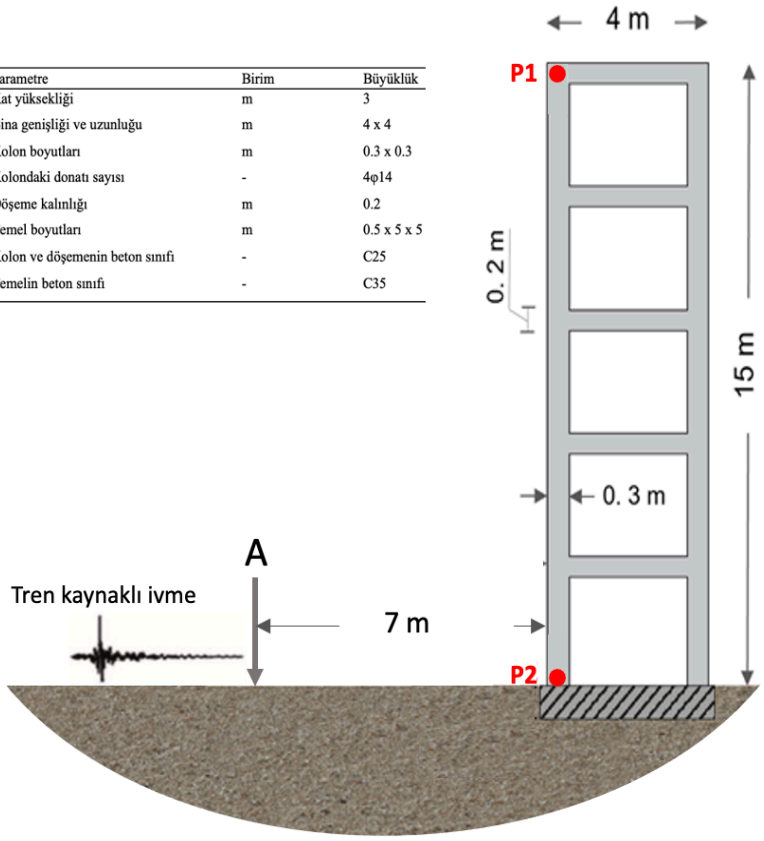
(c)

Şekil 6.3: (a) Demiryolu hattına dik, (b) demiryolu hattına paralel ve (c) düşey doğrultuda zemin yüzeyi ivmelerinin karşılaştırılması

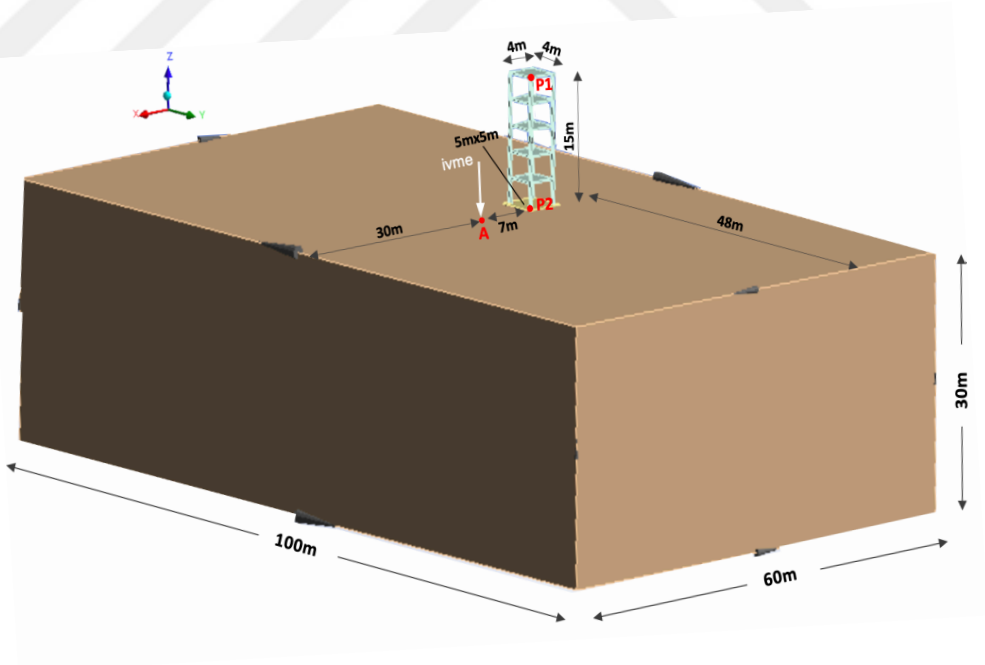
6.1.4. Sayısal analiz için yapı-zemin modeli

Daha önce doğrulanmış zemin modeline entegre edilmiş olan tek açıklıklı bina modeli üzerinde çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Yapı, 15 m yüksekliğe, 5 m uzunluğa ve 5 m genişliğe sahiptir. Demiryolu hattı ile bina arasındaki mesafe 7 m'dir ve beş katlı yapı, 0.5 m kalınlığında güçlendirilmiş beton temel üzerine inşa edilmiştir. Her katın döşeme kalınlığı 0.2 m ve kolon kesitleri 0.3 × 0.3 m'dir. Binanın döşeme, çerçeve kiriş ve kolonları C25 betonundan, bina temeli ise C35 betonundan yapılmıştır. Geliştirilen modelin genel görünümü Şekil 6.4 ve 6.5'te gösterilmiştir.

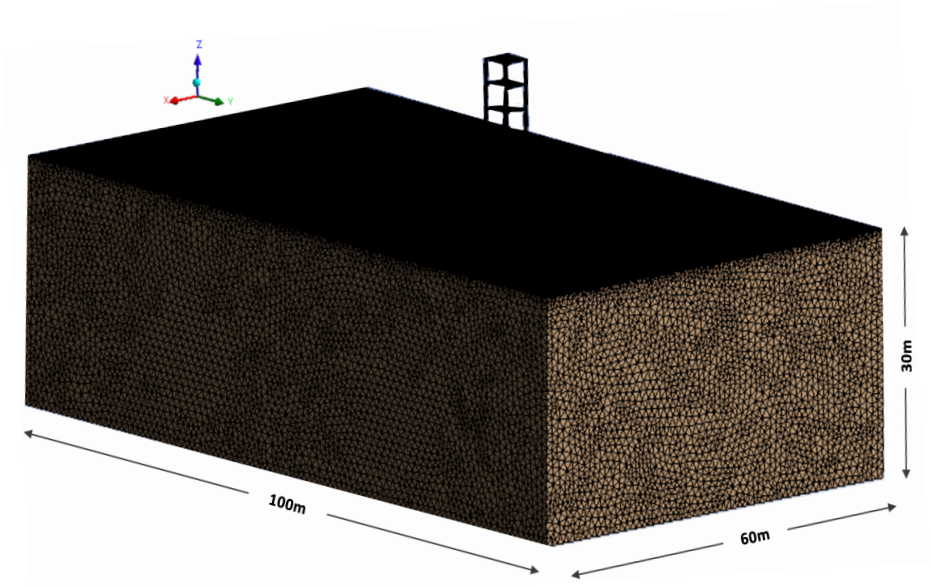
Parametre	Birim	Büyüklük
Kat yüksekliği	m	3
Bina genişliği ve uzunluğu	m	4 x 4
Kolon boyutları	m	0.3 x 0.3
Kolondaki donatı sayısı	-	4φ14
Döşeme kalınlığı	m	0.2
Temel boyutları	m	0.5 x 5 x 5
Kolon ve döşemenin beton sınıfı	-	C25
Temelin beton sınıfı	-	C35



Şekil 6.4: Yapı-zemin sisteminin ve uygulanan yükün şematik görünümü

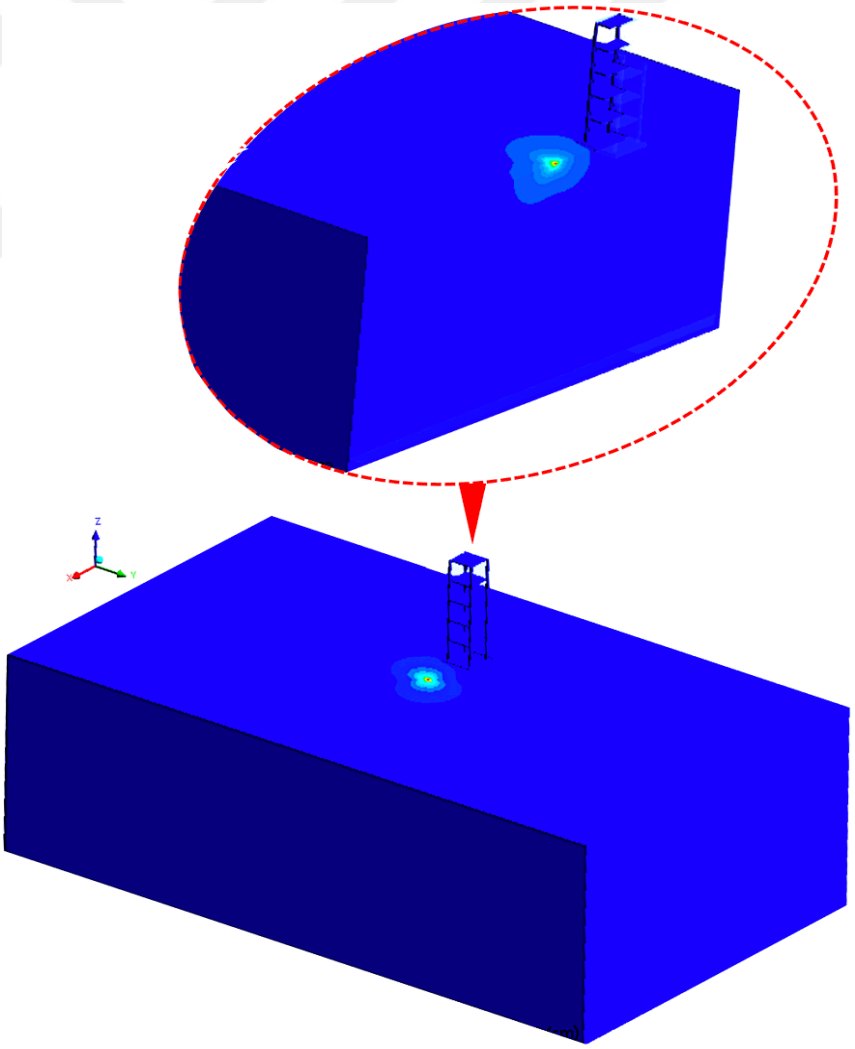


(a)



(b)

Şekil 6.5 : Yapı-zemin sisteminin üç boyutlu sonlu eleman modeli



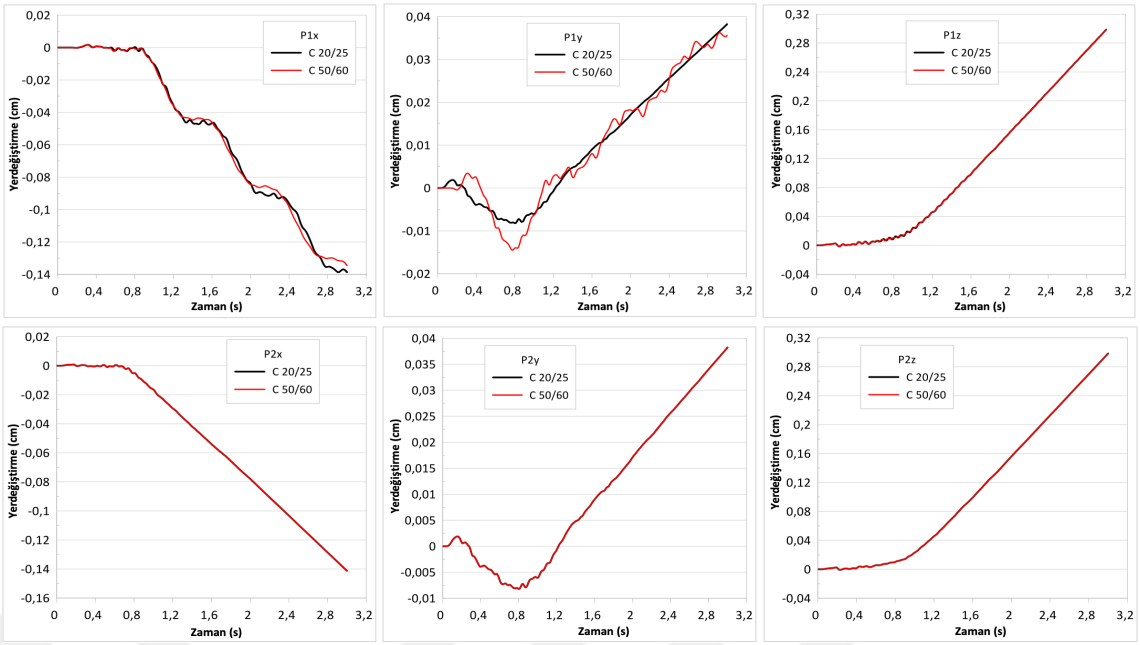
Şekil 6.6 : Dinamik yük altında gerilim dağılımı

6.1.5. Parametrik çalışma ve analiz sonuçları

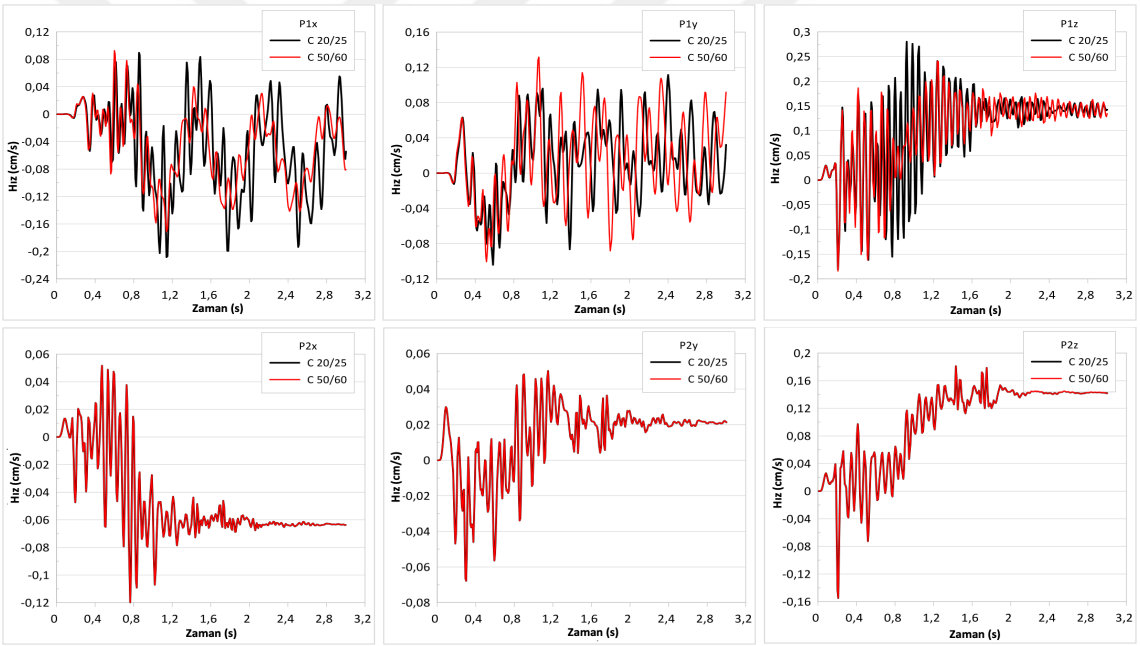
Bu çalışma, demiryolu titreşimlerinin yakındaki betonarme yapılar üzerindeki etkisini değerlendirmek için kapsamlı bir parametrik çalışma yürütmeye odaklanmaktadır. Araştırma, bu faktörlerin dinamik yüklemeye karşı yapısal tepkiyi nasıl etkilediğine dair fikir edinmek için çeşitli beton özelliklerini içermektedir. Binanın farklı kat seviyelerindeki titreşim seviyelerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için dinamik titreşim analizleri yapılmıştır. Çalışma, beton özelliklerindeki değişikliklerin demiryolu titreşimlerinin betonarme yapılar üzerindeki etkilerini nasıl azaltabileceği veya artırabileceği konusunda ayrıntılı bir anlayış sağlamayı amaçlamaktadır.

Beton sınıfının etkisi

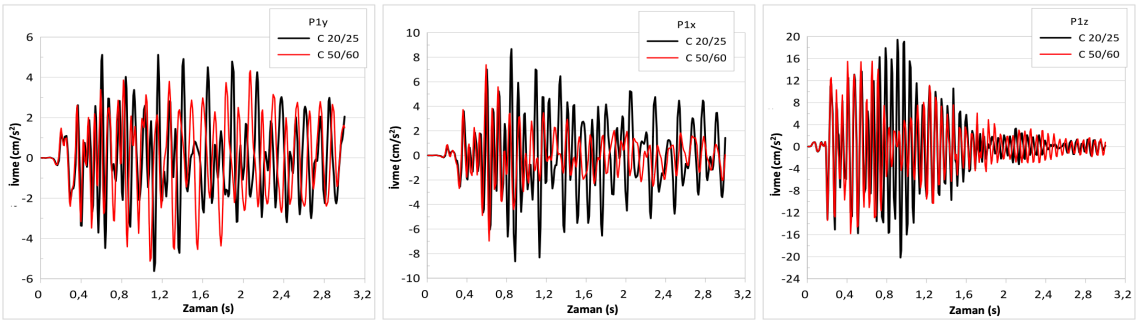
Üstyapının tren kaynaklı titreşime tepkisinin analizinde, ayrıntılı hesaplama ve analiz için iki farklı beton sınıfı (C20/25 ve C50/60) özellikle seçilmiştir. Titreşim analizi, en üst kat (P1) ve zemin kat (P2) için gerçekleştirilmiştir. Bu belirli konumlar, titreşim verilerinin tabandan en üst kata nasıl değiştiğini gözlemlemek için seçilmiştir. Tren kaynaklı bina titreşimlerini değerlendirmek için seçilen noktalarda yerdeğiştirme, hız ve ivme verileri elde edilmiştir. Yerdeğiştirme verileri, yapının harici kuvvetlere nasıl yanıt verdiğini değerlendirmede önemlidir ve herhangi bir potansiyel endişe alanını tanımlamada yardımcı olmaktadır. Hız verileri, titreşimlerin yapının içinde nasıl yayıldığını anlamada yardımcı olurken, ivme verileri bu titreşimlerin büyüklüğü ve yoğunluğuna dair anlayış sunmaktadır. Bu veri setlerinin analizi, tren kaynaklı titreşimler altında beton sınıfının binaya etkisinin kapsamlı bir anlayışını sağlayacaktır. Şekil 6.7 - 6.9, farklı beton sınıflarını dikkate alınarak binadaki yerdeğiştirme, hız ve ivme titreşim seviyelerinin değişim eğrilerini göstermektedir.

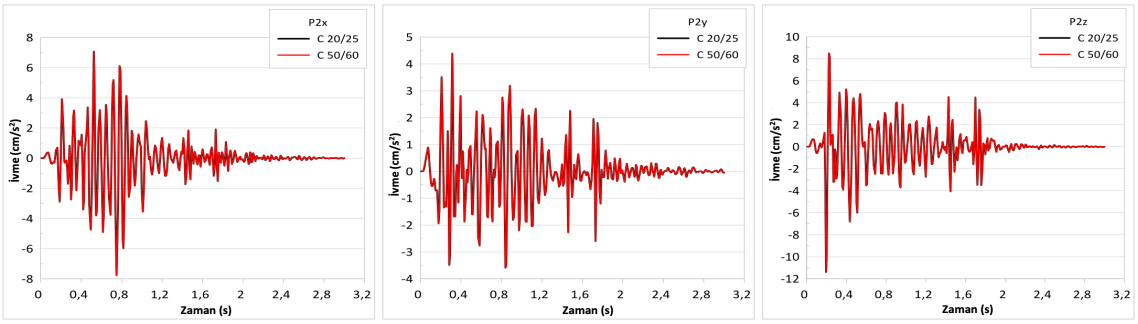


Şekil 6.7 : Üst ve zemin kat için yerdeğiştirme eğrilerinin değişimi



Şekil 6.8 : Üst ve zemin kat için hız eğrilerinin değişimi



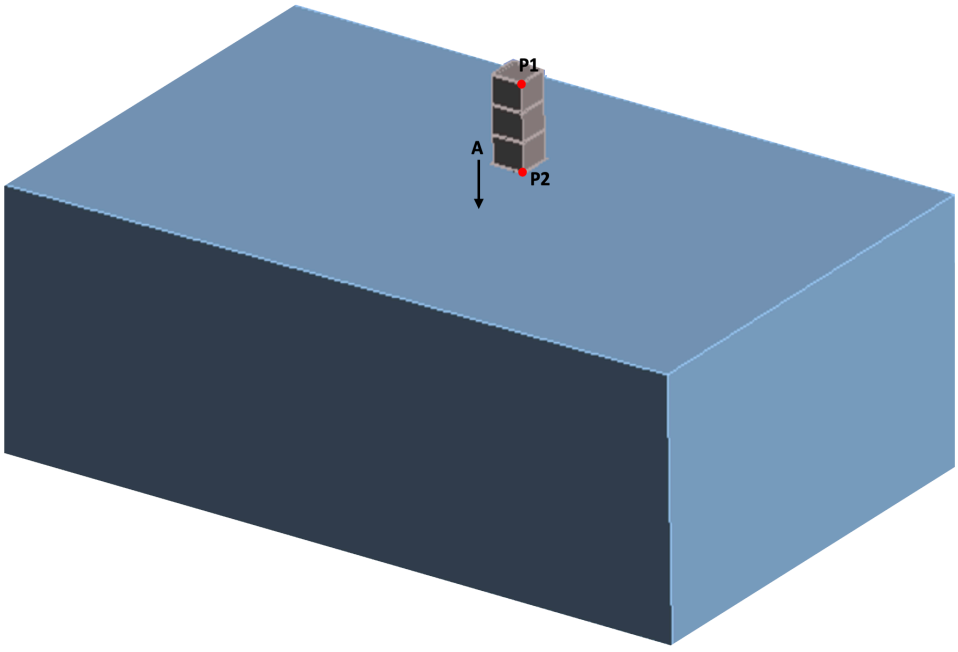


Şekil 6.9 : Üst ve zemin kat için ivme eğrilerinin değişimi

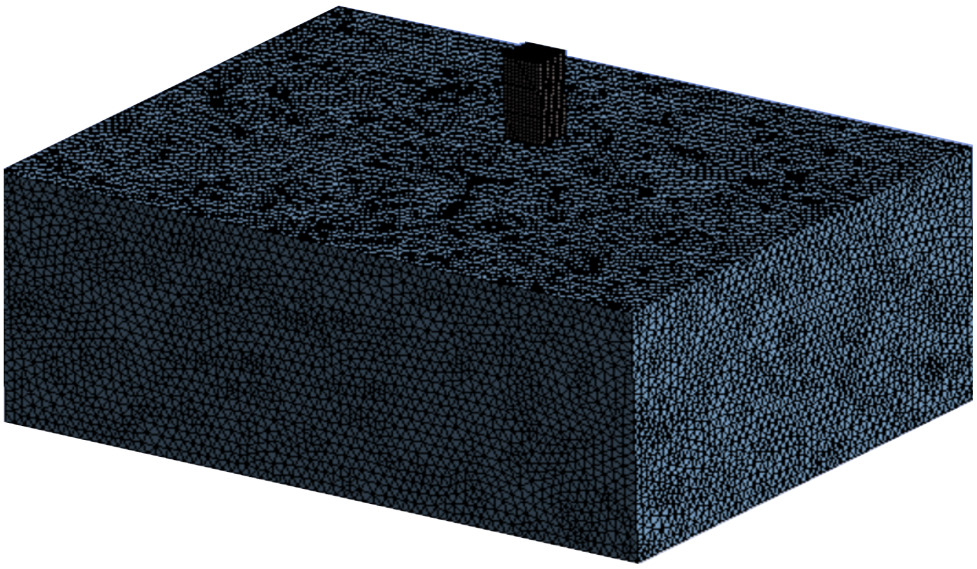
Şekil 6.7 – 6.9'den, seçilen noktalarda farklı beton sınıfları için sonuçların önemli ölçüde değişmediği görülmektedir. Üstyapı rijitliğinin trenlerin oluşturduğu bina titreşimleri üzerinde yeterli etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, tren özellikleri, temel tasarımı, sönümleme mekanizmaları, hatlardan uzaklık ve bina kurallarına uygunluk gibi birçok faktörle desteklenebilir. Bu unsurlar toplu olarak, üst yapı rijitliğinin binadaki tren kaynaklı titreşimler üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğu sonucunu desteklemektedir.

Sonuç olarak, düşük seviyeli genlikli yüklerin dağıldığı bir zemin ortamında, binanın şekil değişiminin önemsiz olduğu ve minimal etkiye yol açtığı sonucuna varılmıştır. Bu dinamik etkiler daha çok insan konforu ile ilgilidir ve yapısal hasardan ziyade bu etkiler ön plandadır. PLAXIS programındaki modelleme sürecinin basitleştirilmesine rağmen, böyle belirli zemin ortamı içinde düşük seviyeli genlik yükleri altında gerçekleştirilen analizlerde, basit bir yapı modelinin bile yeterli ve etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu nedenle, bu seviyedeki yüklere maruz kalan binalar için kapsamlı bir doğrusal olmayan modelleme yaklaşımı ve detaylı bir üst yapı modeli gerekli olmayabilir ve PLAXIS sonlu eleman yazılımdaki basit yapı modeli yeterli olabilir.

Bu çalışmada, mevcut betonarme çerçeve yapısı, yeni bir yığma binayla değiştirilmiştir (Şekil 6.10). Birincil amaç, yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimlerin düşük rijitliğe sahip bir bina üzerindeki etkisini araştırmaktır. Yığma yapı, her katın yüksekliği 3.3 m olan üç kattan oluşmaktadır. Binanın boyutları 4.5 m uzunluk ve genişliği içermektedir. Bina, 42 cm kalınlığındaki tuğla duvar ve 21 cm kalınlığındaki betonarme döşeme ile inşa edilmiştir. Betonarme temelin boyutları 1m x 5m x 5m'dir. Bu çalışmada, daha önce PLAXIS analizler ile elde edilen A noktası için zemin üzerinde titreşim kaydı (bkz. Bölüm 4, Bölüm 4.1.7) dinamik etki olarak kullanılmıştır. Sayısal analizlerinde, zemin ortamının üstyapının dinamik davranışına etkisini daha iyi ortaya koyabilmek amacıyla zemin özellikleri olarak; gevşek kum (ZE) ve kaya zemin (ZA) durumunu temsil eden iki tip zemin gurubuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Şekil 6.10-6.11, yüksek hızlı tren geçişine bağlı olarak simüle edilen yapı-zemin modelini ve oluşan gerilme dağılımını göstermektedir.

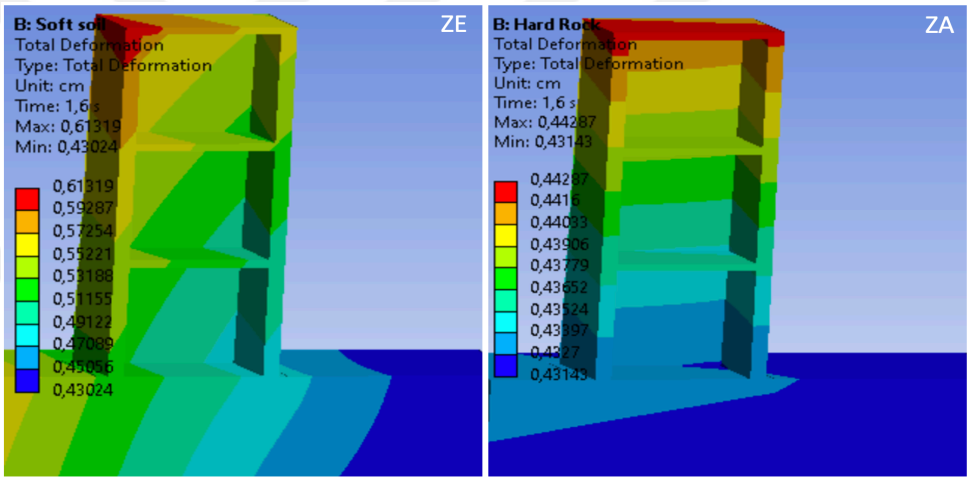


(a)

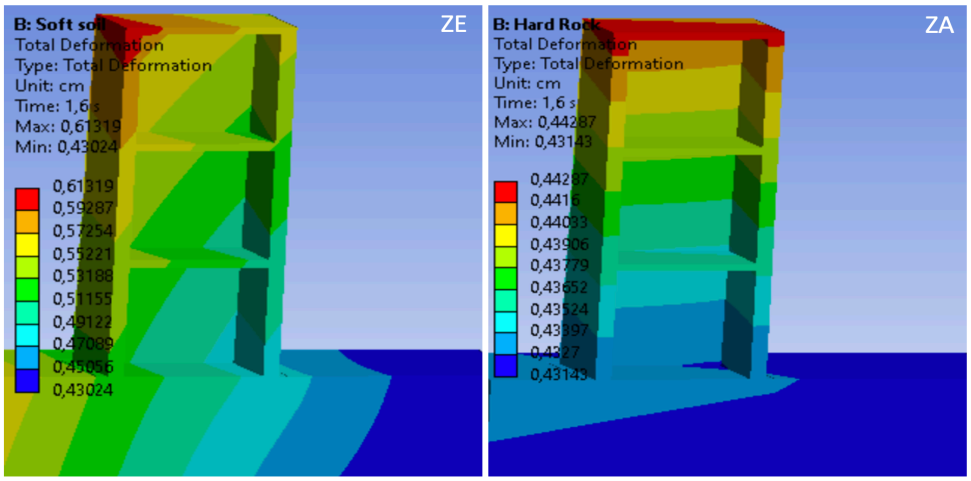


(b)

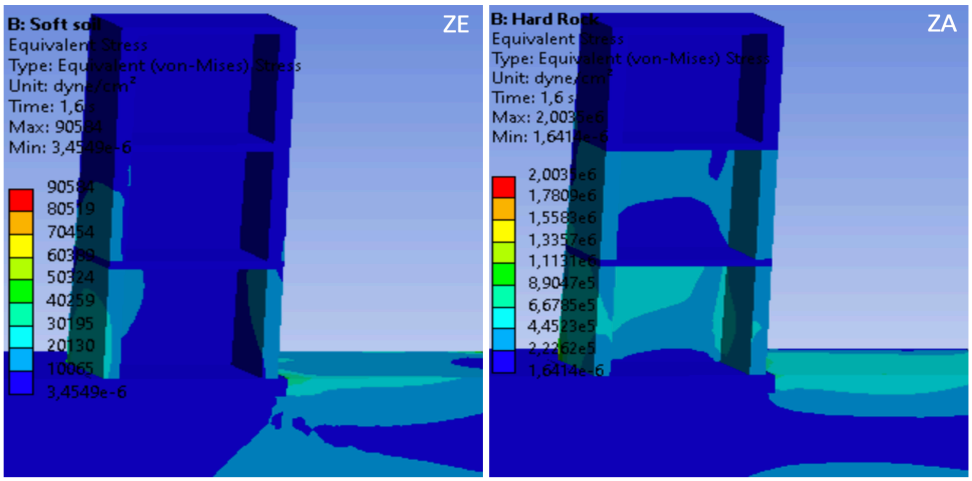
Şekil 6.10 : Problemde ele alınan sayısal model.



(a)



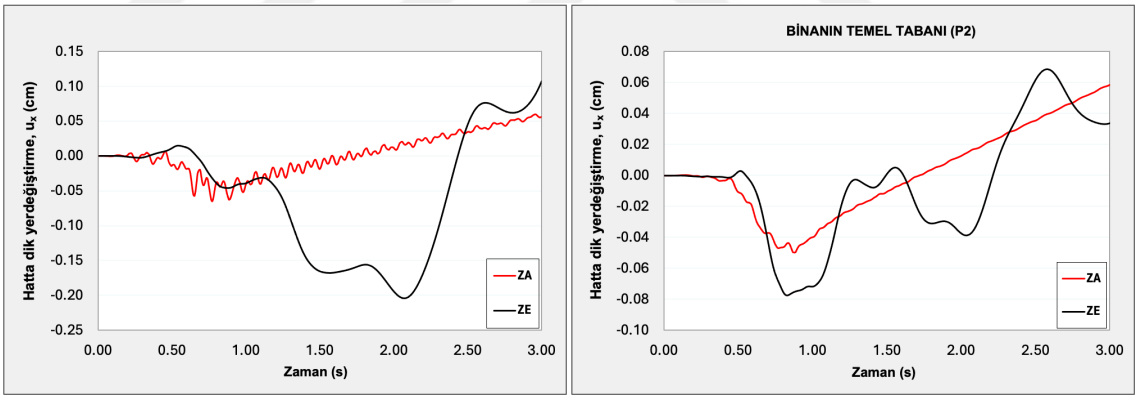
(b)



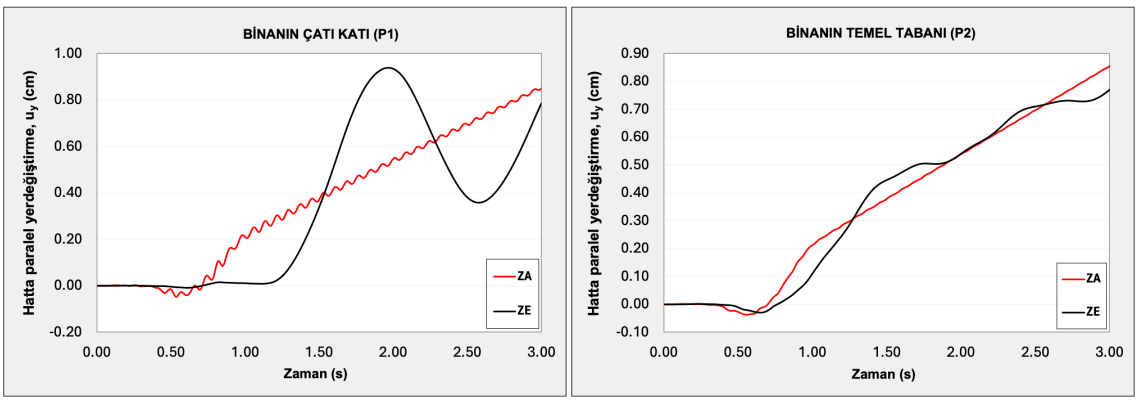
(c)

Şekil 6.11 : Problemde (a) toplam yerdeğiştirme (b) toplam hız ve (c) eşdeğer gerilme

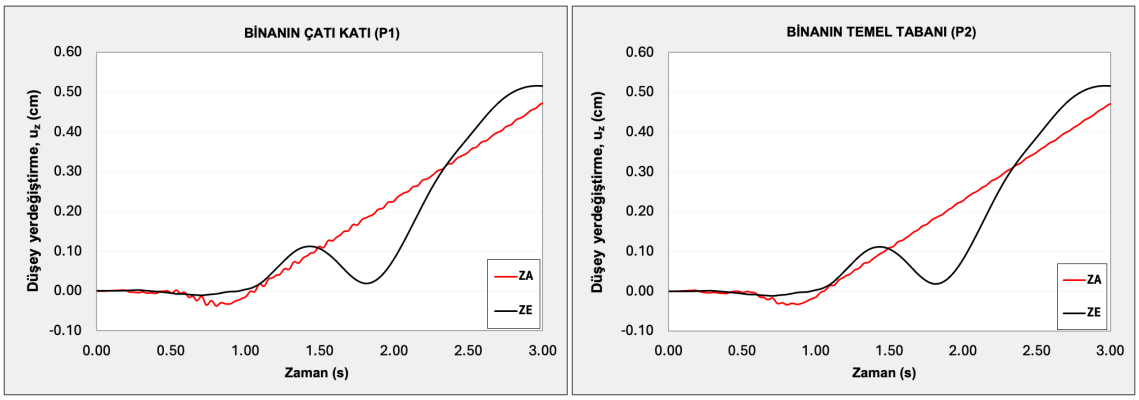
Hızlı tren ile titreşen üç katlı yığma yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak binanın çatı katı düzeyi (P1 noktası) ve binanın temel tabanı (P2 noktası) seçilmiştir. Tanımlanan noktalardaki yerdeğiştirme eğrileri çeşitli zemin tipleri için hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir (Şekil 6.12).



(a)



(b)



(c)

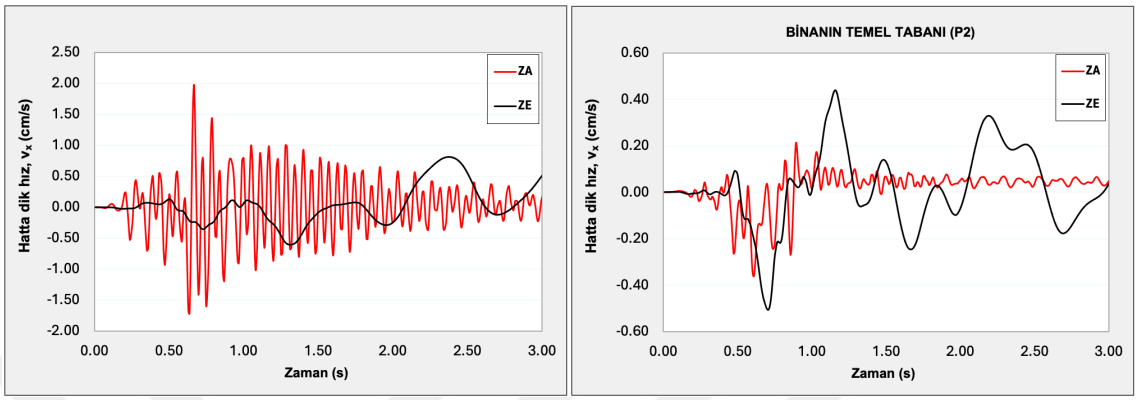
Şekil 6.12 : Farklı zemin sınıfı için yerdeğiştirme-zaman grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.

Ele alınan ve rijitliği farklı her bir zemin türü için, hızlı tren geçişine ait dinamik etkilerin hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda oluşturduğu titreşimlerin yerdeğiştirme-zaman ilişkisi kullanılarak elde edilen ve bunlara ait maksimum yerdeğiştirmelerinin değişimini gösteren grafikler incelendiğinde (Şekil 6.12); üstyapı tepe noktasının maksimum yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin (ZE) durumunda gözlenmektedir. Gevşek zemin şartlarında üstyapı tepe noktasındaki hatta dik maksimum yerdeğiştirme değeri, kaya zeminden (ZA) %68 civarında büyüttüğü belirlenmiştir. Hatta paralel durumu için ise maksimum yerdeğiştirme değeri, kaya zeminden yaklaşık olarak %9 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Düşey doğrultuda, maksimum yerdeğiştirme değeri, kaya zeminden sırasıyla %8,7 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak; zemin rijitliği azaldıkça, yerdeğiştirme değerlerinde dalga yayılımının her üç doğrultusunda da yerdeğiştirmelerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür.

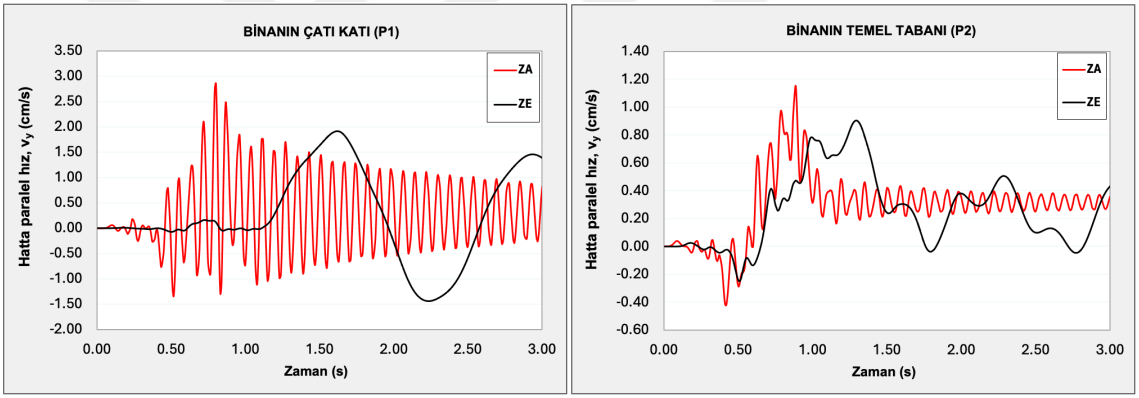
Şekil 6.12 incelendiğinde, bina tepe noktası (P1) maksimum yerdeğiştirme değerlerinin bina temel (P2) yerdeğiştirme değerlerine göre farklı zemin koşullarına bağlı olarak her üç doğrultuda büyüdüğü görülmüştür. ZE zemin için, bina tepe noktasının hatta dik ve paralel yerdeğiştirme değerleri; bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %62.5 ve %18 civarında daha büyük olduğu görülmektedir. ZA zemin için, bina tepe noktasının hatta dik ve paralel yerdeğiştirme değerleri; bina temel noktasının yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %9.23 ve %0,3 civarında daha büyük olduğu görülmektedir.

Hızlı demiryolu trafiğinin yapıda oluşturduğu titreşim etkilerini gözlemlemek için ANSYS yazılımında geliştirilen sonlu eleman modelinin analiz sonuçları hız-zaman

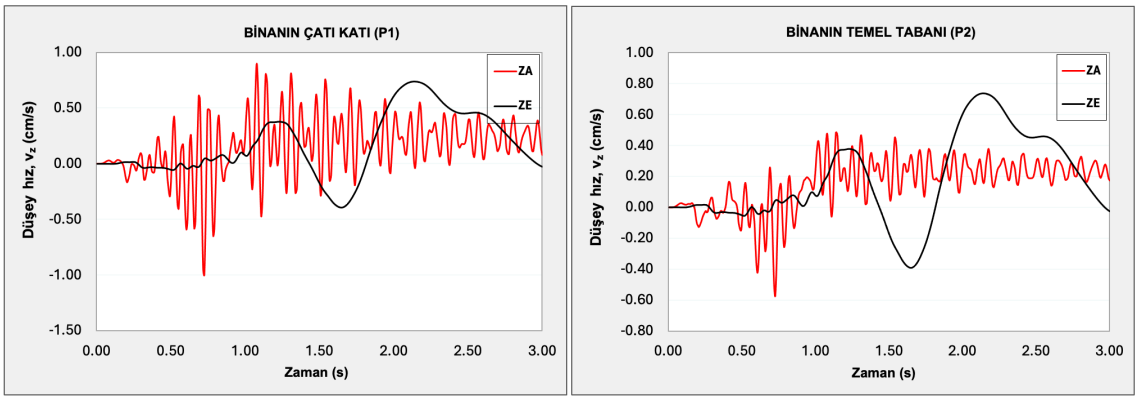
ilişkisi açısından hatta dik, hatta paralel ve düşey doğrultuda farklı zemin türü için karşılaştırmalı olarak Şekil 6.13'te verilmiştir. Parametrik analizler soncunda elde edilen titreşim verileri, yapı hasarı ve insan konforu açısından, Amerikan (FTA, 2006) ve Almanya (DIN 4150–2/3) standartlarına göre incelenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.13 : Farklı zemin sınıfı için hız-zaman karşılaştırma grafikleri (a) hatta dik, (b) hatta paralel ve (c) düşey doğrultu.

FTA 2006:

Tablo 6.2'de, titreşim düzeyi değerlendirmelerinde kullanılan FTA'nın tanımlamalarına göre dönüştürülmüş ölçüm sonuçlarının maksimum değerleri bulunmaktadır.

Tablo 6.2 : FTA değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları.

	3-KATLI YIĞMA YAPI								
Nokta	*Zemin Sınıfı – ZA*								
P1	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	4.940	7.138	2.505	19.760	28.550	10.020	105.778	108.974	99.879
	Zemin Sınıfı – ZE								
	Maksimum RMS (mm/s)			Maksimum Hız (mm/s)			Maksimum Lv (VdB)		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	2.030	4.790	1.848	8.120	19.160	7.390	98.053	105.510	97.235

x: Hatta dik doğrultu | **y**: Hatta paralel doğrultu | **z**: Düşey doğrultu | **P1**: Bina tepe noktası

Tablo 6.2'de belirtilen titreşim parametreleri, Tablo 2.3 ve Tablo 2.5'te gösterilen FTA kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerin aşmıştır ve insan sağlığı açısından uygun olmadığı tespit edilmiştir.

ZA zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında yönetmelik eşik değerlerini aşmıştır ve tüm yapı kategorileri için uygun değildir.

ZE zemin sınıfı için titreşim seviyesi, insan sağlığı ve konforu bakımından yönetmelikte verilen tüm kategorinin sınır değerini tüm yayılma doğrultularında aşmıştır ve insan sağlığı ve konforuna uygun olmadığı belirlenmiştir.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede yönetmelikte verilen kategorilerin üst sınır değeri 83 VdB'dir. Titreşim seviyesi tüm yayılma doğrultularında sınır değerini aşmıştır. Titreşim seviyesi bu değeri en az 14.23 VdB, en fazla 22.50 VdB aşmıştır. Bu titreşim seviyesi tüm yapılar için uygun değildir.

DIN4150:

Bina tepe noktası titreşimleri için elde edilen hız değerleri Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Tablo 6.3 : DIN'da tanımlanan değerlendirme kriterleri için dönüştürülmüş ölçüm sonuçları.

3-KATLI YIĞMA YAPI						
Nokta	*Zemin Sınıfı – ZA*					
	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
P1	19.760	27.3653	28.550	14.3229	10.020	17.4479
	Zemin Sınıfı – ZE					
	x		y		z	
	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)	Hız (mm/s)	Frekans (Hz)
	8.120	1.8229	19.160	1.0410	7.390	1.8229

x: Hatta dik doğrultu | **y**: Hatta paralel doğrultu | **z**: Düşey doğrultu | **P1**: Bina tepe noktası

Tablo 6.3'te belirtilen nümerik analizlerden elde edilen titreşim sonucları, insan konforu ve yapısal hasar bakımından değerlendirme için Tablo 2.4 ve Tablo 2.6'da gösterilen DIN 4150-2/3 kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

ZA zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, yönetmelikte verilen kategorilerden tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi çok güçlü algılanabilir düzeyini 5.76 mm/s, tren hattına paralel doğrultuda çok güçlü algılanabilir düzeyini 14.55 mm/s, düşey doğrultuda güçlü algılanabilir düzeyini 4.02 mm/s aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, insan sağlığı ve konforu bakımından yapılan değerlendirmede, yönetmelikte verilen kategorilerden tren hattına dik doğrultudaki titreşim seviyesi güçlü algılanabilir düzeyini 2.12 mm/s, tren hattına paralel doğrultuda çok güçlü algılanabilir düzeyini 5.16 mm/s, düşey doğrultuda güçlü algılanabilir düzeyini 1.39 mm/s aşmıştır.

ZE zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede tren titreşim seviyesi tüm yapılar için uygundur. ZA zemin sınıfı için, yapısal hasar bakımından yapılan değerlendirmede, genel olarak tren hattına paralel doğrultudaki titreşim seviyesi konut ve hassas tarihi binalar için uygun değildir. Ticari/ endüstriyel yapılar için uygundur.

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek hızlı tren (YHT) ulaşımının ve ağlarının yaygınlaşması ve gelişmesiyle birlikte, tren kaynaklı çevresel titreşimler ve hattın yakındaki yapılar üzerindeki dinamik etkiler gibi sorunlar kentsel alanlarda incelenmesi ve gerekiyor ise tedbir alınması geren bir konu haline gelmiştir. Bu tezde, hızlı tren geçişinden kaynaklanan zemin titreşimleri ve bu titreşimlerin yapılar üzerindeki etkileri incelenmiştir. TCDD'nin taşımacılık hizmetlerinde kullandığı Yüksek Hızlı Trenlerin (YHT) düşük rijitlikteki zemin ortamlarında meydana getirdiği titreşimlerin gerçek saha koşullarında deneysel olarak ölçülmesi, oluşum mekanizması, zemindeki dalga yayılım özellikleri ve binalarda yarattığı olumsuz etkilerin araştırılmasına odaklanılmıştır. Bu amaçla, İstanbul-Ankara yüksek hızlı demiryolu hattında, tren geçiş hızı 200-250 km/h arasında değişen serbest zemin yüzeyinde titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, demiryolu hattına oldukça yakın seçilmiş bir alanda serbest zemin titreşimleri, üç eksenli ivme ölçerler aracılığıyla kaydedilmiş ve Yüksek Hızlı Tren (YHT) trafiğinin neden olduğu zemin titreşimlerinin, hattan uzaklığa bağlı olarak nasıl azaldığı incelenmiştir.

Sonrasında, titreşim ölçümlerinden elde edilen veriler, sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayalı sayısal modeli doğrulamak amacıyla kullanılmıştır. Zemin kaynaklı titreşimleri incelemek için, FEM'e dayalı üç boyutlu bir sayısal model geliştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen titreşim verileri, geliştirilen sayısal model ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) tarafından tanımlanan farklı zemin sınıfları için tren kaynaklı titreşimlerin (farklı tren hızlarında) etkisini incelemek için kullanılmıştır. Sayısal model, farklı zemin koşullarının ve çeşitli tren geçiş hızlarının titreşim genlikleri üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılmıştır.

Demiryolu titreşimlerinin üstyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla parametrik çalışmada kullanılan zemin modeline farklı yüksekliklerde betonarme bina modelleri eklenmiştir. Sonuçları analiz edilip,

yorumlanıp ve araştırılan parametrelerin önemine ilişkin bazı yönergeler özetlenmiştir. Son olarak, doğrulanmış model kullanılarak yüksek hızlı trenin neden olduğu çevresel titreşimlerin etkisi insan konforu ve yapısal hasar açısından Alman (DIN 4150-2/3, 1999) ve Amerikan (FTA, 2006) yönetmeliklerine göre kabul edilebilecek titreşim seviyeleri için karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimlerin yakındaki yığma ve betonarme yapılar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla sayısal çalışmalar yapılmıştır. ANSYS programı kullanılarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki ana sonuçlar elde edilmiştir:

1) Deneysel ve sayısal veriler incelendiğinde, demiryolu hattına olan uzaklık ile maksimum yer ivmeleri (PGA'lar) ve yerdeğiştirmeler arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Genel olarak, demiryolu hattından uzaklaştıkça hızlı tren geçişi kaynaklı serbest zemin yüzeyine ait titreşim genlikleri azalmaktadır.

2) Yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu serbest zemin titreşimlerine ait genlikler, zemin rijitliğinin azaldığı durumlarda artmaktadır.

3) Yüksek hızlı tren geçişi sırasında, tren hattına dik, tren hattına paralel ve düşey doğrultularda yayılan titreşim karakteristikleri önemli derecede birbirinden farklıdır. Bu nedenle, tüm doğrultular için titreşimleri ölçmek ve değerlendirme önemlidir.

4) Zemin yüzeyinde ölçülen maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri incelendiğinde, serbest zemin yüzeyinde düşey doğrultuda yayılan titreşim genliklerinin yatay bileşenlerden daha büyük olduğu görülmüştür.

5) Sonlu eleman analizleri sonucunda, hızlı trenlerin geçişine ilişkin sayısal verilerin analizi, tren hızı arttıkça tren kaynaklı yer titreşimlerinin ve yerdeğiştirmelerinin arttığını göstermiştir.

6) Ölçülen ve hesaplanan PGA değerlerinin karşılaştırmalı analizi, sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bu uyum, titreşim analizinde doğrulanmış sonlu eleman modelinin faydalı olduğunu ortaya koymaktadır.

7) Tren kaynaklı bina titreşimleri, zemin ortamının mekanik özelliklerinden dolayı farklı zemin koşullarında önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Buna bağlı

olarak, hız ve yerdeğiştirme değerleri sert kayadan yumuşak zemine doğru artmaktadır.

8) Literatür ile uyumlu olarak, farklı zemin koşulları için titreşim sonuçları, tren kaynaklı bina titreşimlerinin düşey yönünün, dikey ve paralel doğrultulara göre daha fazla etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

9) Farklı zemin koşulları için tren kaynaklı bina titreşimleri karşılaştırıldığında, binaların üst katlarındaki hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zemin katlarına göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

10) Yapı yüksekliği arttıkça ve zemin rijitliği azaldıkça, maksimum kesme kuvvetlerinde büyük oranlarda artmaların meydana geldiği görülmüştür.

11) Elde edilen sonuçlar, yumuşak zemin üzerine inşa edilen yapıların, daha rijit zemin üzerine inşa edilen yapılara göre hızlı tren geçişinden daha fazla etkilendiğini göstermiştir. Bu bulgular, hızlı tren hatlarına yakın binaların tasarımında ve inşasında zemin koşullarının dikkatli bir şekilde ele alınmasının önemini vurgulamaktadır.

12) Binalarının düşey yöndeki titreşim seviyeleri, kötü zemin koşulları (ZE) için insan konforu açısından DIN 4150 ve FTA kriterlerinin sınır değerlerini aşmaktadır. Ancak, rijit zemin koşulları (ZA) için titreşim seviyeleri yönetmeliklerin eşik değerlerinin altında kaldığını göstermiştir.

13) DIN 4150 ve FTA kriterlerine göre, binalarda titreşim etkileri değerlendirildiğinde, zemin rijitliği azaldıkça titreşimlerin insan algısı seviyesinin üzerine çıkıldığı görülmüştür. Ayrıca, yapının dinamik özelliklerinin, titreşim seviyelerinin aşılması sürecinde önemli bir etkisi olmadığı saptanmıştır.

14) FTA ve DIN 4150 standartlarına göre, genellikle zemin rijitliğinin azalması ile yapısal hasar olasılığının arttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle tarihi binalar vb. hassas yapılar bu tür titreşimlerden daha fazla etkilenebilir.

15) Bu çalışma, aynı bina titreşim değerlerinin farklı normlara göre farklı şekilde değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Analiz için seçilen titreşim olayı, maksimum parçacık hızına ve maksimum desibele (VdB) dayalı iki yöntem kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, VdB kavramının insan algısı

açısından bina titreşimlerini analiz etmek için daha uygun olduğunu göstermiştir.

16) Zemin rijitliğinin azalması titreşimlerin insan konforu ve yapısal hasar bakımından olumsuz etkilerini arttırmaktadır. Potansiyel güvenlik tehlikeleri nedeniyle, demiryolu hatlarının yakınında yumuşak zemin üzerine bina inşa etmek genellikle önerilmemektedir. Demiryolu hatlarına yakın bir bina inşa etmeden önce, uluslararası titreşim standartlarının kriterleri ve yönergelerine dikkatli bir şekilde uygunluk değerlendirmesi yapmak önemlidir.

17) Bu çalışmada, gerçekçi bir tanımı içeren sonlu elemanlar modeli kullanılarak yüksek hızlı tren geçişinin etkileri incelenmiştir. Geliştirilen sayısal model, tren kaynaklı titreşimlerin farklı zemin koşullarında yakındaki yapılar üzerindeki etkisini tahmin etmek için değerli ve kullanışlı bir araç olarak kanıtlanmıştır.

18) Beton sınıfı ve üstyapı rijitliğinin, demiryolu kaynaklı bina titreşimlere nasıl etkilediğini değerlendirmek amacıyla, ANSYS programı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

19) Titreşim analizi sonuçları, ANSYS programda oluşturulan doğrulanmış sonlu eleman modelinin betonarme ve yığma yapılarda tren kaynaklı titreşimleri etkili bir şekilde araştırabildiğini gösterilmiştir.

20) Binanın farklı kat seviyelerinde yapılan titreşim analizi, beton özelliklerindeki değişikliklerin tren kaynaklı titreşimlere binanın tepkisi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Beton sınıfının seçimi, belirli noktalardaki sonuçları önemli ölçüde değiştirmemiştir. Bu da üstyapı rijitliğinin trenlerin ürettiği bina titreşimlerinde önemli bir rol oynamadığını göstermektedir.

21) ANSYS analizinden BA yapı için elde edilen sonuçlar, düşük genlikli yükler sırasında titreşim verilerinde minimum bina deformasyonunun yapısal hasara neden olmaktan ziyade insan konforunu etkilediğini göstermektedir.

22) Titreşim seviyeleri ve yerdeğiştirmeler, yığma binalarda betonarme binalara göre daha yüksektir. Ana sebep, yığma binaların betonarme binalara göre düşük rijitliğidir.

23) Yüksek hızlı trenlerin geçişi, bina hasarı ve insan konforu açısından betonarme binalara göre yığma binaları daha fazla etkileyebilmektedir.

24) Gelecekte, yığma bina periyodu, zemin rijitliği ve tren kaynaklı titreşim frekansı arasındaki ilişkiyi görmek için daha fazla analizler yapılabilir.

25) Daha çok geoteknik problemlerin incelenmesinde kullanılan PLAXIS sonlu eleman yazılımındaki basitleştirilmiş yapısal model ile elde edilen sonuçların, belirli zemin ortamlarında düşük genlikli yükleme durumlarının analizleri için yeterli ve etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu, böyle yüklere maruz kalan binalar için karmaşık olmayan bir modelleme yaklaşımının gerekli olmayabileceğini ve PLAXIS'da basit modelleme ve doğrusal analizin tatmin edici sonuçlar verebileceğini ifade etmektedir.

Geliştirilen nümerik model, makul bir hesaplama maliyeti, zaman ve bellek gereksinimleri gibi sınırlayıcı faktörleri dikkate alarak demiryolu trafiğinin neden olduğu titreşimlerin incelenmesi için yeterli bir araç olarak kabul edilebilir. Ayrıca, çeşitli zemin özellikleri için yapılan parametrik çalışmalarla elde edilen sayısal veriler, yüksek hızlı trenlerin neden olduğu çevresel titreşimlerin olumsuz etkilerinden kaçınmak için demiryolları yakınında endüstriyel, konut ve diğer türdeki tesislerin planlamasında yararlı olabilir. Bu veriler, bir projenin fizibilite çalışması sırasında yapı mühendislerine ve şehir planlamacılarına rehberlik edebilir ve olası hafifletici önlemleri hızlı ve etkili bir şekilde incelemeye olanak tanır.

KAYNAKLAR

Abílio, R. M. O. M., (2015), *Experimental determination of soil damping: application to the residual soil from Porto granite*, (Master Thesis). Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto. Portugal.

Achenbach, J.D. (1973). Wave Propagation in Elastic Solids. *A volume in North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics.*

Adam, M. & Estorff, O. Von. (2005). Reduction of train train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Comput. Struct*. 83(1):11-24.

Adam, M., Pflanz, G. & Schmid, G. (2000). Two- and three three-dimensional modeling of half half-space and train train-track embankment under dynamic loading. *Soil Dyn Earthq Eng*. 19 (8):559-573.

Adolfsson, K., Andréasson, B., Bengtson, P-E., Bodare, A., Madshus, C., Massarch, R., Wallmark, G. & Zackrisson, P. (1999). High speed lines on soft ground. Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line. *Technical Report*. Banverket, Sweden.

Alzawi, A., (2011), *Vibration isolation using in-filled geofoam trench barriers*, (Ph. D. Dissertation), The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.

Anastasopoulos, I., Alfi, S., Gazetas, G., Bruni, S. & Leuven, A.V. (2009). Numerical and experimental assessment of advanced concepts to reduce noise and vibration on urban railway turnouts. *J Transport Eng*. 135(5):279–287.

Andersen, L. & Jones, C.J.C. (2006). Coupled boundary and finite element analysis of vibration from railway tunnels – comparison of two- and three-dimensional models. *J Sound Vib*. 293(3–5):611–625.

Anderson, D.C. (1994). Engineering prediction of railway vibration transmitted in buildings. *Environ. Eng*. 7(1):14–19.

Andersson, E., Berg, M. & Stichel, S. (2002). Spårfordons dynamik, Järnvägsteknik, Institutionen för farkostteknik. *KTH*, Stockholm, Sweden.

Auersch, L. (2005). The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of Vehicletrack-soil interaction and measurements on high-speed lines. *J Sound Vib*. 284:103–32.

Auersch, L. (2006). Dynamic axle loads on tracks with and without ballast mats: numerical results of three-dimensional vehicle-track-soil models. *Proc IMechE, Part F: J Rail Rapid Transit*. 220(2):169–183.

Auersch, L. (2007). The influence of the soil on track dynamics and ground-borne vibration. In: Maeda T, Gautier P-E, Hanson CE, Hemsworth B, Nelson JT, Schulte-Werning B, Thompson D, and de Vos P, editors. Noise and vibration mitigation for rail transportation systems. *Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise*.

Auersch, L., (1994). Wave propagation in layered soil dynamics: Theoretical solution in wave number domain and experimental results of hammer and railway traffic excitation. *J. Sound Vib*. 173(2):233–264.

Bahrekazemi, M., (2004), *Train-induced ground vibration and its prediction*, (Ph.D. Thesis), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Banimahd, M., Woodward, P.K., Kennedy, J. & Medero, G.M. (2011). Behaviour of train–track interaction in stiffness transitions. *Proc ICE – Transport*. 165(3):205–214.

Banverket, Naturvårdsverket. (2006). Buller och vibrationer från spårburen linjetrafik - Riktlinjer och tillämpning. *Stockholm och Borlänge*.

Bata, M. (1971). Effects on buildings of vibrations caused by traffic. *Building Science*. 6(4), 221-246.

Behnamfar, F., Moghtaderi, E. A., Nikbakhtb, R. & Ghandila, M. (2016). Analysis of structural vibrations due to passage of underground trains. *International Journal of Engineering*. 29(6).

Bornitz, G. (1931). Über die Ausbreitung der von Groszkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die tiefe. *Springer: Berlin*.

Bose, T., Choudhury, D., ASCE, M., Sprengel, J. & Ziegler, M. (2018). Efficiency of open and infill trenches in mitigating ground-borne vibrations. *J. Geotech. Geoenviron. Eng*. 144(8): 04018048.

Branderhorst, J., (1997), *Modellen voor het boeggolfprobleem bij hogesnelheidstreinen. Ontwerp en validatie met behulp van de resultaten van de proef Amsterdam–Utrecht,* (Master's Thesis), University of Twente, Enschede, Netherlands.

BS 7385. Evaluation and Measurement for Vibration in Buildings, Part 1: Guide for Measurement of Vibrations and Evaluation of Their Effects on Buildings, 1990. Part 2: Guide to Damage Levels from Groundborne Vibration, 1993. *British Standards Institute*, UK.

Çelebi, E. & Kırtel, O. (2013). Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations. *Construction and Building Materials*. 42:122-131.

Çelebi, E., Fırat, S., Beyhan, G., Çankaya, I., Vural, İ. & Kırtel, O. (2009). Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. *Soil Dyn. Earthq. Eng*., 29(5):824-833.

Çelebi, E., Zülfikar, A. C., Göktepe, F., Kırtel, O., Faizan, A. A. & İstegün, B. (2022). In-situ measurements and data analysis of environmental vibrations induced by

high-speed trains: A case study in North-Western Turkey. *Soil Dyn Earthq Eng.* 156:107211.

Chebli, H., Clouteau, D. & Schmitt, L. (2008). Dynamic response of high-speed ballasted railway tracks: 3D periodic model and in situ measurements. *Soil Dyn Earthq Eng*. 28(2):118–131.

Connolly, D., Giannopoulos, A. & Forde, M. (2013). Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments. *Soil Dyn Earthq Eng*. 46:13–19.

Connolly, D., Giannopoulos, A., Fan, W., Woodward, P.K. & Forde, M. (2013). Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations. *Construct Build Mater*. 44:557–564.

Connolly, D.P., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C.L. & Forde, M.C. (2015). Benchmarking railway vibration - Track, vehicle, ground and building effects. *Construction and Building Materials*, 92.

Costa, P.A., Calada, R., Cardoso, A.S. & Bodare, A. (2010). Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high–speed railway tracks. *Soil Dyn Earthq Eng*. 30(4):221–235.

Courant, R., Friedrichs, K. & Lewy H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal*. 11:215-234.

Crispino, M. & D'apuzzo, M. (2001). Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building. *J Sound Vib*. 246(2):319–35.

Dasgupta, G. (1982). A finite element formulation for unbounded homogeneous continua. *Journal of Applied Mechanics*. ASME, 49:136-140.

Datoussaïd, de Saedeleer B., Verlinden, O. & Conti, C. (2000). Vehicle/track interaction and ground propagation of vibrations for urban railway vehicles. *Eur J Mech Environ Eng*. 45(2):87–93.

Dawn, T. M. & Stanworth, C. G. (1979). Ground vibrations from passing trains. *J. Sound Vib.* 66(3):355–362.

Degrande, G. & Lombaert, G. (2001). An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem. *J Acoust Soc Am*. 110 (3):1379–1390.

Degrande, G. & Schillemans, L. (2001). Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *J Sound Vib*. 247:131–44.

DIN 4150-2 (1999). Structural Vibration: Part 2: Human Exposure To Vibration In Buildings. *Deutsches Institute für Normung (DIN)*. Germany.

DIN 4150-3 (1999). Structural vibration: Part 3: Effects Of Vibration On Structures. *Deutsches Institute für Normung (DIN)*. Germany.

EC 8-Eurocode 8 (2004).: Design of Structures for Earthquake Resistance. *1st ed. Brussels: BSi.*

Esveld, C. (2001). Modern railway track. *Zaltbommel: MRT-Productions.*

Faizan, A. A., (2017), *Demiryolu köprülerinin yapı-zemin etkileşimi altında analizi,* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Faizan, A. A., Çelebi, E., Kırtel, O., Göktepe, F., Zülfikar, A. C., İstegün, B. & Ateş, S. (2022). Evaluation of human exposure and building damage to high-speed train-induced ground-borne vibration based on numerical studies: A comparison with international standards. *Arab J Geosci* 15:779.

Faizan, A. A., Kırtel, O., Çelebi, E., Zülfikar, A. C. & Göktepe, F. (2022). Experimental validation of a simplified numerical model to predict train-induced ground vibrations. *Computers and Geotechnics*. 141(2022), 104547.

Forrest, J.A. & Hunt, H.E.M. (2006). A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration. *J. Sound Vib*. 294(4):678–705.

François, S., Schevenels, M., Galvín, P., Lombaert, G. & Degrande, G. (2010). A 2.5D coupled FE-BE methodology for the dynamic interaction between longitudinally invariant structures and a layered halfspace. *Comput Methods Appl Mech Eng*. 199:1536–1548.

FTA (2006). Transit Noise And Vibration Impact Assessment. *Federal Transit Administration (FTA)*. Washington, USA.

Fu, Q. & Zheng, C. (2014). Three-dimensional dynamic analyses of track-embankment-ground system subjected to high speed train loads. *The Scientific World Journal*. Article ID 924592.

Fujii, K., Takei, Y. & Tsuno, K. (2005). Propagation properties of train-induced vibrations from tunnels. *Quart Report of RTRI*. 46(3):194–199.

Gabriella, V. & Zoltán C. (2004). Soil models: Safety factors and settlements. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng*. 48(1–2):53–63.

Galavi, V. & Brinkgreve, R. (2014). Numerical methods in geotechnical engineering. *CRC Press*. pp. 235–240.

Galvín, P. & Domínguez, J. (2009). Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the Córdoba–Málaga line. *Soil Dyn Earthq Eng*. 29(4):641-657.

Galvín, P., Romero, A. & Domínguez, J. (2010). Fully three-dimensional analysis of high-speed train–track–soil–structure dynamic interaction. *J Sound Vib*. 329(24):5147–5163.

Gao, G. Y., Chen, Q. S., He, J. F. & Liu, F. (2012). Investigation of ground vibration due to trains moving on saturated multi-layered ground by 2.5D finite element method. *Soil Dyn Earthq Eng*. 40:87-98.

Gardien, W. & Stuit, H.G. (2003). Modelling of soil vibrations from railway tunnels. *J Sound Vib.* 267:605–619.

Geniş, M. & Gerçek, H. (2000). Yer altı açıklıklarının dinamik tasarımı, *V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*. Isparta, Türkiye.

Göktepe, F., Küyük, H. S. & Çelebi, E. (2017). In-situ measurement of railway-traffic induced vibrations nearby the liquid-storage tank. *Earthquakes and Structures.* 12 (5):583-589).

Gupta, S., Degrande, G. & Lombaert, G. (2009). Experimental validation of a numerical model for subway induced vibrations. *J. Sound Vib*. 321:786–812.

Hall, L. & Wersäll C. (2012). Markvibrationer. *Svenska Geotekniska Föreningen*. Markvibrationskommittén. (SGF Informationsskrift 1:2012).

Hall, L., (2000), *Simulations and analyses of train-induced ground vibrations,* (Doctoral Thesis), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Hall, L. (2003). Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models. *Soil Dyn Earthq Eng*. 23(5):403-413.

Hannelius, L. (1978). Vibrationer från tung tågtrafik. *BFR 750519-5*.

Haupt, W. A. (1978). Surface-waves in non-homogeneous half-space. *Proceedings of Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics*, DMSR 77, vol. I, A.A. Balkema, Rotterdam.

Haupt, W.A. (1977). Isolation of vibrations by concrete core walls. *Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Tokyo, Japan.

Heckl, M., Hauck, G. & Wettschureck, R. (1996). Structure-borne sound and vibration from rail traffic. J. Sound Vib. 193(1):175–184.

Hu, J., Luo, Y., Ke, Z., Liu, P. & Xu J. (2018). Experimental study on ground vibration attenuation induced by heavy freight wagons on a railway viaduct. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 37(4):881–895.

Ishihara, K. (1996). Soil behaviour in earthquake geotechnics, *Oxford University Press*, Great Clerandon Street, UK.

Işık, M. E. & Kuruşcu, A. O. (2018). Yapısal titreşimlerin kullanıcı konforuna etkisinin incelenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. 01:20-34.

ISO 2631-2 (2003). Mechanical Vibration And Shock - Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration - Part 2: Vibration In Buildings (1 Hz To 80 Hz).

Johnson, A. P. & Hannen, W. R. (2015). vibration limits for historic buildings and art collections. *Journal of Preservation Technology*. 46(2-3):66-74.

Jones, C. J. C. (1994). Use of numerical models to determine the effectiveness of anti vibration systems for railways. *Proc. Instn Civ. Engrs Transp*. 105, Feb., pp. 43-51.

Jonsson, O. J. (2000). On ground and structural vibrations related to railway traffic. *Göteborg: Chalmers University of Technology*. (Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures).

Jorge, A. & Alirio, M.-A. (2017). Obtaining mechanical properties from V_p/V_s ratio of superficial volcanic ash soils in Manizales city Colombia. *Espacios. 38. 22.*

Ju, S.H. (2009). Finite element investigation of traffic induced vibrations. *J Sound Vib*. 321 (3–5):837–853.

Karlström, A. (2006). An analytical model for ground vibrations from accelerating trains. *J Sound Vib*. 293(3–5):587–598.

Karslı, Ha., Babacan, A. E., Senkaya, M. & Gelişli, K. (2021). An evaluation on rippability of geological units by seismic P and S-wave velocities. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 27(3):410-419.

Kaynia, A. M., Madshus, C. & Zackrisson, P. (2000). Ground vibration from high-speed trains: prediction andcountermeasure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 126(6):531-537.

Khatibi, D. (2013). Determination of homogeneity and isotropy of soil using geophysical methods. *TRITA LWR Degree Project* 13:01.

Kim, D.-S. & Lee, J.-S. (2000). Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dyn. Earthq. Eng*. 19(2):115-126.

Kırtel, O., (2013), *Doğrusal olmayan zemin ortamında rijit şerit temeller için dinamik empedans fonksiyonları*, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Klæboe, R., Öhrström, E., Turunen-Rise, I. H., Bendtsen, H. & Nykänen, H. (2003a). Vibrations in dwelings from road and rail traffic – Part III: towards a common methodology for socio-vibrational surveys. *Applied Acoustics*. 64:111-120.

Klæboe, R., Turunen-Rise, I. H., Hårvik L. & Madshus, C. (2003b). Vibrations indwelings from road and rail traffic – Part II: exposure-effect relationships based onordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics*. 64:89-109.

Kouroussis, G. & Verlinden, O. (2013). Prediction of railway induced ground vibration through multibody and finite element modelling. *Mech Sci*. 4(1):167–183.

Kouroussis, G., Connolly, D. P., Vogiatzis, K. & Verlinden O. (2015). Modelling the environmental effects of railway vibrations from different types of rolling stock: a numerical study. *Shock and Vibration*. Article ID 142807.

Kouroussis, G., Verlinden, O. & Conti, C. (2011). Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation. *Soil Dyn Earthq Eng*. 31(4):692-707.

Kouroussis, G., Verlinden, O. & Conti, C. (2012). A two-step time simulation of ground vibrations induced by the railway traffic. *J Mech Eng Sci*. 226(2):454–472.

Kramer, SL. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. *Prentice-Hall Inc*. Upper Saddle River, NJ, USA.

Krylov V.V. (1998). Effect of track properties on ground vibrations generated by high-speed trains. *Acustica–Acta Acustica*. 84(1):78–90.

Krylov, V.V. & Ferguson, C.C. (1994). Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains. *Applied Acoustics*. 42:199–213.

Kuhlemeyer, R.L. & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, 99 (SM5), 421-427.

Lai, C.G., Callerio, A., Faccioli, E., Morelli, V. & Romani, P. (2005). Prediction of railway-induced ground vibrations in tunnels. *J Vib Acoustics*. 127(5):503–514.

Leonardi, G. & Buonsanti M. (2014). Reduction of train-induced vibrations by using barriers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 7:3623-3632.

Leonardi, G. & Buonsanti, M. (2014). Reduction of train-induced vibrations by using barriers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 7:3623-3632.

Li, P., Ling, X., Zhang, F., Li, Y. & Zhao Y. (2017). Field Testing and analysis of embankment vibrations induced by heavy haul trains. *Shock and Vibration*. 2017(1):1-14.

Liao, W.I., Teng, T.J. & Yeh, C.S. (2005). A method for the response of an elastic half-space to moving sub-Rayleigh point loads. *J. Sound Vib*. 284(1):173–188.

Lindberg, G. (1992). Vågutbredning i jord – analys och åtgärder, vibrationer från tågtrafik. Stockholm: *Kungliga Tekniska Högskolan. (Rapport nr 93/9, Institutionen för jord- och bergmekanik).*

Lombaert, G. & Degrande, G. (2009). Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains. *J Sound Vib*. 319:1036–1066.

Lombaert, G., Degrande, G., Kogut, J. & François, S. (2006). The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations. *J. Sound Vib*. 297(3):512 -535.

Lu, F., Gao, Q., Lin, J.H. & Williams, F.W. (2006). Non-stationary random ground vibration due to loads moving along a railway track. *J Sound Vib*. 298:30–42.

Lysmer, J. & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of The Engineering Mechanics Division*. 95:859–875.

Madshus, C., Bessason, B. & Hårvik, L. (1996). Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground. *J. Sound Vib*. 193(1):195–203.

Maldonado, M., Chiello, O., Houédec, D.L. (2007). Propagation of vibrations due to a tramway line. In: Maeda T, Gautier P-E, Hanson CE, Hemsworth B, Nelson JT,

Schulte-Werning B, Thompson D, de Vos P, editors. Noise and vibration mitigation for rail transportation systems. *Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise*.

Massarsch, K. R. (1993). Man-made vibrations and solutions. State-of the-Art Lecture. *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. St. Louis, Missouri, U.S.A. II, 1393-1405.

Massarsch, K. R. (2004). Mitigation of traffic-induced ground vibrations. Keynote Lecture. *11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd on Earthquake Geotechnical Engineering*. University of California, Berkeley, U.S.A.

Metrikine, A.V. & Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2000). Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: Two-dimensional model. *J. Sound Vib*. 234(1):43–66.

Moormann, C., Lehn, J., Aschrafi, J. & Sarkar, D. (2016). Numerical investigations on track-substructure system considering the effect of different train speeds. *Procedia Engineering.* 143:1093-1099.

Nelson, J. T. & Saurenman, H. J. (1983). State-of-the-art review: Prediction and control of groundborne noise and vibration from rail transit. *U.S. department of transportation report DOT-TSC-UMTA-83-3*.

Nils, P., (2016), *Predicting railway-induced ground vibrations*, (Master's Dissertation, Lund University, Lund, Sweden.

O'Brien, J. & Rizos, D.C. (2005). A 3D BEM-FEM methodology for simulation of high speed train induced vibrations. *Soil Dyn Earthq Eng*. 25(4):289–301.

Öhrström, E., Gidlöf, A., Ögren, M. & Jerson, T. (2011). Slutrapport Forskningsprogrammet TVANE – Effekter av buller och vibrationer från tåg- och vägtrafik – tågbonus, skillnader och samverkan mellan tåg- och vägtrafik. *Göteborg: Sahlgrenska akademin. (Rapport nr 1:2011. Enheten för Arbets- och miljömedicin, Avdelningen för Samhällsmedicin och Folkhälsa).*

Öztürk, Z. & Arlı, V. (2009). Demiryolu mühendisliği. *ATM Matbaası*. İstanbul, Türkiye.

Pakbaz, M.S., Mehdizadeh, R., Vafaeian & M., Bagherinia, K. (2009). Numerical prediction of subway induced vibrations: case study in Iran-Ahwaz City. *J Appl Sci*. 9(11):2001–2015.

Paolucci, R., Maffeis, A., Scandella, L., Stupazzini, M. & Vanini, M. (2003). Numerical prediction of lowfrequency ground vibrations induced by high-speed trains at Ledsgaard, Sweden. *Soil Dyn Earthq Eng*. 23(6):425–433.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *Kansas Geological Survey*. Lawrence, USA.

Park, D. (1998). Evaluation of dynamic soil properties: Strain amplitude effects on shear modulus and damping ratio. *Ann Arbor: Cornell University*.

PLAXIS, CONNECT Edition V22.02, *Scientific* Manual (2022).

Powrie, W., Yang, L.A. & Clayton, C.R.I. (2007). Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage. *Proc IMechE, Part F: J Rail Rapid Transit*. 221(2):247–262.

Priyanka, R., (2016), *Modelling soil damping for suction pile foundations*, (Master Thesis), Delft University of Technology, Netherlands.

Ren, X.W., Wu, J.F., Tang, Y.Q. & Yang, J.C. (2019). Propagation and attenuation characteristics of the vibration in soft soil foundations induced by high-speed trains. *Soil Dyn Earthq Eng.* 117:374-383.

Ribes, L.F., Marzal, S., Zamorano, C. & Real, J. (2017). Numerical modelling of building vibrations due to railway traffic: analysis of the mitigation capacity of a wave barrier. *Shock and Vibration*. 4:1-11.

Richart, F.E., Hall, J.R. & Woods, R.D. (1970). Vibrations of Solids and Foundations. *Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics.* USA.

Romero, A., Galvín, P. & Domínguez, J. (2010). Fully 3D analysis of HST–track–soil–structure dynamic interaction. *In: Sas P, Bergen B, editors. ISMA2010 International Conference on Noise and Vibration Engineering.* Leuven.

Ropars, P., Vuylsteke, X., Augis, E. (2018). Vibrations induced by metro in sensitive buildings; experimental and numerical comparisons. *11th European congress and exposition on noise control engineering*. Greece.

Rosset, J.M. & Kausel F. (1976). Dynamic soil-structure interaction. *Second International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*. Virginia, USA.

Sanayei, M., Kayiparambil, P.A., Moore, J.A. & Brett, C.R. (2014). Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building. *Eng. Struct*. 77:119–128.

Sanayei, M., Maurya, P. & Moore, J.A. (2013). Experiment of building foundation and ground borne vibrations due to surface trains and subways. *Eng. Struct*. 53:102–111.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *J. Geotech. Eng*. 112 (11):1016–1032.

Selig, E. T. & Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. *London: Thomas Telford.* UK.

Senalp, A.D., Arikoglu, A., Ozkol, I. & Dogan, V.Z. (2010). Dynamic response of a finite length euler-bernoulli beam on linear and nonlinear viscoelastic

foundations to a concentrated moving force. *J Mech Sci Technol.* 24(10):1957–1961.

Shen, H. J. (2009). Finite element investigation of traffic induced vibrations. *J. Sound Vib*. 321: 837-853.

Sheng, X., Jones, C.J.C. & Petyt, M. (1999). Ground vibration generated by a load moving along a railway track. *J. Sound Vib*. 228(1):129–156.

Sheng, X., Jones, C.J.C. & Thompson, D.J. (2003). A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements. *J Sound Vib*. 267(3):621–635.

Sheng, X., Jones, C.J.C. & Thompson, D.J. (2004). A theoretical study on the influence of the track on traininduced ground vibration. *J Sound Vib*. 272(3–5):909–936.

Sheng, X., Jones, C.J.C. & Thompson, D.J. (2006). Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *J Sound Vib*.293(3–5):575–586.

SN 604 312a (2013). Effects of Vibration on Construction, Swiss Standard for Vibrational Damage to Buildings. *Swiss Standards Association*, Switzerland.

Stephansson, O. & Zang, A. (2012). ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 5: establishing a model for the in situ stress at a given site. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 45(6).

Stupazzini, M., Paolucci, R. (2010). Ground motion induced by train passage in urban area. *In: Sas P, Bergen B, editors. ISMA2010 International Conference on Noise and Vibration Engineering*; Leuven.

Takemiya, H. & Bian, X. (2005). Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage. *J Eng Mech ASCE*. 131(7):699–711.

Tatone, B., Lisjak, A., Mahabadi, O. & Vlachopoulos, N. (2015). Incorporating rock reinforcement elements into numerical analyses based on the hybrid finite-discrete element method (FDEM). *13th ISRM Congress.* Montreal, Canada.

Tatsuoka, F., Toshio, I. & Yoshikazu, T. (1978a). Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* 18:25-40.

TBDY-2018. Turkish Building Earthquake Code, Ankara, Turkiye, 2018.

Thompson, D. (2009). Railway noise and vibration, mechanisms, modelling and means of control. *2nd ed. Elsevier Ltd*., Oxford.

Triepaischajonsak, N. & Thompson, D. J. (2015). A hybrid modelling approach for predicting ground vibration from trains. *J. Sound Vib*. 335:147-173.

UIC-ETF (2017). Railway induced vibration: State of the art report. UIC-ETF (Railway Technical publications) 16, rue Jean Rey – 75015. Paris, France.

Url-1 <*http://www.mohid.com*>, Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri. erişim tarihi: 15.02.2023.

Vogiatzis, K. (2012). Protection of the cultural heritage from underground metro vibration and ground-borne noise in athens centre: the case of the kerameikos archaeological museum and Gazi Cultural centre. *Int J Acoustics Vib*. 17:59–72.

Vogiatzis, K.E. & Kouroussis, G. (2015b). Prediction and efficient control of vibration mitigation using floating slabs: practical application at Athensmetro lines 2 and 3. *Int. J. Rail Transp*. 3(4):215–232.

Vostroukhov, A.V. & Metrikine, A.V. (2003). Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track. *Int. J. Solids Struct*. 40:5723–5752.

Vucetic, M. & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*. 117:89-107.

Wang J. & Zeng X. (2004). Numerical simulations of vibration attenuation of high-speed train foundations with varied trackbed underlayment materials. *J Vib Control*. 10:1123–1136.

Wang, J., Jin, X. & Cao, Y. (2012). High-speed maglev train–guideway–tunnel–soil modelling of ground vibration. *Proc IMechE, Part F: J Rail Rapid Transit*. 226(3):331–344.

Wanming, Z., Zhenxing, H. & Xiaolin, S. (2010). Prediction of highspeed train induced ground vibration based on train-track-ground system model. *Earthquake Eng. Eng. Vibr*. 9(4):545–554.

Xia, H., Cao, Y., De Roeck, G. & Degrande, G. (2007). Environmental problems of vibrations induced by railway traffic. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. 1(2):142-152.

Xia, H., Cao, Y.M. & Roeck, G.D. (2010). Theoretical modeling and characteristic analysis of moving-train induced ground vibrations. *J Sound Vib*. 329(7):819–832.

Xia, H., Chen, J., Wei, P., Xia, C., Roeck, G.D. & Degrande, G. (2009). Experimental investigation of railway train-induced vibrations of surrounding ground and a nearby multi-story building. *Earthquake Eng. Eng. Vibr*. 8(1):137–148.

Xia, H., Zhang, N. & Cao, Y.M. (2005). Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings. *J Sound Vib*. 280(3–5):1017–29.

Xu, R., Li, X., Yang, W., Rabiei, M., Yan, C. & Xue, S. (2019). Field measurement and research on environmental vibration due to subway systems: A case study in eastern China", *Sustainability*. 11(23):6835.

Yang, B.Y. & Hung, H.H. (2001). A 2.5D finite/infinite element approach for modeling viscoelastic bodies subjected to moving loads. *Int. J. Numer. Method. Eng*. 51(11):1317-1336.

Yang, J., Li, P. & Lu, Z. (2018). Numerical simulation and in-situ measurement of ground-borne vibration due to subway system. *Sustainability*. 10(7):2439.

Yang, L., Powrie, W. & Priest, J. (2009). Dynamic stress analysis of a ballasted railway track bed during train passage. *J Geotech Geoenviron Eng*. 135(5):680–689.

Yang, Y.B., Hung, H.H. & Chang, D.W. (2003). Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation. *Soil Dyn Earthq Eng*. 23(4):263-278.

Yang, Y.B., Hung, H.H. & Chang, D.W. (2003). Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation. *Soil Dyn Earthq Eng.* 23(4):263-278.

Yeşim, Ü., (2016), *Factors affecting soil damping*, (Master Thesis), Istanbul Technical University, Istanbul.

Yıldıray, Y. (2000). Beklenen büyük marmara depremi. *Sınır Ötesi Yayınları*, s. 54-64.

Zhai, W., He, Z. & Song, X. (2010). Prediction of high-speed train induced ground vibration based on train track-ground system model. *Earthq Eng Eng Vib*. 9(4):545–554.

Zhai, W.M., Wei, K., Song, X.L. & Shao, M.H. (2015). Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track. *Soil Dyn Earthq Eng*. 72: 24–36.

Zhang, L., Feng, Q. (2011). Experimental analysis on ground vibration generated by high-speed train. *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*, Chengdu, China.

Zhang, Z., Ma, F. & Zhang, B. (2018). Vibration measurement of long-span floors in high-speed railway station. *Journal of Vibroengineering*. 20(7):2705-2719.

Zhao, Y. & Liu Z. (2018). Study of material composition effects on the mechanical properties of soil-rock mixtures. *Advances in Civil Engineering*. Hindawi, Article ID 3854727.

Zou, C., Wang, Y. & Tao Z. (2020). Train-induced building vibration and radiated noise by considering soil properties. *Sustainability*. 12(3):1-17.

Zou, C., Wang, Y. & Tao Z. (2020). Train-induced building vibration and radiated noise by considering soil properties. *Sustainability*. 12(3):937.

Zou, C., Wang, Y., Wang, P. & Guo, J. (2015). Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot. *Sci. Total Environ*. 761–773.