

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZLI TRENLERİN ÇEVRE YAPILARDA  
OLUŞTURDUĞU TİTREŞİMLERİN ÖNLENMESİ  
İÇİN BARIYER SİSTEMLERİN ETKİNLİĞİNİN  
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Fatih GÖKTEPE**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ**

**Aralık 2013**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI TRENLERİN ÇEVRE YAPILARDA  
OLUŞTURDUĞU TİTREŞİMLERİN ÖNLENMESİ  
İÇİN BARIYER SİSTEMLERİN ETKİNLİĞİNİN  
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

FATİH GÖKTEPE

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

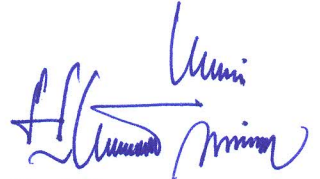
Bu tez 30 / 12 / 2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
GÜLGÜN YILMAZ  
JÜRİ BAŞKANI



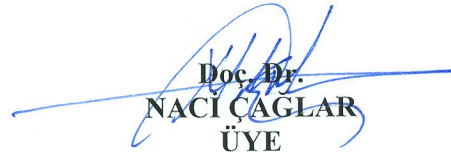
Prof. Dr.  
ADEM DOĞANGÜN  
ÜYE



Prof. Dr.  
ERKAN ÇELEBİ  
ÜYE



Prof. Dr.  
MURAT UTKUCU  
ÜYE



Doc. Dr.  
NACI ÇAĞLAR  
ÜYE

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde engin tecrübelerini benimle paylaşan, her zaman destek ve teşviklerini gördüğüm hocam sayın Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, tez çalışmalarımın farklı aşamalarında yardımlarını gördüğüm sayın Prof. Dr. Murat UTKUCU ve sayın Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde emeği geçen, hayatımın her türlü aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek yanımda olan kıymetli annem ve babam Zeynep-Mevlüt GÖKTEPE başta olmak üzere tüm aileme şükranlarımı arz ederim. Tez çalışmalarımın en yoğun dönemlerinde yanımda olan değerli eşim Fatma Duygu GÖKTEPE'ye gösterdiği anlayıştan ötürü müteşekkirim. Son olarak, doktora sürecinin son aşamalarında aramıza katılarak moral kaynağımız olan oğlum Muhammed Said GÖKTEPE'ye teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. İlgili Çalışmalar.....	4
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	15
BÖLÜM 2.	
ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA YAYILIŞI VE ZEMİN-YAPI ORTAK SİSTEMİNDE KULLANILAN NÜMERİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ.....	18
2.1. Zemin Ortamında Dalga Yayılışı.....	18
2.1.1. Cisim dalgaları.....	19
2.1.2. Yüzey dalgaları.....	23
2.1.3. Zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesi.....	26
2.2. Zemin-Yapı Ortak Sisteminin Çözümlemesi.....	28
2.2.1. Altsistem yaklaşımı yöntemi.....	29
2.2.1.1. İnce Tabaka/Esnek Hacim yöntemiyle idealleştirme.....	31

2.2.1.2. Empedans fonksiyonları kullanılarak idealleştirme.....	33
2.2.2. Doğrudan çözüm yaklaşımı yöntemi.....	36
2.2.2.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi.....	38
2.2.2.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme.....	40
<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>ZEMİN-YAPI ORTAK SİSTEMİNİN DALGA YAYILIM PROBLEMİ İÇİN ÖNERİLEN SONLU ELEMAN YÖNTEMİ VE MODELİN DOĞRULANMASI.....</b>	
3.1. Dinamik Yük Kaynağı.....	42
3.1.1. Türkiyede yüksek hızlı tren projeleri.....	42
3.1.2. Elastik yatağa oturan sürekli kirişlerin çözümü.....	44
3.1.3. Hareketli yükün modellenmesi ve zaman bölgesinde çözümü.....	47
3.1.4. Frekans bölgesinde çözüm.....	53
3.2. Sonlu Eleman Analizlerine Etki Eden Faktörler.....	56
3.2.1. Genel modelleme özellikleri.....	57
3.2.2. Malzeme davranış modelleri.....	60
3.2.2.1. Lineer elastik model.....	60
3.2.2.2. Doğrusal olmayan malzeme davranışı.....	61
3.3. Dalga Yayılım Problemi İçin Geliştirilen Sonlu Eleman Yöntemi ve Modelin Doğrulanması.....	66
3.3.1. Analizde kullanılan malzeme davranış modelleri ve sonlu eleman türleri.....	66
3.3.2. Uygulanan sonlu eleman ağ yapısı.....	68
3.3.3. Courant koşulunun sağlanması.....	71
3.3.4. Sınır koşullarının belirlenmesi.....	72
3.3.5. Rayleigh sönüm parametrelerinin tanımlanması.....	74
3.4. Matematik Modelin Kalibrasyonu.....	77

BÖLÜM 4.	
DALGA BARIYER MODELLERİ KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI TRENLERİN YAPILARDA OLUŞTURDUĞU TİTREŞİM ETKİLERİNİN AZALTILMASI VE SAYISAL UYGULAMA.....	82
4.1. Yapay Anakaya Uygulaması.....	83
4.1.1. Yapay kayanın konumlandırılacağı kritik derinlik tespiti.....	86
4.1.2. Optimum kesit boyutlarının belirlenmesi.....	96
4.1.3. Yapay taban empedans kontrastının yapısal davranışa etkisi.....	107
4.1.4. Demiryolu üstyapı rijitliğinin yapısal davranışa etkisi.....	112
4.2. Düşey Dalga Bariyeri Uygulaması.....	115
4.2.1. Tek düşey dalga bariyeri.....	116
4.2.1.1. İçi boş durum.....	118
4.2.1.2. İçi dolu durum.....	121
4.2.2. Ardışık düşey dalga bariyer düzeneği.....	131
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ.....	150

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\gamma$	: Birim hacim ağırlık
$\rho$	: Birim hacim kütlesi
$\rho_i$	: Zemin tabakasının öz direnci
$\nu$	: Poisson oranı
$\varphi$	: Kayma direnci açısı
$\psi$	: Şişme açısı
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$\alpha$	: Rayleigh malzeme sönümü için kütle matrisi katılım katsayısı
$\beta$	: Rayleigh malzeme sönümü için rijitlik matrisi katılım katsayısı
$\omega$	: Titreşim kaynağının açısal frekansı
$\xi$	: Malzeme sönüm katsayısı
$\sigma_n$	: Normal gerilme
$\sigma_1$	: Maksimum asal gerilme
$\sigma_2$	: Minimum asal gerilme
$\theta$	: Dalgaların sınırlara geliş açısı
$\alpha_i$	: Zemin tabakasının eğimi
$\mu_i$	: Süseptibilite katsayısı (manyetiklik miktarı)
$\dot{u}_i$	: Partikül hızı
$\gamma_{ox}, \gamma_{oy}, \gamma_{oz}$	: Temel plağının dönme bileşenleri
$\lambda$	: Dalga boyu
$\lambda_{min}$	: En kısa dalga boyu
$\Gamma_1, \Gamma_2$	: Elastik bölgenin sınırları
$\Omega$	: Elastik bölgeyi temsil eden simge
$\bar{\bar{t}}_l(x, \omega)$	: Elastik bölgenin yüzeyinde öngörülen gerime sınır koşulları
$\bar{\bar{u}}_l(x, \omega)$	: Elastik bölgenin yüzeyinde öngörülen yerdeğiştirme sınır koşulları

$\Delta h$	: Sonlu eleman boyutu
$\Delta t$	: Hesap zaman adım aralığı
$\{\ddot{u}\}$	: İvme vektörü
$\{\dot{u}\}$	: Hız vektörü
$\{u\}$	: Yerdeğiştirme vektörü
$[C]$	: Malzeme sönüm matrisi
$[C_b]$	: Sınır integral matrisi
$[K]$	: Sisteme veya bir bölgesine ilişkin rijitlik matrisi
$[M]$	: Kütle matrisi
$a_o$	: Boyutsuz frekans parametresi
$A_{wi}$	: Dalga azaltma oranı
$B$	: Zeminin gelen dalgaları büyütme miktarı
$B$	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin genişliği
$B_a$	: Yapay kaya kalınlığı
$c$	: Courant ölçütü
$c$	: Kohezyon
$c_b$	: Balast için sönüm katsayısı
$c_p$	: Basınç dalgası hızı
$c_s$	: Kayma dalgası hızı
$c_R$	: Rayleigh dalgasının yayılma hızı
$c_1, c_2$	: Viskoz sönümleyiciler için boyutsuz iyileştirme katsayıları
$D$	: Sönüm oranı
$D$	: Düşey dalga bariyerinin derinliği
$e$	: Boşluk oranı
$E$	: Demiryolu balast yatağı rijitliği
$E$	: Elastisite modülü
$f$	: Dinamik fleksibilite matrisi
$f$	: Frekans
$f_{maks}$	: En büyük frekans değeri
$F_z$	: Dingil yükü
$G$	: Kayma modülü
$G_i$	: Gravitasyon çekimi



$h_i$	: Zemin tabaka kalınlığı
$H$	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin yüksekliği
$H_a$	: Yapay kayanın konumlandırıldığı derinlik
$H_t$	: Temel derinliği
$IR$	: Empedans kontrastı
$I_1$	: Gerilme tansörünün birinci invaryantı
$J_2$	: Deviator tansörünün ikinci invaryantı
$k_b$	: Balast için rijitlik katsayısı
$k_\alpha$	: $\alpha$ titreşim moduna karşı gelen boyutsuz rijitlik katsayısı
$K$	: Zemin yatak katsayısı
$K_\alpha$	: $\alpha$ titreşim moduna karşı gelen empedans fonksiyonu
$l$	: Demiryolu üstyapısının binadan uzaklığı
$L$	: Elastik boy uzunluğu
$L$	: Düşey dalga bariyerinin binadan uzaklığı
$L_a$	: Yapay kaya uzunluğu
$L_R$	: Rayleigh dalgasının dalga boyu
$P(t)$	: Uygulanan hızlı tren yükü
$R_i$	: Dalga yansımaya katsayısı
$R_{inter}$	: Yapı-zemin arayüzeyi dayanım azaltma katsayısı
$[S_I]$	: Temel empedans matrisi
$T$	: Periyot
$T_i$	: Dalga iletim katsayısı
$u_{ox}, u_{oy}, u_{oz}$	: Temel plağının öteleme yerdeğiştirme bileşenleri
$U_{xa}$	: Serbest zemin yüzeyinde seçilen noktadaki yatay yerdeğiştirme
$U_{XA}$	: Bina tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirme
$U_{XB}$	: Dinamik yükün altındaki yatay yerdeğiştirme
$U_{YB}$	: Dinamik yükün altındaki düşey yerdeğiştirme
$V$	: Yüksek hızlı trenin seyahat hızı
$V_{xa}$	: Serbest zemin yüzeyinde seçilen noktadaki yatay hız
$W$	: Düşey dalga bariyerinin genişliği
$X$	: Düşey dalga bariyerleri arasındaki mesafe

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Hareketli yüklerin demiryolu üstyapısında ve çevre yapılarda oluşturduğu titreşim etkileri (Buonsanti ve diğ., 2009).....	1
Şekil 1.2. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için dalga bariyer modelleri.....	3
Şekil 2.1. Dalga Şeması (Yıldırım, 2000).....	19
Şekil 2.2. P-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996).....	20
Şekil 2.3. S-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996).....	21
Şekil 2.4. SH-dalgası ve SV-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996).....	21
Şekil 2.5. Love dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996).....	23
Şekil 2.6. Rayleigh dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996).....	24
Şekil 2.7. Rayleigh dalgası ve cisim dalgası yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi (Kramer, 1996).....	25
Şekil 2.8. Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey hareketi (Kramer, 1996).....	26
Şekil 2.9. Yapı-zemin etkileşimi modeli.....	29
Şekil 2.10. Altsistem yaklaşımı yönteminde kullanılan yapı-zemin sistemi.....	30
Şekil 2.11. İnce Tabaka/Esnek Hacim çözüm tekniğinde altsistem yaklaşımı (Çelebi, 2006a).....	32
Şekil 2.12. Elastik yarı uzayda rijit cisim modeli (Çelebi ve diğ., 2006a).....	34
Şekil 2.13. Doğrudan çözüm yaklaşımı yönteminde kullanılan yapı-zemin sistemi.....	36
Şekil 2.14. Viskoz sönümleyici sınırlar.....	41
Şekil 3.1. Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesi kesimleri gösterimi (Demirezer, Anonim).....	43
Şekil 3.2. Yüksek hız trenlerinin yük simülasyonu için analitik model.....	44
Şekil 3.3. Elastik yatak üzerindeki yüzey yerdeğiştirmeleri (a) Winkler elastik yatak modeli (b) Elastik üç boyutlu yatak modeli (Cook ve Young, 1985).....	45
Şekil 3.4. Elastik yatağa oturmuş sonsuz uzunluktaki giriş (Boresi ve diğ., 1993)..	45

Şekil 3.5. Elastik zemine oturan bir kiriş üzerinde bulunan tekil kuvvetin zeminle arakesitinde meydana getirdiği gerilme diyagramı (Verbic, 1996).....	48
Şekil 3.6. Darbe etkisinin Fourier dönüşümü (Verbic, 1996).....	49
Şekil 3.7. Sonsuz kirişe ait düşey doğrultuda çökme değerlerinin sonlu elemanlar ile klasik yöntem çözümlerinin karşılaştırılması (Güler, 1998).....	50
Şekil 3.8. Traverslere aktarılan tekil kuvvetler ve eşdeğer kuvvet diyagramı.....	52
Şekil 3.9. Lokomotifin tekerlek aksları arasındaki mesafe ve tesir kuvvetlerinin dağılımı.....	52
Şekil 3.10. Tesir kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi ( $V=69,44 \text{ m/sn}$ ).....	53
Şekil 3.11. Fourier dönüşümünde kullanılacak olan fonksiyonun bir döngüsünün zamana bağlı değişimi ve tüm hareketinin periyodik davranışı.....	55
Şekil 3.12. Yük fonksiyonu ile hızlı Fourier dönüşümünde kullanılan terim sayısı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 3.13. Katar yükünün frekans spektrumu ( $V=250 \text{ km/h}$ ).....	56
Şekil 3.14. Dalga engelleyiciler kullanarak üstyapı titreşim etkilerinin azaltılması (a) Düşey dalga bariyeri (b) Dalga engelleyici yapay anakaya.....	58
Şekil 3.15. (a) 6-düğüm noktalı (b) 15-düğüm noktalı üçgen eleman sonlu eleman tipi.....	59
Şekil 3.16. Elasto-plastik davranış.....	61
Şekil 3.17. Mohr-Coulomb akma kriteri.....	62
Şekil 3.18. Drucker-Prager, Mohr-Coulomb ve von Mises akma yüzeyleri (Calayır ve Karaton, 2004).....	64
Şekil 3.19. Drucker-Prager akma kriteri (Chen, 1988).....	65
Şekil 3.20. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin kıyaslanması (a) asal gerilme uzayında (b) deviatör düzlemde (Chen, 1988).....	66
Şekil 3.21. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli (yalıtımsız model).....	70
Şekil 3.22. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Rayleigh sönümü orantı sabitlerine bağlı zaman geçmişi (a) $\alpha=0.1$ ve $\beta$ =değişken (b) $\alpha=0.01$ ve $\beta$ =değişken (c) $\alpha=0.001$ ve $\beta$ =değişken.....	75
Şekil 3.23. Zemin yüzeyinde seçilen bir noktada düşey yerdeğiştirmenin önerilen model büyüklüğüne bağlı zaman geçişinin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	78

Şekil 3.24. Elde edilen sonlu eleman sonuçlarının teorik çözümle karşılaştırılması .	80
Şekil 3.25. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin lineer elastik ve elasto-plastik zemin malzeme modellerine göre karşılaştırılması (yalıtımsız model) ...	81
Şekil 4.1. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için yapay anakaya modeli (a) aktif yalıtım durumu (b) pasif yalıtım durumu.....	84
Şekil 4.2. Sönümsüz durum için yatay yerdeğiştirmenin serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi (yalıtımsız durum) .....	87
Şekil 4.3. Sönümlü durum için yatay yerdeğiştirmenin serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi (yalıtımsız durum) .....	87
Şekil 4.4. Geliştirilen sayısal modelin yarı uzay ve anakaya tabanlı şematik gösterimi .....	88
Şekil 4.5. Sönümsüz durum için yatay hızın serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi (aktif yalıtım) .....	89
Şekil 4.6. Sönümsüz durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı (aktif yalıtım).....	91
Şekil 4.7. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı (aktif yalıtım).....	92
Şekil 4.8. Sönümsüz durum için yatay hızın serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi (pasif yalıtım) .....	93
Şekil 4.9. Sönümsüz durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı (pasif yalıtım) .....	94
Şekil 4.10. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı (pasif yalıtım).....	95
Şekil 4.11. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya kalınlığına bağlı olarak dalga azaltma oranı (aktif yalıtım) .....	96
Şekil 4.12. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya uzunluğuna bağlı olarak dalga azaltma oranı (aktif yalıtım) .....	97
Şekil 4.13. Dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga perdeleme oranı (aktif yalıtım) .....	99
Şekil 4.14 Dalga engelleyici yapay kaya kalınlığına bağlı olarak dalga perdeleme oranı (aktif yalıtım) .....	100
Şekil 4.15. Dalga engelleyici yapay kaya uzunluğuna bağlı olarak dalga perdeleme oranı (aktif yalıtım) .....	101

Şekil 4.16. Dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım).....	102
Şekil 4.17. Dalga engelleyici yapay kaya kalınlığına bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım).....	103
Şekil 4.18. Dalga engelleyici yapay kaya uzunluğuna bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım).....	104
Şekil 4.19. Dalga engelleyici yapay kayanın temel derinliğine bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım) .....	106
Şekil 4.20. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin farklı empedans oranlarına bağlı zaman geçmişi (aktif yalıtım).....	108
Şekil 4.21. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin farklı empedans oranlarına bağlı zaman geçmişi (pasif yalıtım) .....	110
Şekil 4.22. Demiryolu üstyapısının dūşey yerdeğiştirmesinin farklı empedans oranlarına bağlı zaman geçmişi.....	111
Şekil 4.23. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin demiryolu üstyapısının farklı rijitlik değerlerine bağlı zaman geçmişi .....	113
Şekil 4.24. Demiryolu üstyapısı dūşey yerdeğiştirmesinin demiryolu üstyapısının farklı rijitlik değerlerine bağlı zaman geçmişi .....	114
Şekil 4.25. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için dūşey dalga bariyer modeli.....	117
Şekil 4.26. Dalga engelleyici içi boř dūşey bariyerin (a) derinlik ve (b) genişliğine bağlı dalga perdeleme oranı .....	118
Şekil 4.27. Dalga engelleyici dūşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi (içi boř bariyer) .....	120
Şekil 4.28. Dalga engelleyici içi dolu dūşey bariyerin derinliğine bağlı dalga perdeleme oranı .....	122
Şekil 4.29. Dalga engelleyici içi dolu dūşey bariyerin genişliğine bağlı dalga perdeleme oranı .....	123
Şekil 4.30. Dalga engelleyici dūşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi (beton bariyer).....	125
Şekil 4.31. Dalga engelleyici dūşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi (bentonit bariyer 1).....	126
Şekil 4.32. Dalga engelleyici dūşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi (bentonit bariyer 2).....	127

Şekil 4.33. Dalga engelleyici düşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi (bentonit bariyer 3).....	128
Şekil 4.34. Dalga engelleyici düşey bariyerin farklı empedans oranlarına bağlı yerdeğiştirme-zaman ilişkisi .....	130
Şekil 4.35. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için ikili düşey dalga bariyer modeli ...	132
Şekil 4.36. Dalga engelleyici ikili düşey bariyerin farklı formasyonları için yerdeğiştirme-zaman ilişkisi .....	133

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Poisson sınıflaması ve cisim dalgası hız oranı karşılaştırması (Bormann ve diğ. 2009).....	22
Tablo 2.2. Zemin dinamik özelliklerinin ölçülmesi (Çelebi ve diğ., 2008) .....	27
Tablo 3.1. Demiryolu taşıtı ve hattının mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009) .	47
Tablo 3.2. Zemin ortamının mekanik özellikleri .....	67
Tablo 3.3. Üstyapıların mekanik özellikleri.....	68
Tablo 3.4. Dalga tipine bağlı olarak teorik geometrik azalım katsayıları (Kim ve Lee, 1998).....	80
Tablo 4.1. Beton malzeme özellikleri .....	83
Tablo 4.2. Bentonit malzemesi özellikleri (Adam ve Estorff, 2004) .....	121

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Yapay Anakaya, Düşey Dalga Bariyeri, Doğrusal olmayan Malzeme Davranışı, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yutucu Sınırlar

Hızlı demiryolu hattına yakın yapıları yumuşak zemin koşullarında taşınan kuvvetli titreşimlerden korumak için düşey dalga bariyeri veya dalga engelleyici yapay anakaya modeli inşaat mühendisliğinin pratik uygulamalarında kullanılmaktadır. Dalga bariyerlerinin titreşim kaynağının yakınına yerleştirilmesi aktif yalıtım yapıldığını, titreşim kaynağının uzağında, korunacak yapının yakınında yer alması ise pasif yalıtım yapıldığını göstermektedir.

Bu çalışmanın öncelikli hedefi hızlı tren trafiğinin ürettiği titreşimleri ve dalga bariyerinin yerleştirilmesi ile çevre binalardaki etkilerinin azaltılmasına ilişkin çözümleri, yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkilerinin de kapsayan bir dalga yayılım problemi olarak ele alıp, ayrık sayısal çözüm yöntemlerinden yararlanarak idealize edebilmektir. Sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılması ve buna bağlı olarak radyasyon koşulunun sağlanması kesim noktalarında uygun sınır koşullarının yazılarak geometrik sönümün probleme dahil edilmesi ile mümkündür. Bu amaçla, problemin arazi koşullarını gerçeğe yakın temsil eden malzeme yaklaşımlarına dayanan ve zeminin geometrik sönümünün hesaba katıldığı sayısal model, iki boyutlu düzlem şekil değiştirme koşulları altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak zaman tanım alanında yapılan çözümlerinde dinamik yük kaynağı olarak, Türkiye'nin yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan lokomotiflerin  $V=250 \text{ km/h}$  geçiş hızına ait demiryolu platformuna uyguladığı yük fonksiyonu kullanılmıştır. Zemin ortamının doğrusal olmayan mekanik davranışını temsil etmek için, Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme modeli tercih edilmiştir.

Geliştirilen yapı-zemin-dalga bariyer sisteminin matematik simülasyonu ile, yüksek hızda hareket eden tren yüklerinin özellikle taşıma gücü açısından zayıf, alüvyon zeminlerde neden olduğu kuvvetli dalga yayılımı ve sonucunda yapı-zemin dinamik etkileşimi problemi analiz edilerek en uygun yalıtım aracı belirlenmiştir. Dalga bariyerinin ideal boyutlarının ve tesis edileceği yerin belirlenerek yalıtım performansı açısından en uygun dolgu malzemesinin seçimi, kapsamlı parametrik çalışmalar yürütülerek araştırılmıştır.



# **THE PARAMETRIC PERFORMANCE INVESTIGATION OF THE BARRIER SYSTEMS FOR THE PREVENTION OF THE INDUCED VIBRATIONS DUE TO HIGH SPEED TRAINS IN THE NEARBY STRUCTURES**

## **SUMMARY**

**Key Words:** Artificial Bedrock, Open/In-Filled Trench Barrier, Nonlinear Material Behavior, Finite Element Method, Absorbing Boundaries

To protect structures nearby high-speed railway track from soft ground transmitted strong vibrations, trench barrier or artificial bedrock wave impeding model can be used in civil engineering practical applications. Installation of wave barriers nearby the vibratory source indicates the active (near field) isolation, whereas the placement away from the vibratory source nearby the structure to be protected from incoming waves indicates passive isolation.

The primary objective of this study is to deal with railway traffic induced vibrations and associated solutions to reduce its influence on surrounding structures by installation of wave barriers as wave propagation problems including soil-structure interaction, and then to idealize by utilizing discrete numerical solution methods. Discretization of finite-soil and preparing radiation condition which depends on discretization is possible by adding geometric damping into problem at cut off points with defined suitable boundary conditions. To this end, approaches to the problem based on material representing in-situ soil condition close to reality and a numerical model that takes into account the geometrical damping of a soil were obtained by using the finite element method under the two-dimensional plane-strain conditions.

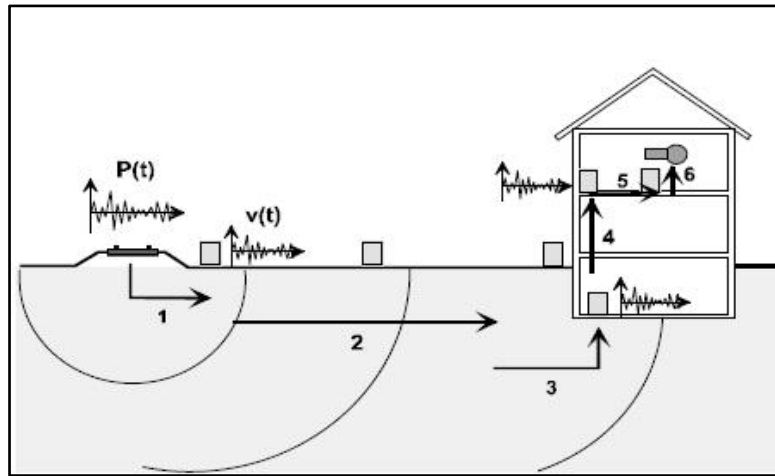
In the time domain analysis using the finite element method, the high speed train load function on the slab track is simulated corresponding to railway engine passing with a velocity of *250 km/h* on the Turkish high-speed rail lines. To represent the non-linear mechanical behavior of a soil environment, the elasto-plastic material model has been preferred under Mohr-Coulomb yield criterion.

The most optimum wave impeding barrier is achieved by mathematical simulation of the developed soil-structure-wave barrier system, strong ground motion particularly weak in terms of carrying capacity in alluvial soils induced by high speed train moving loads and analyzing soil-structure dynamic interaction problem as a result. Determining the ideal size and the localization of the wave barrier, the selection of backfill material based on the screening performance, is investigated by carrying out extensive parametric studies.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Problemin Tanımı

Kuvvetli yer hareketi dışında yüksek frekansa sahip yüksek hızlı trenlerin yoğun trafiği sırasında meydana gelen dinamik yüklemelerin çevreye verdiği gürültü ve rahatsızlık verici titreşimler ülkemizin de içinde bulunduğu modern kent topluluklarında tartışılır olmuştur. Dinamik yük kaynağının meydana getirdiği titreşimlerin yumuşak zemin ortamında yayılışı ve yoğun yerleşim bölgelerindeki yapı temelleriyle etkileşimi hassas ekipmanlarda işlevsel bozukluklara, yakın binalarda hasarlara sebep olarak insanların güvenli yaşam konforunu bozmaktadır (Şekil 1.1). Bu nedenle çevreyi titreşim kaynaklarının ürettiği kuvvetli yer hareketlerinden korumak için en uygun yalıtım aracının belirlenmesi, elastik ve elasto-plastik olarak idealleştirilen zemin bölgesinde dalga yayılışının iyi anlaşılmasını gerektirir. Zemin ortamındaki bu titreşim hareketlerinin üst yapıdaki dinamik etkilerinin araştırılması yapı, geoteknik ve ulaştırma mühendisliğinin ortak çalışma alanını oluşturmaktadır.



Şekil 1.1. Hareketli yüklerin demiryolu üstyapısında ve çevre yapılarda oluşturduğu titreşim etkileri (Buonsanti ve diğ., 2009)

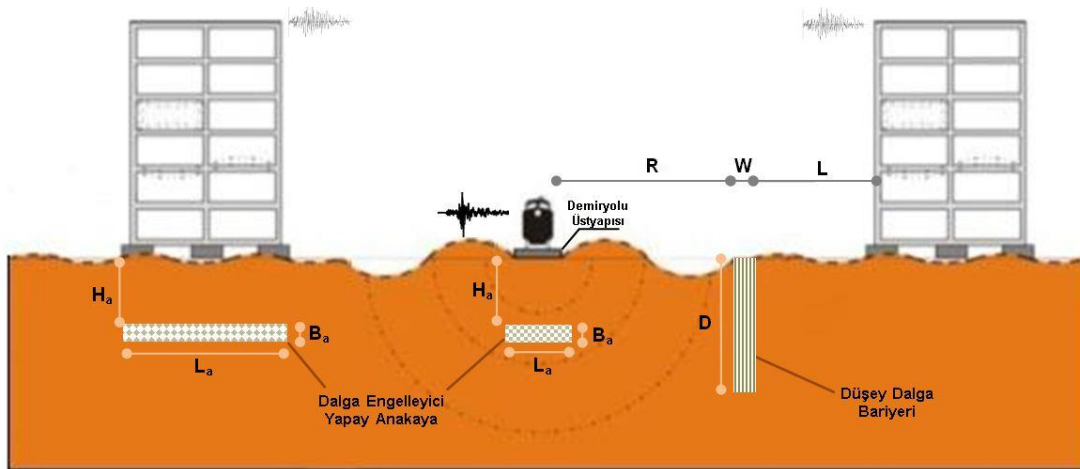
Yüksek hızlı trenlerin geçişinden dolayı demiryolu üstyapısı ve çevre zeminde meydana getirdiği titreşimlere maruz kalan önemli yapı sistemlerinin zeminle ortak davranışını incelemek ve oluşabilecek problemlere karşı çözüm önerisi sunmak amacıyla geliştirilen matematik modellerin kullanımı günümüzde gittikçe önem kazanmıştır. Yüksek-hız tren teknolojisi araştırmalarının çoğu sadece yolcuların seyahat konforunu sağlamak amacıyla değil, bununla birlikte demiryolu ağının içinden geçtiği yoğun yerleşim bölgelerinde yaşayanların maruz kalabileceği gürültü kirliliğinden ve bu kuvvetli yer hareketlerinin güzergâha yakın yapılardaki hasar verici etkilerinin azaltılması çalışmalarını da kapsamaktadır.

Hızlı demiryolu taşımacılığına sahip birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi, ülkemizde de yolcu taşımacılığındaki trafik akış hızları  $V=250 \text{ km/h}$  değerlerine ulaşacak şekilde planlanmış, yolcu ve yük taşımacılığındaki dingil yükleri  $180-225 \text{ kN}$  olarak tasarlanmıştır. Yüksek-hızlı demiryolu hatlarında tren geçişlerinin, demiryolu üstyapısında, altyapısında ve çevre yapılarda oluşturduğu kuvvetli yer titreşimlerinin incelenmesi, yapı temellerinde hasar yapıcı ve insanlarda rahatsızlık verici etkilerinin azaltılması ve en uygun demiryolu üstyapı tasarımının gerçekleştirilmesi günümüzde inşaat mühendisliğinin önemli bir konusu olmuştur. Bu alanda kapsamlı ve yoğun araştırmaların gerekliliği, özellikle ülkemizin taşıma gücü zayıf, alüvyon zemin ortamlarından geçirilen yüksek hızlı modern demiryolu hatları (Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesi) için güncelliğini korumaktadır.

Trafik yüklerini ve hareket hızlarını sürekli artırarak değiştiren yüksek-hız trenlerinin demiryolu üstyapısı ve altındaki zeminde meydana getirmiş oldukları dinamik etkiler, yüzey (Rayleigh ve Love dalgaları) ve cisim dalgaları (kayma ve basınç dalgaları) vasıtasıyla çevreye yayılmaktadır. Titreşim enerjisinin büyük bir bölümü ise Rayleigh yüzey dalgaları tarafından taşınmaktadır. Bazı yumuşak zemin koşullarında ölçülen kayma dalgası yayılma hızlarının düşük değerlerde olduğu düşünüldüğünde, bu taşıma gücü zayıf zeminlerden geçen yüksek-hızlı demiryolu hatlarındaki tren hızlarının bu değerlere ulaşması demiryolu ve çevresinde kuvvetli yer hareketleri ve bunun sonucunda hasar yapıcı titreşimler oluşturacaktır.

Demiryolu alt yapısında en büyük yerdeğişirmelere neden olan hareketli yük hızı, kritik hız olarak tanımlanmaktadır. Hareketli yükün doğrudan zemin yüzeyine tesir ettiği düşünüldüğünde, bu kritik hızın Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılış hızına özdeş olduğu durumlarda rezonans denilen fenomen görülecektir. Rezonans durumunda dinamik gerilmeler ve deplasmanlar çok fazla artmaktadır. Bu durumda demiryolu üstyapısını özellikle yüzey dalga yayılış hızının küçük değerler aldığı alüvyon zemin koşullarında balastlı oluşturmak yerine balastsız rijit yatak olarak inşa etmek, kritik hız değerinin artırılması için alınacak bir önlemdir. Tren hızlarının bu kritik hızdan yüksek olması, büyük genlikli titreşimlerin altyapıda oluşmamasını sağlayacaktır.

Bunun dışında, kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için korunacak yapının etrafına, dalga geliş doğrultusuna veya korunacak yapının altına uygun derinliklerde çeşitli yalıtım araçlarının yerleştirilmesi etkili bir çözüm olarak sunulabilir. Böylece yüksek hız trenlerinin neden olduğu kuvvetli yer titreşimlerinin zemin ortamında yayılmasında, dalgaların soğurulmasını, yansımalarını veya kırılmasını sağlayarak etkilerini azaltmak ve geciktirmek, dalganın yapıya kuvvetli bir şekilde ulaşmasını engellemek mümkün olabilmektedir. Dalga bariyerlerinin titreşim yayılımlarını azaltması aktif yalıtım, korunacak yapının ortamdaki titreşim etkilerinden korunması ise pasif yalıtım yapıldığını göstermektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için dalga bariyer modelleri

Bu çalışmanın amacı, yoğun yerleşim bölgelerinden geçirilen ve zayıf zeminlerde inşa edilen hızlı demiryolu hatları için karşılaşılması kuvvetle muhtemel olan rezonans durumundaki hasar verici titreşimlerden, yolun ve çevre yapıların korunmasında kullanılacak dalga bariyerinin ideal boyutlarının ve yerinin belirlenerek en uygun bariyer iç dolgu malzemesinin saptanmasıdır. Çevre yapılar da hasar yapıcı titreşim etkilerinin azaltılması için yenilikçi çözüm önerileri sunulmasının inşaat mühendisliği alanında bu tip problemler için büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

## 1.2. İlgili Çalışmalar

Son otuz yılda Avrupa'nın gelişmiş kentlerinde ve yakın gelecekte ülkemizde, demiryolu ulaşımında hem hız hem de ağır yük ve yolcu taşımacılığındaki artışla birlikte bunların çevreye verdiği gürültü ve konfor bozucu titreşimler tartışılır olmuştur. Literatürde dalga kaynaklarının oluşturduğu zararlı titreşimlerin yalıtımında kullanılan dalga bariyerleri ile ilgili birçok analitik, deneysel ve uygulanmış çalışma örnekleri ortaya konulmuştur. Demiryolu üstyapısı ile alt zemin arasındaki yapı-zemin dinamik etkileşiminin daha iyi anlaşılabilmesi ve nümerik modellerin geliştirilmesi amacıyla farklı sayısal çözüm yaklaşımları (Krylov, 1996; Verbic ve diğ., 1997; Massarsch, 2000) analitik çözüm yolları (Petyt ve Jones, 1999; Hung ve Yang, 2001) ve deneysel araştırmalar (Yoshioka, 2002) yapılmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi, zemin bölgesinin etkisiyle üstyapının periyot ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerinde değişiklikler yapması ve üstyapıdaki titreşim enerjisinin önemli bir kısmının, zemine mesnetlenmenin rijit olmaması, zemin bölgesindeki sönüm ve yayılım gibi olayların incelenmesi olarak ele alınmaktadır. Yapı-zemin etkileşim problemlerinde zemin ortamının idealleştirilmesi için "Doğrudan çözüm yaklaşımı (Direkt metot)" ve "Altsistem yaklaşımı" gibi iki temel yöntem kullanılmaktadır.

Doğrudan çözüm yaklaşımında üstyapı ile zeminin tek bir ortak sistem olarak sonlu eleman modeli ile idealleştirebildiği ve oluşturulan üstyapı-zemin ortak sisteminin, statik veya dinamik yüklemeler yapılarak, zaman tanım alanında analizi ile doğrudan

elde edilebilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemde zemin ve üstyapıdaki tüm geometrik ve mekanik özellikler ile doğrusal olmayan davranış uygun bir biçimde göz önüne alınabilir. Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin doğrudan çözüm yaklaşımı ile ele alındığı sistemlerde sonlu elemanlar yöntemine alternatif olarak kullanılan sınır elemanlar yöntemi veya hibrit metotlarda (sonlu ve sınır elemanlar yöntemlerinin ortak kullanımı) sonsuz, yarı-sonsuz veya çok büyük zemin bölgelerinin ayrıklaştırılması için kullanılan sayısal yaklaşımlar ile kalibrasyon hassasiyeti yüksek modeller geliştirilebilir. Zemin ortamının sonsuzluğunu tanımlayacak sınır şartlarının matematiksel formülasyonla kesin olarak yazılması problemin geometrisinin küçülerek radyasyon koşulunun sağlanmasına ve yaklaşıklık düzeyi yüksek çözümlerin daha kısa sürelerde elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Altsistem yaklaşımında ise, zemin ve üstyapı ayrı ayrı birer altsistem olarak düşünülüp, zeminin dinamik karakteristikleri olan rijitlik ve sönüm mekanizmaları belirlenerek üstyapıya olan etkileri araştırılır. Zemin ortamının üstyapıdan bağımsız bir sistem olarak incelenmesi ile üstyapı-zemin arakesitinde serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen yapı temellerinin davranışının incelenmesinde de efektif bir biçimde kullanılan dinamik empedans fonksiyonları yapının dinamik dengesinde göz önüne alınır (Aydınoglu, 2011).

Çelebi ve diğ. (2006a), elastik yarı-sonsuz zemine oturan rijit dikdörtgen temel plağının dinamik davranışını inceleyerek, temel ortamının dinamik rijitliğini tanımlayan empedans değerlerini temelin yüzeysel ve gömülü durumları için ayrı ayrı geniş bir frekans aralığı için elde etmişlerdir. Altsistem formülasyonu içerisinde sınır elemanlar yöntemiyle geliştirilen matematik model kullanılarak yapılan frekans bölgesindeki çözümlerinde, zemin altsistemi homojen, izotropik ve lineer elastik olarak ayrıklaştırılmıştır. Dikdörtgen rijit temelin bütün titreşim modları için elde edilen boyutsuzlaştırılmış rijitlik ve sönüm katsayıları analitik çözüme dayanan literatür sonuçlarıyla karşılaştırılarak modelin doğruluğu ortaya konulmuştur. Ayrıca bu çalışma, geoteknik deprem mühendisliği alanında yapı-zemin dinamik etkileşiminin dahil edildiği ileri düzey problemlerin deprem analizinde, farklı temel uygulamaları gerçekleştirebilmek ve yapı mühendislerine bu tip problemlerin çözümlerinde temel dinamiği hakkında yeterli bilgiler sunmak açısından önem taşımaktadır.

Kırtel (2013) tez çalışmasında, Adapazarı bölgesi için üstyapının deprem etkisindeki dinamik davranışına yerel zemin koşullarının doğrusal olmayan katkısını daha iyi tanımlayabilmek amacıyla temel-zemin arakesitindeki frekansa bağlı dinamik empedans fonksiyonlarını farklı titreşim modları için geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemin etkinliğini gösterebilmek amacıyla sayısal bir uygulamaya yer verilen çalışmada, seçilen köprü ayağı örneği farklı frekans içeriklerine sahip gerçek deprem kayıtları altında titreştirilerek, zeminin rijit, doğrusal elastik ve doğrusal olmayan malzeme koşulları altında incelenmiştir. Bununla birlikte, Adapazarı bölgesi için üstyapıların tasarımında kullanılmak üzere yatay ve düşey doğrultularda lineer elastik ve elasto-plastik malzeme davranışları için dinamik rijitlikler elde edilmiştir.

Dinamik yük kaynaklarının neden olduğu büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için, korunacak yapı ile titreşim kaynağı arasına uygun bir dalga bariyerinin yerleştirilmesi etkili bir çözüm olarak sunulabilir. Dalga engelleyicileri olarak içi boş bariyerler (hendek tipi dalga bariyeri) veya içi viskoz sıvı ile doldurulmuş ya da farklı katı malzemelerden imal edilmiş rijit ya da yarı-rijit bariyerler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak en uygun dalga bariyerinin tespit edilesi amacıyla birçok araştırmacı farklı çalışmalar yapmıştır.

Bu tür problemler için yapılan matematiksel çözümler basit geometri ve idealleştirilmiş koşullarla sınırlandırılmış mekanik modeller için ilk olarak Pao ve Mow (1963), Thau ve Pao (1966) tarafından gerçekleştirilmiştir. İmpuls yük kaynağının meydana getirdiği titreşim etkilerinin azaltılması amacıyla geliştirilen bariyerlerin sonlu farklar formülasyonları Abouidi (1973), Fuyuki ve Matsumoto (1980) tarafından ortaya konmuştur. Zeminlerdeki dalga yayılım problemleri için etkin biçimde kullanılan nümerik modeller yirminci yüzyılın başlarında ortaya çıkmıştır (Kausel, 1994; Bode ve diğ., 2002; Hildebrand, 2004).

Yüksek hız trenleri gibi dinamik yük kaynaklarının ürettiği büyük genlikli yer hareketlerinin önlenmesi veya azaltılabilmesi için titreşim yalıtım araçları ve etkileri ile ilgili literatürde sonlu eleman, sınır eleman ya da sınır integral yöntemlerine (Schmid ve Verbic, 1997; Adam ve diğ., 2000 a-b; Fiala ve diğ., 2007; Ju, 2007; Auersch, 2008) veya bu tekniklerin ortak kullanımına dayalı birçok sayısal

çözüm yaklaşımları (O'Brien ve Rizos, 2005; Çelebi, 2006b), analitik çözüm yolları (Barber, 1996; Bode ve diğ., 2002) ve deneysel çalışmalar (Barkam, 1962; Woods, 1968; Dolling, 1970; Ahmad ve Al-Hussaini, 1991; Ju ve Lin, 2008) ortaya konulmuştur. Zemin ortamında dalga yayılışını etkisizleştirmek için yalıtım araçları olarak gerek düşey dalga bariyerleri (Beskos ve diğ., 1986; Massarsch, 1994; Jones ve Block, 1996; Pflanz ve diğ., 2002; El Naggar ve Chehab, 2005; Buonsanti ve diğ., 2009; Howard ve Warren, 2009), gerek yatay dalga bariyerleri (Chouw ve Schmid, 1991; Chouw, 1994; Takemiya, 1998 a-b) ile ilgili çok sayıda araştırma sonuçları yayınlanmıştır. Zemin titreşimlerinin yapılara verebileceği hasarları azaltmak için palplanj tipi plaka şeklinde kazık duvarlarda kullanılmaktadır (Kattis ve diğ., 1999). Yukarıda değinilen yöntemlerin etkinliği ve uygulanabilirliği dalgaların karakterlerine ve zemin koşullarına bağlıdır (Haupt, 1981; Leung ve diğ., 1991; Al-Hussaini, 1992; Chouw ve Schmid, 1999; Zhang ve diğ., 2003; Valliappan ve Hakam, 2001).

Ahmad ve diğ. (1996) ağır makine temellerinin sebep olduğu yüksek frekanslı titreşimlerin yumuşak zemin koşullarında yayılımı ve yapı temelleriyle etkileşiminden kaynaklanan hassas aletlerdeki işlevsel bozukluklara çözüm önerisi olarak içi boş hendek tipi bariyer önermişlerdir. Sınır elemanlar yöntemi kullanılarak geliştirilen üç boyutlu model üzerinde yapılan parametrik araştırmalar sonucu dalga bariyerinin perdeleme performansını belirleyen en önemli faktörün Rayleigh dalga boyu olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte, farklı frekans değerleri için aktif ve pasif yalıtım durumunda dikdörtgen dalga bariyerlerinin etkili geometrik parametreleri Rayleigh dalga boyuna bağlı olarak elde edilmiştir.

Klein ve diğ. (1997) sınır elemanlar yöntemini kullanarak titreşimlerin azaltılması için kullanılan içi boş hendek tipi bariyerleri üç boyutlu olarak incelemiştir. Geliştirmiş oldukları sayısal model yardımıyla, farklı basınç dalga hızına sahip zemin ortamı için elde ettikleri sonuçları literatürdeki diğer analitik ve matematik modellerle karşılaştırarak modellerini doğrulamışlardır. Bununla birlikte, farklı yük etkileri altında Rayleigh tipi yüzey dalgalarının davranışını incelemiştir. Belirli frekans içeriklerine sahip harmonik karakterdeki dinamik yüklemelere bağlı olarak yapılan kapsamlı sayısal araştırmalar sonucu titreşimlerin azaltılmasında içi boş ve



açık hendek tipi dalga bariyerlerinin etkin bir biçimde kullanılabilceği gösterilmiştir.

Yang ve Hung (1997) tren yüklerinin neden olduğu titreşimleri önlemek için hendek tipi içi boş veya içi dolu dalga bariyer modeli ve elastik yapay kaya önermişlerdir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak geliştirilen iki boyutlu model üzerinde tren yükü harmonik karakterde olacak biçimde tanımlanmıştır. Elastik yarı sonsuz zemin ortamının sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmasında kesim noktaları için özel sınır koşulları kullanılarak geometrik sönüm hesaba katılmıştır. Analizlerde bariyerlerin geometrik özellikleri yanında farklı yoğunluk ve sönüm oranına sahip malzemeler ile dolu olması durumları için etkinliği araştırılmıştır. Yapılan parametrik araştırmalar dinamik yük kaynağına bağlı oluşan titreşim etkilerinin azaltılmasında yerel zemin koşullarına göre daha rijit olan hendek tipi düşey bariyerlerin performansının, düşük empedans kontrastına sahip bariyerlere oranla daha iyi olduğunu göstermiştir. Buna karşın, titreşim genliklerinin azaltılmasında içi boş ve daha düşük yoğunluklu yapay kaya uygulamalarının rijit olarak imal edilmiş yatay dalga engelleyicilerine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Yüksek frekans içeren titreşim etkilerinin yalıtımında yukarıda tanımlanan üç tip bariyerin etkin bir şekilde kullanılabilceğini göstermişlerdir.

Schmid ve Chouw (1998) dinamik yüklemelerin bölgesel zemin üzerindeki dalga yayılımını değiştirmek için zemin içerisine belirlenen bir rijitlikte, boyutlarda ve derinlikte katı bir kütle yerleştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Zemin ortamında farklı derinlik, genişlik ve uzunlukta tanımlanan bu katı kütle yapay bir ana kaya görevi üstlenmektedir. Zemine iletilen büyüklüklerin belirlenmesi, zemin-ankaya arasındaki sınır ve ince kalınlıklara sahip tabakaların tanımlanması ile mümkündür. Homojen, izotrop ve lineer elastik olduğu varsayılan yarı sonsuz zemin bölgesi, sınır elemanlar yöntemi kullanılarak idealleştirilmiştir. Üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Zemin titreşimlerinin binalara olan etkisini azaltmak amacıyla etkin bir biçimde kullanılan yatay dalga bariyerinin geometrik ve malzeme özellikleri değiştirilerek yalıtım için en uygun model belirlenmiştir.

Al-Hussaini ve diğ. (2000) yoğun trafik etkisine bağılı olarak ortaya çıkan büyük genlikli yer hareketlerinin etkilerini azaltmak için açık ve içi dolu bariyerler kullanmışlardır. Sınır elemanlar yöntemini kullanarak geliştirmiş oldukları nümerik modelde rahatsız edici titreşim etkilerini ortadan kaldırabilmek amacıyla farklı malzeme ve geometrik özelliklerine bağılı açık ve içi dolu hendek tipi bariyerler için kapsamlı parametrik analizler yapmışlardır. Geliştirilen matematik simülasyon yardımıyla elde edilen analiz sonuçları arazi çalışmalarıyla karşılaştırılarak modelin yeterliliği ortaya konmuş ve analitik araştırmalara bağılı bazı formülasyonlar elde edilmiştir. Çalışmada, hendek tipi içi boş veya dolu düşey dalga engelleyicilerinin etkinliği ve uygulanabilirliği dalgaların karakterlerine ve zemin koşullarına bağılı olarak sunulmuştur.

Adam ve Chouw (2001) insan yapısı üretilen yüksek frekanslı titreşim kaynaklarının (yoğun ve hızlı trafik akış yükleri) sebep olduğu istenmeyen salınımlara çözüm önerisi olarak yapay anakaya önermişler ve geliştirmiş oldukları sayısal model için sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Dinamik yük kaynağından gelen dalgaların azaltılması için titreşim kaynağının altında oluşturulacak yapay taban kayanın konumlandırılacağı kritik derinliğin bulunması amacıyla, Rayleigh yüzey dalgasına bağılı olarak elde edilen farklı tabaka yükseklikleri ile elastik yarı uzay çözümleri karşılaştırılarak rezonans etkisi araştırılmıştır. Yatay dalga bariyeri uygulamasıyla zeminin öz frekansları ve buna bağılı titreşim modları yapay kayanın konumlandırılacağı farklı derinliklerle değiştirilerek, titreşim etkilerinin azaltılabileceği gösterilmiştir. Zemin içerisinde yayılan dalgaların yalıtımı için yapay anakayanın uzunluğu ve rijitliği artırılarak serbest yüzey titreşimlerinde % 80 yalıtım etkisi sağlanmıştır.

Chouw ve Pflanz (2003) lineer elastik yarı uzay ve anakaya tabanlı zemin ortamında sınır elemanlar metotunu kullanarak yüksek hızlı trenlerin binalarda meydana getirdiği titreşimlerin etkisini azaltmak amacıyla yatay ve düşey yalıtım bariyerleri ile bina temellerinde sönümleyici yaylar kullanmışlardır. Yapılan analizler neticesi, tren hızının Rayleigh tipi yüzey dalga hızlarından daha düşük değerler aldığı koşullar için anakayanın zemin ortamındaki salınımlarda azaltma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, hendek tipi içi boş bariyerler ile yapay anakaya

uygulamalarının, hızlı tren trafiğinin tekrarlı geçişleri sırasında çevre binalarda meydana getirdiği yatay ve düşey titreşim etkilerini ciddi oranda azalttığı görülmüştür. Bina temellerinde kullanılan sönümleyici yaylar ise, hızlı demiryolu hattına yakın yapıların özellikle düşey titreşimlerini önemli derecede azaltmıştır.

Adam ve Estorff (2005) içi boş ve dolu düşey dalga bariyerleri kullanarak trenlerin geçişleri esnasında zeminlerde oluşan titreşimlerin yapılarda sebep oldukları rahatsız edici etkilerini azaltmayı hedeflemişlerdir. Elastik yarı sonsuz zemin ortamında düşey dalga engelleyicilerinin performansını incelemek için sınır elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemlerinin beraber uygulandığı hibrit yaklaşımını kullanmışlardır. Geliştirilen iki boyutlu matematik model üzerinde yapılan nümerik çözümlerinde dinamik yük kaynağı olarak alınan tren yükü, harmonik karakterde olacak biçimde tanımlanmıştır. Demiryolu üstyapısı ile bina arasına yerleştirilen içi boş ve farklı yoğunluklardaki bentonit malzemelerle imal edilmiş hendek tipi düşey dalga engelleyicilerinin yalıtım performansı ilk olarak bariyerin kesit özelliklerine bağlı olarak incelenmiştir. Sonraki aşamada, optimum dalga bariyerinin yalıtım performansı aktif ve pasif yalıtım durumlarına göre kapsamlı parametrik analizler yapılarak araştırılmıştır. Analizler sonucu, demiryolu hattının yakın çevresindeki binalarda oluşan titreşim etkileri ve iç kuvvetlerde %80'e varan yalıtım etkisi elde edilmiştir.

Andersen ve Nielsen (2005) sınır elemanlar ve sonlu elemanlar metotlarını birlikte kullanarak geliştirdikleri nümerik modelde, trenlerin oluşturduğu yer titreşimlerinin olumsuz etkisini ortadan kaldırmak amacıyla demiryolu hattı boyunca zemin bölgesinin iyileştirilmesi ya da hendek tipi bariyerler kullanarak incelemelerde bulunmuşlardır. Farklı frekanstaki taşıt yükleri dikkate alınarak yapılan analizler sonucu içi boş hendek tipi bariyerlerin düşük frekans değerlerinde içi dolu bariyerlere ve demiryolu üstyapı çevresindeki zemin iyileştirmelerine göre daha etkin olduğu sonucuna varmışlardır.

Dinamik yük kaynaklarının oluşturdukları yüzey dalgalarının yayılma hızı Poisson oranına bağlı olmak üzere, belirlenen kayma dalga hızının yaklaşık olarak %10 kadar daha azdır. Taşıma gücü zayıf ve alüvyon zemin koşullarında ölçülen düşük

değerdeki kayma dalgası yayılma hızlarının tren hızlarına özdeş olması durumunda yüksek düzeyde frekansla titreşen temeller, dinamik yükleri çevresindeki zeminlere iletirler ve zemin ortamındaki dalga yayılışıyla da yakın bölgedeki üst yapıları etkilerler. Demiryolu altyapısında en büyük yer değiştirmelere neden olan hareketli yük hızı, kritik hız olarak tanımlanmaktadır. Tren hızlarının bu kritik hızdan yüksek olması, büyük genlikli titreşimlerin altyapıda oluşmamasını sağlayacaktır. (Massarsch, 1994).

Ju ve Lin (2004) sonlu elemanlar metodunu kullanarak geliştirdikleri üç boyutlu model üzerinde, trenlerin geçişleri esnasında zeminde meydana gelen titreşimleri ve Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılımını modellemişlerdir. Dinamik yükün meydana getirdiği kuvvetli yer hareketlerinin etkisini azaltmak için çözüm önerisi olarak, yüzey dalga yayılış hızının küçük değerler aldığı demiryolu üstyapısı etrafındaki alüvyon zemin koşullarını iyileştirmek veya demiryolu üstyapıyı ile zemin arasına beton plak inşa etmek düşünülmüştür. Elde edilen sonlu eleman çözümleri teorik sonuçlarla karşılaştırılmış ve hareketli yükün doğrudan zemin yüzeyine tesir ettiğinde kritik hızın Rayleigh tipi yüzey dalgalarının elastik ortamda yayılış hızına özdeş olduğu durumlarda rezonans etkisi görüleceği vurgulanmıştır.

Durağan veya hareketli titreşim kaynaklarının ürettiği zemin dalgalarının davranışını ve yayılışını düşey yalıtım araçlarının performansı ile birlikte daha iyi anlayabilmek için son dönemlerde az sayıda da olsa sahada deneysel çalışmalar ve laboratuvar test düzeneklerinde bir dizi araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Forchap ve Verbic (1994) zemine gömülü yatay bariyer modeli ile ilgili ilk arazi deneylerini pasif ve aktif yalıtım durumları için gerçekleştirmişlerdir. Dış yükün frekans değerinin tek tabakalı zemin ortamının öz frekanslarından küçük olduğu durumlar için dalga yayılımının gerçekleşmediğini göstererek, ana kaya özelliğini taşıyan frekans kontrollü bir yapay taban kaya modeli önermişlerdir.

Çelebi ve diğ. (2009) yaptıkları deneysel çalışmada, harmonik dalga yayılımını sönmüleyecek en uygun hendek tipi dalga bariyerini tespit etmek amacıyla, dalga yayılımının yük kaynağına ve korunacak yapıya olan etkilerini yalıtımsız durum, aktif ve pasif yalıtımlı durumlar için tanecik hareketine bağlı olarak incelemişlerdir.

Kullanılan yalıtım modelleri; dalga bariyerinin içinin boş, su dolu, bentonit dolu ve beton dolu olması durumları için gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmalarının yapıldığı arazinin zemin özelliklerini belirlemek üzere yapılan arazi ve laboratuvar deneylerinden, çalışma alanının Sakarya Nehri tarafından taşınmış alüvyon zemin koşullarına sahip olduğu anlaşılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel sismik dalga yalıtım modelinde bir temel bloğu harmonik yük etkisi altında sarsılmış (yük kaynağı) ve belirli bir mesafe ötedeki diğer temel bloğundaki (korunacak yapı) etkisi incelenmiştir. Bu sistem ilk olarak herhangi bir yalıtım aracı olmaksızın (yalıtımsız durum) kurulmuş ve dış yükün farklı frekans değerleri için analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar pasif yalıtımın aktif yalıtıma oranla daha etkin olduğunu göstermiştir.

Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimiyle birlikte, dalga yayılım mekaniğinin hareketli yüklere göre daha karmaşık problemlerini çözmek ve yalıtım sistemlerinin etkilerini daha iyi değerlendirebilmek için farklı sayısal çözüm yaklaşımları kullanılmıştır. Bu alanda yapılan önemli çalışmalarda, özellikle farklı zemin formasyonlarının ve gömülü yapı temellerinin modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi etkin olarak kullanılmıştır. Yarı sonsuz zeminin sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmasında kesim noktaları için özel sınır koşulları kullanılarak geometrik sönüm hesaba katılmıştır (Waas, 1972; Segol ve diğ., 1978; Haupt, 1978; Yang ve Hung, 2001). Tüm problemi temsil eden matematik modellerin dinamik çözümlerinde radyasyon sönümünü doğrudan hesaba katan sınır elemanlar yöntemi (Leung ve diğ., 1990; Chouw ve Schmid, 1990; Çelebi ve Schmid, 2005) ya da bu tekniklerin sonlu elemanlarla ortak çözümlerine dayalı hibrit çözüm olarak isimlendirilen sayısal yaklaşımlar kullanılarak kalibrasyon hassasiyeti yüksek modeller geliştirilmiştir (Leung, 1987; Karlström ve Boström, 2007). Fakat, gerçekleştirilen sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar özellikle zeminin elastik yarı uzay olarak değerlendirilmesiyle sınırlı kalmıştır. Daha önce yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçları da özel durumlar için yönetmeliklerde yer almış ve faaliyet alanı dar kapsamda tutulmuştur (Baker, 1994).

Bu aşamada, yapı-zemin dinamik etkileşim problemini dinamik dış yükün simülasyonu ile birlikte doğrudan temsil edebilmek için zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil eden malzeme modelinin belirlenerek, sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılması ve buna bağlı olarak radyasyon koşulunun sağlanması kesim noktalarında uygun sınır koşullarının yazılarak geometrik sönümün probleme dahil edilmesi gerekmektedir. Son yıllarda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapı-zemin dinamik etkileşimi problemlerinin matematik modellerinin oluşturulmasında ve nümerik analiz çalışmalarının yapılmasında PLAXIS 2D dinamik modülü (Brinkgreve ve diğ., 2002) sonlu elemanlar paket programı etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Huat ve Mohammed, 2006; Göktepe ve diğ., 2010; Kırtel ve diğ., 2010; Çelebi ve diğ., 2011; Çelebi ve diğ., 2012; Göktepe ve diğ., 2012; Çelebi ve Kırtel, 2013).

Denver ve Kellezi (2007) yoğun yerleşim alanlarındaki binaların inşası aşamasında meydana gelen titreşim etkilerinin bina temellerine vermiş oldukları olumsuz etkileri değerlendirmek amacıyla, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak model geliştirmişlerdir. Dinamik yük kaynağı harmonik karakterde olacak biçimde tanımlanmıştır. Sayısal analizlerde zemin ortamı elastik yarı uzaya oturan tabakalı zemin olarak modellenmiştir. Çalışmada, sonlu eleman çözümleri kullanılarak tabakalı zeminlerde üstyapı temellerinin düşey titreşim genliklerindeki azalmayı mesafeye bağlı olarak ifade eden basit interpolasyon fonksiyonları hesaplanmıştır.

Gouasmia ve Djeghaba (2007) kullanmış oldukları sonlu eleman paket programının dinamik modülü yardımıyla, çok katlı yapılar ile zeminden oluşan ortak sistemin deprem yer hareketi etkisi altında zorlanmış titreşimini modelleyerek yapı-zemin etkileşimini incelemiştir. Deprem yer hareketinin frekans içeriği, yerel zemin koşulları ve farklı tabaka kalınlıkları gibi değişkenler kullanılarak yapılan nümerik analizlerde üstyapının dinamik davranışı araştırılmıştır. Zemin rijitliğindeki azalma yapının titreşim periyodunu artmıştır. Ayrıca, yer hareketinin frekansı ile üstyapı altında bulunan zemin ortamının temel titreşim frekansının özdeş olması durumunda rezonans etkileri ile çok katlı yapılarda dinamik gerilmelerin ve yerdeğıştirmelerin çok fazla artacağı vurgulanmıştır.

Pakbaz ve diğ. (2009) yerel zemin koşulları altında farklı kentlerde yer alan inşa aşamasındaki metro istasyonları arasında tren seferlerinin neden olabileceği dinamik etkileri sonlu elemanlar paket programından yararlanarak modellemişlerdir. İki boyutlu düzlem şekildeğiştirme problemi olarak ele alınan tünel-zemin ortak sisteminin çözümü zaman tanım alanında yapılmıştır. Geliştirilen matematik simülasyon yardımıyla tren trafiğinin tekrarlı geçişleri sırasında serbest zemin yüzeyinde üreteceği yüksek frekanslı titreşimler ve tünel etrafındaki zemin ortamında meydana getireceği gerilme-deformasyon etkileri incelenmiştir. Dinamik analizler sonucu metro istasyonları arasındaki yoğun tren trafiğine bağlı olarak zemin bölgesinde oluşabilecek titreşim etkilerinde zemin rijitliğinin önemli olduğunu vurgulamışlar ve dış yükün titreşim frekansı ile zeminin doğal titreşim frekansının özdeş olması durumunda oluşabilecek rezonans etkilerine dikkat çekmişlerdir.

Madheswaran ve diğ. (2009) zeminlere beton ve çelik kazık çakılması sırasında meydana gelen salınımların çevre binalarda ve hassas aletlerde meydana getirdiği olumsuz etkileri ortadan kaldırmak amacıyla, içi boş hendek tipi dalga bariyeri önermişlerdir. Nümerik analizler için kullanmış oldukları sonlu elemanlar programı dinamik modülünde kullanılacak dalga bariyerinin ideal boyutlarının ve yerinin belirlenmesi amacıyla kapsamlı analizler gerçekleştirmişler ve %50 civarında yalıtım etkisi elde etmişlerdir. Ayrıca, insan kaynaklı yüksek frekans içeren titreşim etkilerinin azaltılmasında dalga bariyerlerinin etkin bir biçimde kullanılabileceğine dikkat çekmişlerdir.

Çelebi ve Göktepe (2012) hızlı demiryolu hattına yakın yapıları yumuşak zemin koşullarında taşınan kuvvetli titreşimlerden korumak için dalga bariyeri olarak yapay anakaya modelini düşünmüşlerdir. Geliştirilen matematik modelde dinamik yük kaynağı olarak Almanya'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında (ICE) kullanılan lokomotif (Lok. 103) kullanılmış olup, demiryolu altyapısını oluşturan zemin bölgesi için doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Yapay taban kaya bariyer modelinin aktif ve pasif yalıtım performansı değerlendirilerek, seçilen ölçüm noktalarındaki dinamik etkileri çeşitli kontrol parametrelerine bağlı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

### 1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada amaç, ülkemizde giderek yaygınlaşan yüksek hızlı trenlerin meydana getirdiği titreşimlerden dolayı ortaya çıkabilecek olan titreşim problemlerini belirterek bunları irdelemek, problemlerin çözümünde kullanılacak seçenekler için sayısal yöntemlerden yararlanarak matematik modeller önermek ve model analizlerinden elde edilen sonuçlara göre çevre yapıları titreşim etkisinden korumak için uygun seçenekleri uygulamaya sunmaktır. Türkiye'nin yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan lokomotiflerin yoğun trafiği sırasında ürettiği zemin titreşimlerini, yapı-zemin etkileşiminin de hesaba katıldığı bir dalga yayılım problemi olarak değerlendirip, ayrık sayısal çözüm yöntemlerinden yararlanarak sistemin matematik modelini geliştirerek incelemek ve dalga bariyerlerinin yerleştirilmesi ile çevre yapılarıdaki etkilerinin azaltılmasına ilişkin çözümler sunmak, bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır.

Bu konuları yerinde araştırmak üzere pahalı saha incelemelerine, zaman alıcı arazi deney düzeneklerine, hassas istasyon ölçümlerine ve laboratuvar çalışmalarına gerek kalmadan yapı-zemin dinamik etkileşim problemini temsil eden ve yüksek hız trenlerinin geçişinden dolayı demiryolu üstyapısı ve altındaki zeminde oluşan dalga yayılışına karşı gelen matematik model ile kısa sürede sağlıklı analizler yapılarak, etkili çözümler sunulması amaçlanmaktadır.

Bu aşamada, bilgisayar destekli matematik modelin geliştirilmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapı-zemin-dalga bariyer sisteminin matematik modeli oluşturulmuştur. Yapısal çözüm zaman tanım aralığında iki boyutlu düzlem şekil değiştirme problemi olarak gerçekleştirilmiştir. Sonsuza uzanan zemin bölgesinin ayrıklaştırılması için farklı ölçeklerde ele alınan sonlu eleman modelleri kullanılmış ve zeminin serbest yüzeyinde elde edilen nümerik analiz sonuçları, literatür verileriyle karşılaştırılarak önerilen modelin doğrulaması yapılmıştır.



Yüksek hız trenlerinin demiryolu üstyapısı ve çevre zeminde meydana getirmiş oldukları titreşimlerinin incelenmesi için nümerik çözüm tekniklerine dayalı geliştirilen bilgisayar modellerine ait uygulama sonuçlarının doğru ve gerçeğe yakın elde edilebilmesi, modele etkiyen hareketli dinamik yüklerin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Hızlı tren setinin zamana ve konuma bağlı yük dağılımının doğru modellenmesi ve sayısal çözüm yaklaşımına dayalı probleme dahil edilmesi bu çalışmanın çözüm algoritmasının önemli aşamalarından biridir. Tekerleklerden raylara aktarılan dinamik yük etkileri, Türkiye'deki yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan dört dingilli ve ağırlığı yaklaşık olarak  $720\text{ kN}$  olan lokomotifin  $V=250\text{ km/h}$  hızda geçişi dikkate alınarak elde edilmiştir.

Zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil eden malzeme modeli için, Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılması ve buna bağlı olarak radyasyon koşulunun sağlanması kesim noktalarında uygun sınır koşullarının yazılarak geometrik sönümün probleme dahil edilmesi ile mümkündür, aksi takdirde sınırlarda dalgalar sönümlenmeyip problemde göz önünde bulundurulan zemin ortamına yansiyarak geri dönecektir. Bu amaçla, problemin arazi koşullarını gerçeğe yakın temsil eden malzeme yaklaşımlarına dayanan ve zeminin geometrik sönümünün hesaba katıldığı sayısal model elde edilmiştir. Konuyla ilgili nümerik analiz çalışmalarında zeminin doğrusal olmayan özelliklerinin gerçek koşullara en yakın şekilde modellenmesine imkan veren PLAXIS 2D dinamik modülü sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır.

Geliştirilen matematik simülasyon ile yalıtım performansı değerlendirilen dalga bariyer modelleri, hendek tipi dalga engelleyiciler ve yapay taban kaya uygulamasıdır. Bariyer uygulamalarında dikkate alınan en önemli etkenlerden biri malzeme yoğunluğudur (empedans kontrastı). Farklı malzemelerin göstermiş olduğu yalıtım etkisini araştırmak için birtakım arazi deneyleri yapmak yerine geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde sayısal analizler yürütülerek sonuca gitmek rasyonel bir yaklaşım olacaktır. Bu nedenle, sistematik bir program akışı içerisinde ayrıntılı parametrik uygulamalar gerçekleştirilerek yüksek hızda hareket eden tren yüklerinin

simülasyonu ile yoğun yerleşim merkezlerinde, özellikle taşıma gücü açısından zayıf, alüvyon zeminlerde neden olduğu kuvvetli dalga yayılımı ve sonucunda yapı-zemin dinamik etkileşimi problemi, geliştirilen yapı-zemin-dalga bariyer sisteminin nümerik modeli ile doğrudan analiz edilerek en uygun yalıtım aracı belirlenmiştir.

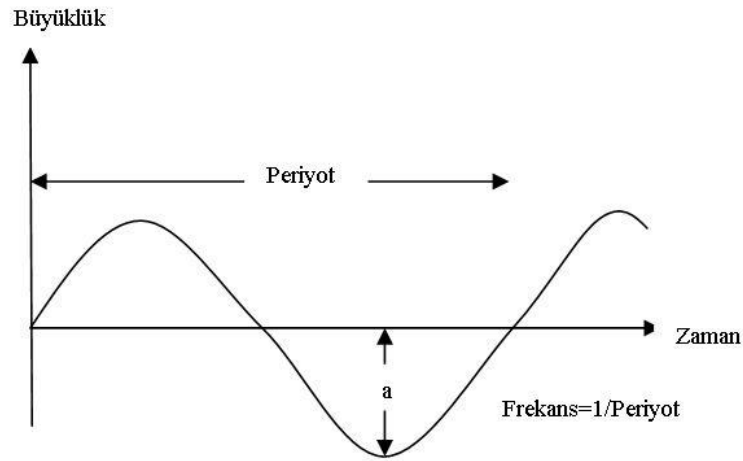
Son aşamada, elde edilen sayısal veriler değerlendirilerek ülkemiz ve bölgemize sağlayacağı faydalar, bu konuda ileride karşılaşması muhtemel olan problemler için alınacak efektif önlemler tartışılmıştır.

## **BÖLÜM 2. ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA YAYILIŞI VE ZEMİN-YAPI ORTAK SİSTEMİNDE KULLANILAN NÜMERİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

### **2.1. Zemin Ortamında Dalga Yayılışı**

Deprem hareketine bağı olarak, bir kırık boyunca biriken enerjinin boşalması dışında dinamik yük kaynaklarının (ağıır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik akış yükleri, masif inşaat aktiviteleri, patlamalar vb.) oluşturduğu enerji dalgalar vasıtasıyla iletilir. Farklı türdeki sismik dalgalar yerin iç kısmında ilerlerken farklı özellikteki zemin katman sınırlarında yansıma, kırılma ve difraksiyon (saçılma) nedeniyle dalganın yayılma doğrultusunda değişime uğrarlar. Bu kırılma ve yansımalarla ilgili olarak yapılan çalışmalarda, her zemin katmanın kendine özgü niteliklere sahip olduğu belirtilmiştir (Richart ve diğ., 1970; Fuyuki ve Matsumoto, 1980; Kramer, 1996).

Zemin ortamında yayılan sismik dalgalar kayaç içerisinde ilerleyen cisim dalgaları ve arazi yüzeyinde yayılan yüzey dalgaları olarak bilinen dalga tiplerini içermektedir. Dinamik etkiye bağı oluşan dalgaların niceliklerini ifade etmek için periyot ( $T$ ), genlik ( $a$ ) ve frekans ( $f$ ) gibi terimler kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Bir tam dalga oluşması için geçen süreye periyot, dalganın denge noktasına olan uzaklığına genlik ve titreşim kaynağının bir saniyede ürettiği dalga sayısına frekans denmektedir. Cisim dalgalarının yayılma hızları genelde yüksek periyot içeriğine sahip yüzey dalgalarından daha büyüktür. Bunun bir sonucu olarak yüzey dalgaları aynı parçacık hızına sahip cisim dalgalarından zemin ortamında daha büyük deformasyonlara sebep olmaktadır.



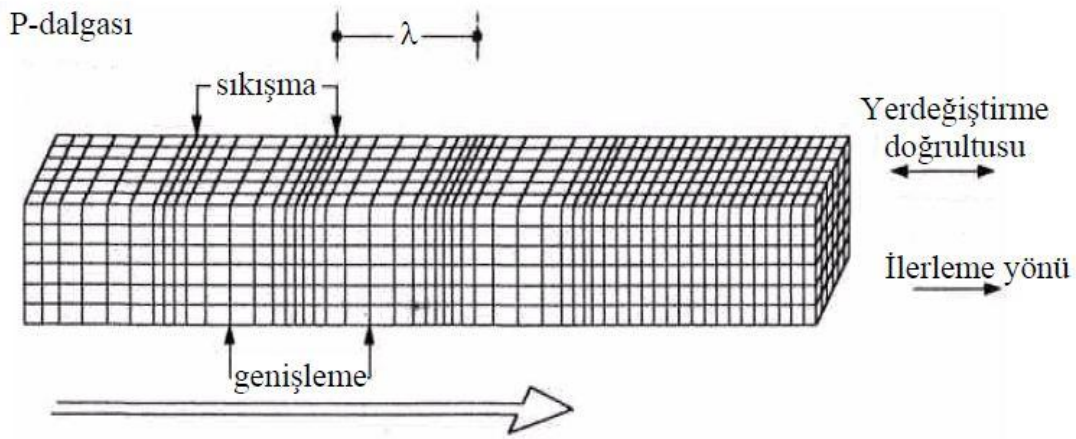
Şekil 2.1. Dalga Şeması (Yıldırar, 2000)

### 2.1.1. Cisim dalgaları

Elastik zemin ortamında dinamik titreşimlerin yayılması ilk olarak cisim dalgaları yani *P*-dalgası ve *S*-dalgası yayılımları ile görülür. Bu dalga türleri parçacık hareketine neden olup, hareketleri sırasıyla yayılma doğrultusuna paralel ve diktir. Dalga yayılma hızları ortamın fiziksel ve geometrik özelliklerine bağlıdır.

Birincil, boyuna veya basınç dalgası olarak bilinen *P* dalgaları geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genleşme meydana getirir. *P* dalgaları yayılma sırasında kayaları ileri-geri itip-çekerek, dalgaların ilerleyiş yönüne paralel hareketlilik yaratırlar.

Bu tip dalgalar yapıları yukarı-aşağı biçimde hareket ettirerek kolonlara aşırı yük binmesine sebep olurlar. Tıpkı bir ucu sabit olan bir spiral yayın gerilip bırakıldığındaki salınımı gibi hareket ederler. Bu dalgaların en önemli özelliklerinden birisi de her türlü ortamda (katı, sıvı ve gaz) ilerleyebilmeleridir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. *P*-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996)

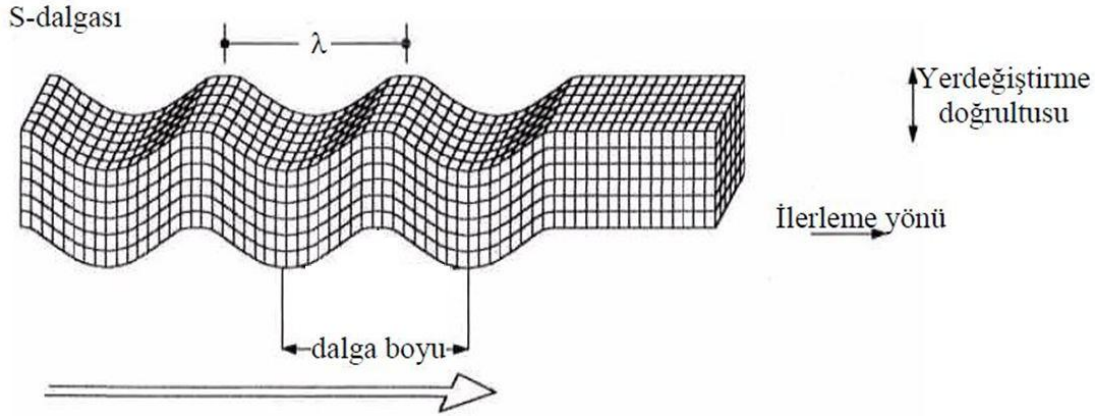
*P*-dalgasının yayılma hızı ;

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada,  $E$  ortamın elastisite modülü,  $\rho$  birim hacim kütle ve  $\nu$  Poisson oranını ifade etmektedir. Formülasyonda yer alan  $G$  kayma modülü için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

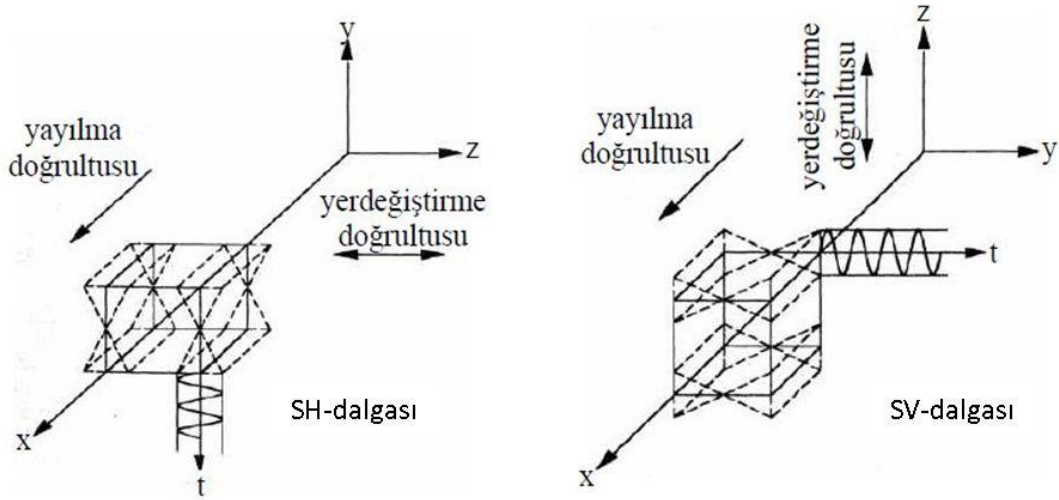
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

İkincil, enine veya kesme dalgası olarak bilinen *S*-dalgaları, içinden geçtikleri ortamda kayma deformasyonlarına yol açarlar. Titreşim hareketleri yayılma doğrultusuna dik veya çapraz olarak salınım gösterirler. *S*-dalgaları yalnızca katı kütlelerde ilerleyebilmekte ve cisimleri aşağıya-yukarıya ve sağa-sola doğru hareket ettirmektedirler (Şekil 2.3). Bu tip dalgalar özellikle yapıların kolon-kiriş bağlantılarında kopmaya yönelik etkiye sebep olurlar.



Şekil 2.3. S-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996)

S-dalga hareketinin özel olarak yatay veya düşey düzlemde meydana gelmesi durumunda, Yatayda Kayma Dalgası (*SH*-dalgası) ve Düşeyde Kayma Dalgası (*SV*-dalgası) olarak bilinmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. *SH*-dalgası ve *SV*-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996)

S-dalgasının yayılma hızı;

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.3)$$

formülasyonu ile elde edilmektedir. Yukarıda verilen bağıntılardan görüleceği üzere, sonsuz bir ortamda  $P$ -dalgasının yayılma hızı,  $S$ -dalgasının yayılma hızından en az  $\sqrt{2}$  kat daha fazladır (Geniş ve Gerçek, 2000). Bu iki cisim dalga hızı arasındaki oran kullanılarak zemin bölgesine ait Poisson oranı denklem (2.4) yardımıyla elde edilebilir.

$$\frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{2(1-2\nu)}} \quad (2.4)$$

Sadece  $P$ -dalga hızı hesaplanıp, rastgele bir Poisson oranı ile elde edilen  $S$ -dalga hızı kullanılarak yapılan üstyapıların dinamik analizi güvenli bir biçimde olmayacaktır. Bu sebeple, zemin ortamının cisim dalgası hızlarının olabildiğince hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Poisson oranı ile cisim dalgalarının hız oranları karşılaştırması Tablo 2.1' verilmiştir.

Tablo 2.1. Poisson sınıflaması ve cisim dalgası hız oranı karşılaştırması (Bormann ve diğ., 2009)

Poisson Değeri ( $\nu$ )	Zemin Sıklık Durumu	$c_p / c_s$
0.5	Cıvık-sıvı	$\infty$
0.4-0.5	Çok gevşek	2.49- $\infty$
0.3-0.39	Gevşek	1.87-2.49
0.20-0.30	Sıkı-katı	1.71-1.87
0.1-0.19	Katı	1.5-1.71

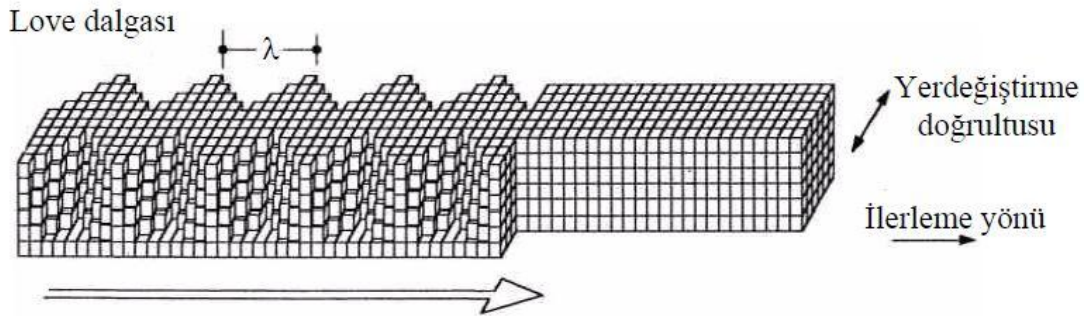
Bilindiği üzere Poisson oranı, boyuna ve enine sismik dalga hızlarının birbirine oranı kullanılarak hesaplanır. Çoğu elastik katılar için ortalama değeri 0,25 civarındadır ve zeminlerde bu değer ortamın sulu, kırıklı, çatlaklı olmasına göre  $0 \leq \nu \leq 0.5$  aralığında değişir. Boyutsuz bir parametre olan Poisson oranı, kayaçların yoğunlukları dikkate alınmadan hesaplanmaktadır. Bu değer,  $0 \leq \nu \leq 0.25$  aralığında olması ortamdaki kayaçların gözeneksiz,  $0.25 \leq \nu \leq 0.35$  aralığında olması kayaçların orta derecede gözenekli ve  $0.35 \leq \nu \leq 0.50$  aralığında olması ise kayaçların gözenekli olduğunu göstermektedir. Kayaçlar içerisindeki boşluk ve çatlaklar Poisson oranını etkilediklerinden dolayı, kayacın kırıklı olup olmadığını, ayrıca kayacın kırıklarında su taşıyıp taşımadığını Poisson oranı incelenerek belirlenebilir. Buradan hareketle,

zemin ortamının suya doygun kohezif olduğu durumlarda, bu değerin  $0.5$ 'e yaklaştığı söylenebilir.

### 2.1.2. Yüzey dalgaları

Yüzey dalgaları, yer yüzeyi veya yüzeydeki katmanlar ile cisim dalgaları arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkmaktadır. Sismik dalgalar içerisinde en yavaş ilerleyen dalga tipi olup daha fazla hasara neden olurlar. Bu dalgaların oluşması sırasında yerin hareketi ve dolayısıyla dalganın etkisi de büyük olmaktadır. Bu dalgalar genlikleri kabaca derinliğe göre üssel olarak azalan şekilde yer yüzeyinde ilerler. Bu dalgaların en önemlileri Love dalgaları ve Rayleigh dalgalarıdır.

Love dalgaları, *SH*-dalgalarının yumuşak çökellerle etkileşimi sonucunda oluşmakta olup partikül titreşiminin düşey bileşeni yoktur. Bu tür dalgaların yayılma hızı cisim dalgaları ve Rayleigh dalgalarının tersine dalga boyuna bağlı olmakla birlikte yüzey dalgalarının en hızlısıdır. Love dalgalarının titreşim yönü dalganın hareket yönüne dik olduğundan enine dalgadır ve yeri yatay düzlemde hareket ettirirler (Şekil 2.5). Yapılan araştırmalar, bu tür dalgaların yarı sonsuz homojen ortamın üstünde elastik bir tabaka bulunması halinde oluşabileceğini göstermektedir.

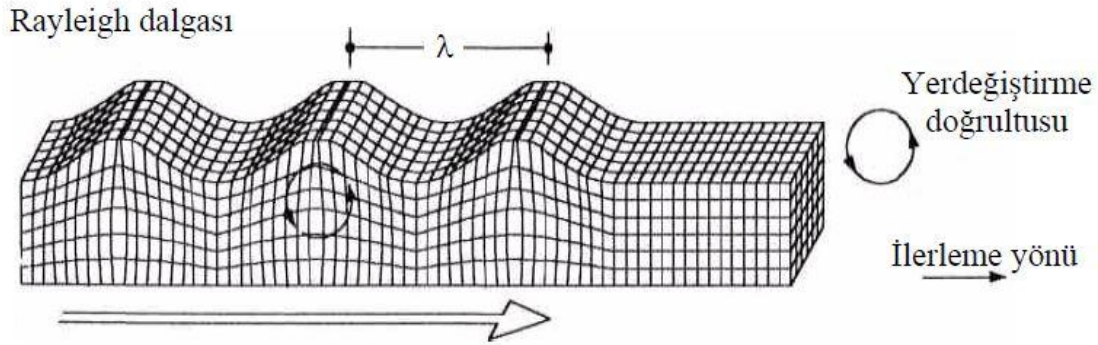


Şekil 2.5. Love dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996)

Mühendislik problemlerinde karşımıza sıklıkla çıkan ve çoğunlukla yüzeyde oluşan en yaygın dalga tipi Rayleigh yüzey dalgasıdır. Bu dalgalar ilk olarak Rayleigh (1885) tarafından çalışılmış ve sonrasında Lamb (1904) tarafından *P* dalgaları ile *SV* dalgalarının yer yüzeyi ile etkileşiminden oluştuğu şeklinde tanımlanmıştır. Bu tür



dalgalar bir göl veya okyanusun üzerinde yuvarlanan dalga salınımı gibi yer üzerinde hareket ederler. Dinamik yüklemelerde hissedilen sallantıların çoğu, diğer dalgalardan çok daha büyük genlikli olan Rayleigh dalgalarından kaynaklanmaktadır. Rayleigh tipi yüzey dalgaları, parçacık hareketinin yatay ve düşey bileşenlerinin dalga yayılımı düzleminde oluşan,  $P$  ve  $S$  dalgalarının bileşkesi olarak düşünülebilir. Bu tür dalgalar ortamda eliptik bir hareketle veya bu harekete dik olarak zemin ortamında gittikçe artan bir frekansta salınımına sebep olurlar. Bu dalga türünde yerdeğiştirmeler serbest yüzeyden derinlere inildikçe azalmakta olup yüzeye yakın bölgelerde çevrimsel bir hareket meydana getirmektedirler (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Rayleigh dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996)

Rayleigh dalgasının yayılma hızı ( $c_R$ ) cisim dalgaları ( $c_p$  ve  $c_s$ ) ve Poisson oranına ( $\nu$ ) bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Alzawi, 2011).

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

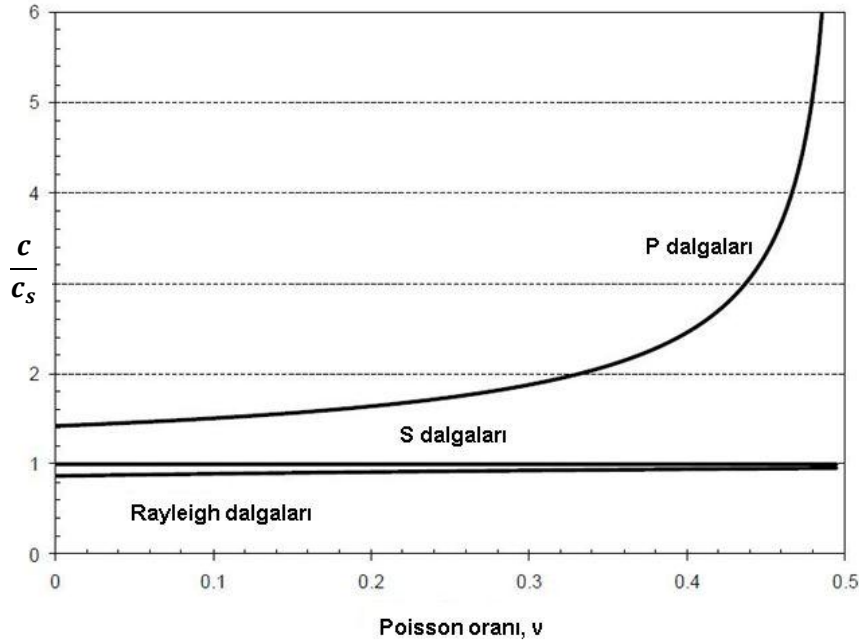
Burada;  $K = c_R / c_s$  ve  $\alpha = c_s / c_p$  ile ifade edilmektedir.

Bu tip dalgalar dalga yayılma doğrultusunda  $S$  dalgalarından biraz daha yavaş hareket ederler. Rayleigh dalgasının hızı yaklaşık olarak denklem (2.6) kullanılarak hesaplanabilir (Alzawi, 2011).

$$c_R = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} c_s \quad (2.6)$$

Rayleigh dalgasının yayılımı yaklaşık  $S$  dalgası hızında olmasına rağmen, Love

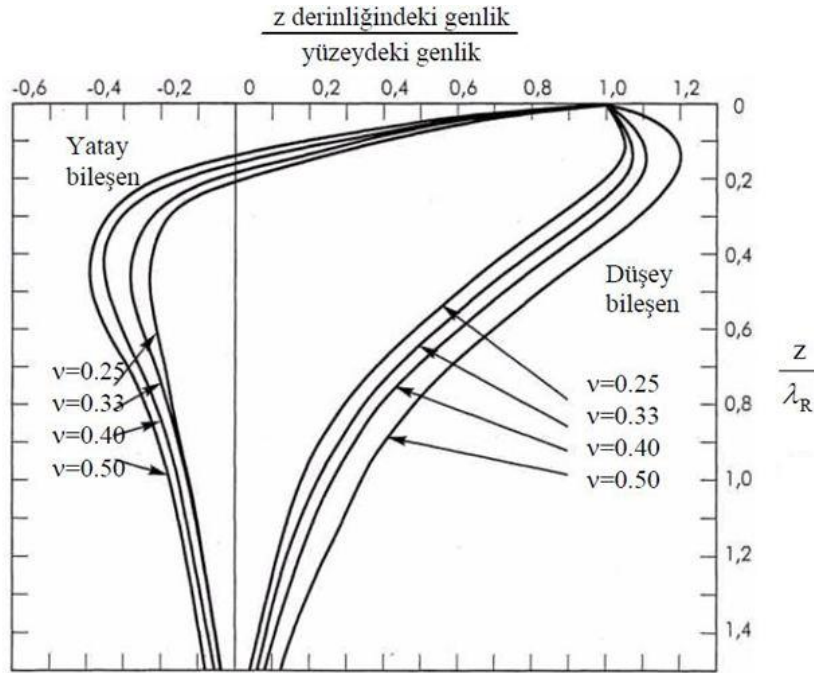
dalgasının yayılma hızı yüzey tabakasındaki ve alt tabakadaki  $S$  dalgalarının yayılma hızları arasındaki bir değerde olmaktadır.  $P$  dalgaları ise kaynaktan yapılaraya ilk ulaşan dalgalardır. Şekil 2.7'den görüleceği üzere Poisson oranının 0 ile 0.5 değerleri arasında Rayleigh dalgasının yayılma hızı  $0.862c_s$ 'den  $0.955c_s$ 'e yavaş bir biçimde artış göstermiştir.



Şekil 2.7. Rayleigh dalgası ve cisim dalgası yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi (Kramer, 1996)

Dinamik yük kaynağından oluşan sismik enerjinin büyük bir bölümü Rayleigh tipi yüzeysel dalgalar olarak yayılmaktadır. Bu tip dalgaların etkisinin derinlikle azalmasından dolayı dalga enerjisinin önemli bir bölümü dalga boyu içinde kalmaktadır. Poisson oranına göre Rayleigh dalga hareketinin titreşim genliklerinin derinliğe bağlı değişimi Şekil 2.8'de görülmektedir.

Şekil yakından incelendiğinde, düşey yerdeğiştirme genliğinin maksimum değerine ulaşması durumunda yatay yerdeğiştirme genliklerinin sıfır olduğu görülmektedir. Taşıma gücü düşük alüvyon zeminlerde ( $\nu=0.25$ ) düşey titreşimin  $z/\lambda_R=1$  olduğu derinlikte serbest yüzeydeki genlik %20 değerine ulaşmaktadır. Ayrıca,  $z/\lambda_R=0.2$  derinliğinde Rayleigh dalga hareketinin yatay yerdeğiştirme genliğinin sıfır değeri aldığı görülmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey hareketi (Kramer, 1996)

### 2.1.3. Zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesi

Geoteknik mühendisliği uygulamaları yükleme tipleri ve zemin özelliklerine bağlı olmak üzere farklı problem tiplerini kapsamaktadır. Dinamik yüklemelerin meydana getirdiği yapısal hasarlara etki eden en önemli faktörlerden birisi zemin kesitinde yer alan tabakaların tekrarlı yükler altındaki davranışlarıdır.

Dalga yayılım etkisinin baskın olduğu problemlerin bir kısmında zeminlerde düşük deformasyon seviyeleri oluşurken, zemin kütlelerinin stabilitesini içeren diğer önemli tip problemlerde ise ortamda büyük deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu nedenle, farklı titreşim kaynaklarının ürettiği dalgaların zemin ortamındaki davranışının ve yayılışının tam olarak anlaşılabilmesi için zeminin dinamik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerin bu dinamik özelliklerinin laboratuvar ve arazide hangi teknik metodlarla ölçüldüğü, uygulanan yöntemlerin ne gibi özelliklere sahip olduğu ve zemine ait hangi dinamik karakteristiklerin belirlendiği Tablo 2.2’de özetlenmiştir.

Tablo 2.2. Zeminin dinamik özelliklerinin ölçülmesi (Çelebi ve diğ., 2008)

Yöntemler	Araştırma teknikleri	Ölçülebilir dinamik büyüklükler	Avantajlar	Dezavantajlar
Üç eksenli	Laboratuvar deneyi	$G, \rho, D, \nu$	Gerilmeye bağlı kayma modülü fonksiyonun belirlenmesi	Örselenmemiş numune ile deney yapılması
Rezonant kolon deneyi	Laboratuvar deneyi	$G, \rho, D, \nu, c_s$	Gerilmeye bağlı kayma modülü fonksiyonun belirlenmesi	Örselenmiş numune ile deney yapılması
Kuyudan kuyuya sismik	Arazi deneyi	$c_s, c_p$	Kesin değerler	Yüksek maliyet, yeraltı suyu hassasiyeti
Sismik kuyu aşağı ve yukarı	Arazi deneyi	$c_s, c_p$	Kesin değerler	Yeraltı suyu hassasiyeti
Sismik kırılma	Arazi deneyi	$c_s, c_p, \rho, h_i, \alpha_i$	Örselenme olayının gerçekleşmemesi	Basınç dalgasının derinlikle artma zorunluluğu
Sismik yansımaya	Arazi deneyi	$c_s, c_p, \rho, h_i, \alpha_i, T_i, R_i$	Örselenme olayının gerçekleşmemesi, zemin profilinin yüksek derinliklere kadar elde edilmesi	Yüksek teknik ve tecrübeli eleman gerekliliği
Rayleigh dalgası, Love dalgası ve dispersiyon	Arazi deneyi	$c_R, c_s, \rho, G$	Maliyeti düşük, lineer faz farklılıklarının çok kolay elde edilmesi	Modların ayrıştırılmasına ihtiyaç duyulması, lineer faz farklılıklarının her zaman elde edilememesi
Elektrik, manyetik, termal, yer çekimi	Arazi deneyi	$\mu_i, G_i, \rho_i$	Kesin değerler	Hava koşullarına karşı hassas, maliyeti yüksek ve tecrübeli eleman gerekliliği
Mikrotremör	Arazi deneyi	$T, B$	Kesin değerler	Hava koşullarına karşı hassas, maliyeti yüksek ve tecrübeli eleman gerekliliği

Daha gerçekçi bir matematik model için nümerik analizlerde kullanılacak olan ve dalga yayılmasını etkileyen en önemli parametreler, tekrarlı olarak yüklenen zeminlerin rijitlik ve sönüm gibi karakteristikleridir. Bu durum, zeminlerin doğrusal olmayan malzeme davranışına sahip olduklarından dolayı, sadece düşük deformasyon seviyelerinde geçerli olmayıp orta ve yüksek deformasyon seviyelerinde de geçerli olmaktadır.

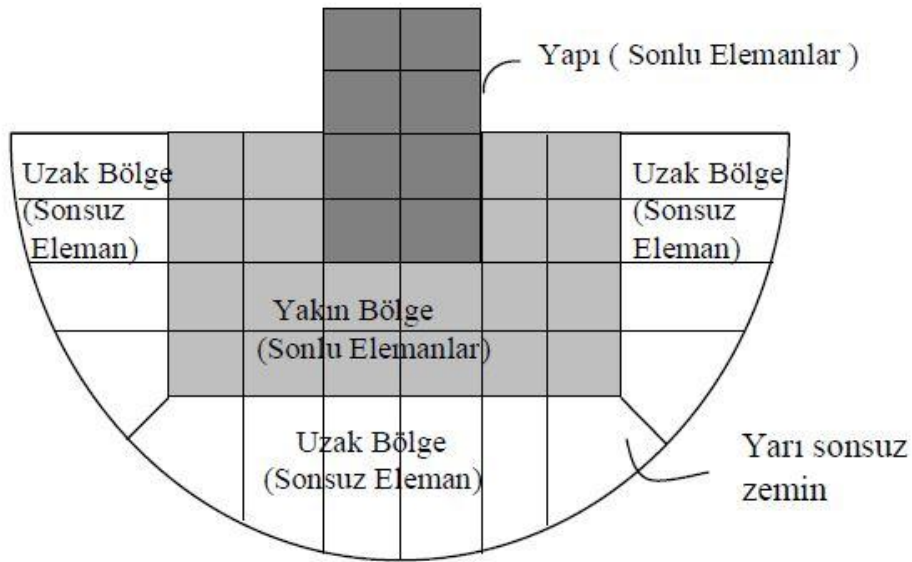
Zemin ortamının jeolojik yapısı, doğal veya gerilme şartlarına bağlı olarak sonradan oluşan anizotropik yapı, sondaj ve numune alımı sırasındaki örselenme, deney hataları gibi bazı faktörler dinamik zemin özellikleri ölçülmesinde bazı kaçınılmaz belirsizlikleri beraberinde getirebilir. Bu belirsizliklerin bazıları deney ayrıntılarına hususi bir özen göstererek en aza indirebilse de, kimi deneylerde bunun mümkün olmayacağı akıldan çıkarılmamalıdır.

## 2.2. Zemin-Yapı Ortak Sisteminin Çözülmesi

Nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, viyadükler ve barajlar gibi dinamik yükler altındaki davranışlarının önemli olduğu bilinen yapı sistemlerinin, farklı özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmaktadır. Bir bölgedeki yapının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin sisteminin dinamik özelliklerinin iyi anlaşılması gereklidir. Geleneksel metotlarda, üstyapıya ait temel sistemi ile zemin arasında rijit bir ilişki olduğu kabul edilmektedir. Fakat, taşıma gücü zayıf alüvyon zemin bölgelerinde yapılan yapısal analizlerde, yapı-temel sisteminin zemine ankastre olduğu yaklaşımı iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerlerinde farklı sonuçlara neden olmaktadır. Bu nedenle gerçek davranışın hesaplanabilmesi için zemin ortamı üstyapının bir parçası olarak beraber analiz edilmelidir.

Yapı-zemin etkileşimi problemlerinde sonlu bir boyuta sahip olan yapı ve sonsuza uzanan zemin gibi iki önemli bileşen vardır. Bu tip problemlerin analizinde, sonlu elemanlar yöntemi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat yapılan nümerik çözümlerinde sonsuza uzanan zemin bölgesi için analiz sırasında ne kadarının göz önüne alınacağı ve alınan bu zemin parçasının sınırlarının ne olacağı hususu önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü yapı-zemin etkileşim problemlerinde sonsuz büyüklükteki zemin ortamı sonlu bir bölge ile modellenmektedir. Bu da zemin içerisinde yayılan dalgaların ayrıklaştırılan bölgenin sınırlarına çarparak sonlu bölgede kalmasına ve sürekli olarak bu bölgede hareket etmelerine neden olmaktadır. Bu davranış, gerçek dalga hareketini idealize etmediği için, gerçekçi olmayan sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır.

Zemin ortamında hareket eden dalgaların sonlu elemanlarla modellenmiş bölgenin yapay sınırından geçmesi için, dalgaların sınırdan geçme şartının geliştirilen sayısal modelde sağlanmış olması gerekmektedir. Bundan dolayı, yapı-zemin etkileşimi problemlerinde, yapay sınırdan enerji geçişi matematiksel olarak gerçekçi bir şekilde ifade edilmelidir. Yapı-zemin etkileşim sistemlerinin sonlu (sonlu bir boyuta sahip olan üst yapı ile yarı sonsuz zemin) ve sonsuz elemanlar kullanılarak incelendiği örnek bir model Şekil 2.9’da görülmektedir (Kaçın ve Yerli, 2002). Gözönüne alınan kuşatılmış bir bölgedeki dalga enerjisinin sınırlardaki tükenişi sınırsız bir zemindeki dalga yayılışıyla sönmülenmesi koşullarına indirgenmelidir (Gazetas, 1991).



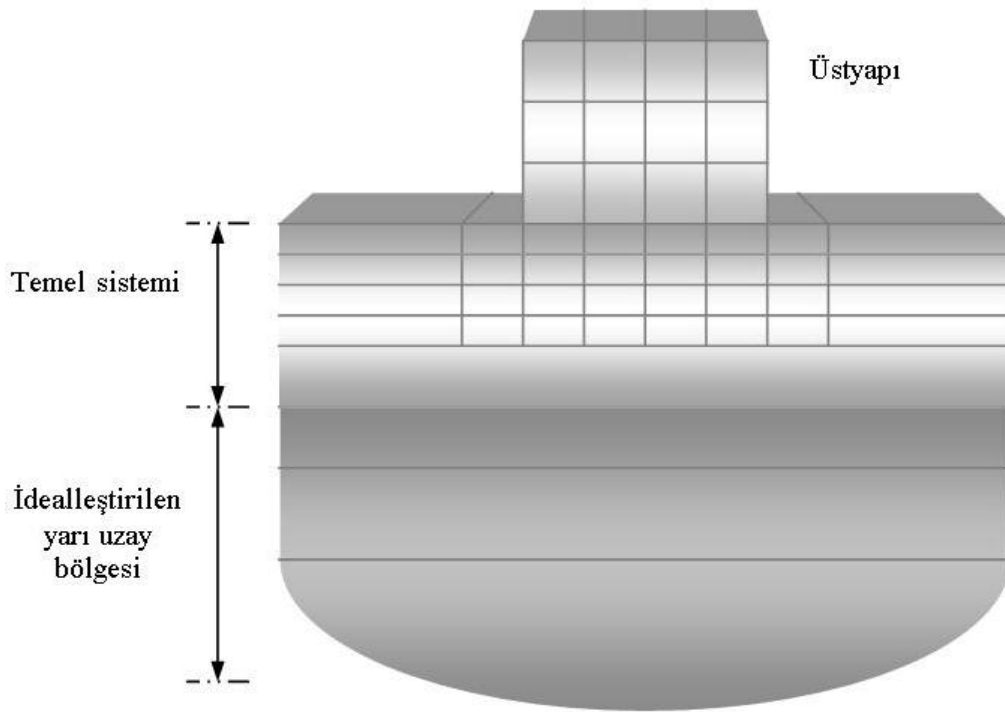
Şekil 2.9. Yapı-zemin etkileşimi modeli

Yapı-zemin etkileşim problemlerinde zemin ortamının idealleştirilmesi için “Altsistem yaklaşımı” ve “Doğrudan çözüm yaklaşımı (Direkt metot)” gibi iki temel yöntem kullanılmaktadır.

### 2.2.1. Altsistem yaklaşımı yöntemi

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan altsistem yaklaşımının en önemli özelliklerinden biri, temel-zemin sisteminin eşdeğer statik yaylar ve sönmüleyicilerle modellenerek, problemin çözümü için gerekli işlemlerin

kısaltılması ve hesaplarda kolaylık sağlanmasıdır (Johnson ve diğ., 1976; Wolf ve Song, 2002). Ortak sistem içinde zemin ortamının ayrık bir sistem olarak göz önüne alınması esasına dayanan altsistem yaklaşımında üstyapı ve zemin ortamı iki ayrı sistem olarak modellenir. Her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denge denklemleri, daha sonra üstyapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Zemin ortamının bağımsız bir sistem olarak incelenmesi ile, yapı-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri cinsinden elde edilen temel ortamının rijitlik matrisi ve etkin yük vektörü, daha sonra yapının dinamik dengesinde göz önüne alınır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Altsistem yaklaşımı yönteminde kullanılan yapı-zemin sistemi

Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki üst yapı için hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^t \\ \dot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_b \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Burada,  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. Alt simgeler;  $ss$  üstyapıya ait serbestlik derecelerini,  $bb$  mesnet serbestlik derecelerini ve  $sb-bs$  yapı-zemin etkileşim yüzeyine ait serbestlik derecelerini göstermektedir.  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  ve  $\{u\}$  ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini,  $\{P_b\}$  ise etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Altsimge  $s$  yapı sistemini ve  $b$  temel sistemini tanımlamaktadır (Sıcacık ve Soyluk, 2011). Toplam yerdeğiştirme vektörü, zahiri-statik ve dinamik bileşenlere bağlı olarak,

$$\begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_s^d \\ u_b^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_s^{qs} \\ u_g \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

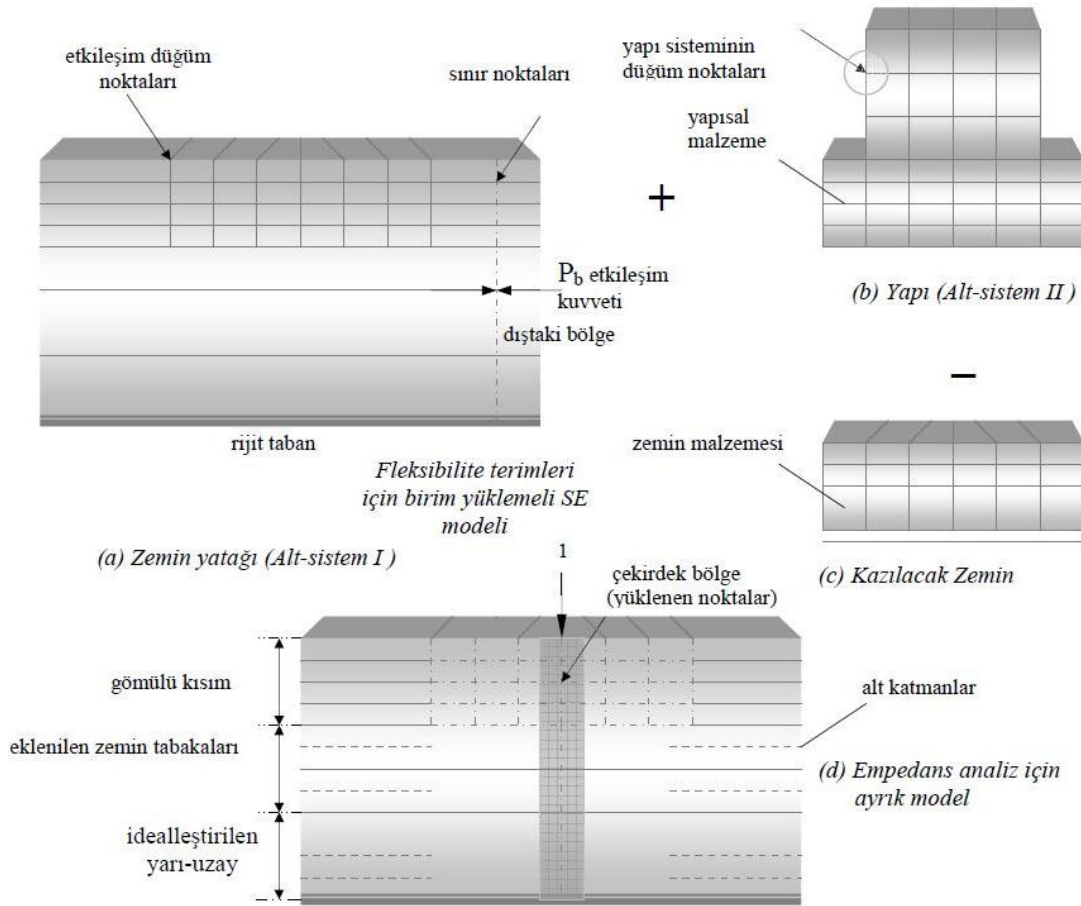
biçiminde tanımlanmaktadır. Burada  $\{u_b^d\}$  yapı-zemin etkileşim ara yüzeyindeki yerdeğiştirme vektörünü ve  $u_g$  serbest zemin yüzeyindeki değişen yer hareketi vektörünü ifade etmektedir. Hareket denklemi, frekans alanına dönüştürüldükten sonra yerdeğiştirmeler cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir. Burada  $S_I$  temel empedans matrisini göstermektedir (Hao, 1989).

$$\begin{Bmatrix} -w^2 \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{bmatrix} + iw \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} + S_I \end{bmatrix} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^d(iw) \\ u_b^d(iw) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [M_{ss}][K_{ss}^{-1}][K_{sb}]\{\ddot{v}_g(iw)\} \\ -[M_{bb}]\{\ddot{v}_g(iw)\} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

### 2.2.1.1. İnce Tabaka/Esnek Hacim yöntemiyle idealleştirme

Altsistem yaklaşımına dayanan İnce Tabaka/Esnek Hacim çözüm tekniği, hareketli yüklerin meydana getirdiği dalga yayılım problemlerinde etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Bu sayısal yaklaşım, zemin ortamının sınırsızlığını gelişmiş yapay sınırlar kullanarak altsistem yaklaşımı içerisinde ince tabakalar/esnek hacim yöntemiyle ele almaktadır. Gömülü yapıların genel durumlarında sayısal modelin gerçekleştirilebilmesi için yapının yer almadığı yapısız zemin bölgesi, gömülü parçasıyla birlikte yapının kendisi ve yapının gömülü kısmı için kazılacak zemin parçası gibi üç alt bölge tespit edilmektedir (Şekil 2.11 (a)-(c)).





Şekil 2.11. İnce Tabaka/Esnak Hacim çözüm tekniğinde altsistem yaklaşımı (Çelebi, 2006a)

Birinci altsistem olarak sınıflandırılan zemin bölgesi İnce Tabakalar Yöntemi (İTY) olarak isimlendirilen yarı ayrık bir çözüm tekniğiyle ele alınmaktadır. Burada zemin yatağının, ana kaya ya da yarı sonsuz uzayın üzerinde yer alan lineer elastik veya visko elastik malzemeli yarı sonsuz yatay katmanlardan meydana geldiği varsayılmaktadır.

İkinci ve üçüncü altsistemler olarak tanımlanan gömülü temel ile birlikte üstyapı ve kazılacak zemin parçası sonlu elemanlar yöntemiyle idealize edilir. Kazılıp çıkartılacak zemin temel ile birlikte dikkate alınmaktadır. Yapı ile temel arasındaki etkileşim sadece arakesit yüzeyindeki düğüm noktalarında değil, gömülü bölgenin tüm noktalarında gerçekleşmektedir. Yukarıda tanımlanan bu üç altsistem birbirlerine her bir altsisteme ait etkileşim düğüm noktaları aracılığıyla bağlanırlar.

Tüm sistemin birleştirilmesinde Esnek Hacim Yöntemi (EHY) kullanılır. Çıkartılacak zemin bölgesini temsil eden hacim elemanları ile yatay tabakaların kesişme noktaları, Şekil 1(d)'de görüldüğü üzere İTY/EHY yaklaşımında etkileşim

düğüm noktaları olarak tanımlanmaktadır (Çelebi, 2006a). Yapı-zemin etkileşim problemini çözmek amacıyla geliştirilen SASSI programının da temelini oluşturan bu sayısal yaklaşımın teorik altyapısı literatürdeki çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir (Lysemer ve diğ., 1988a-b).

### 2.2.1.2. Empedans fonksiyonları kullanılarak idealleştirme

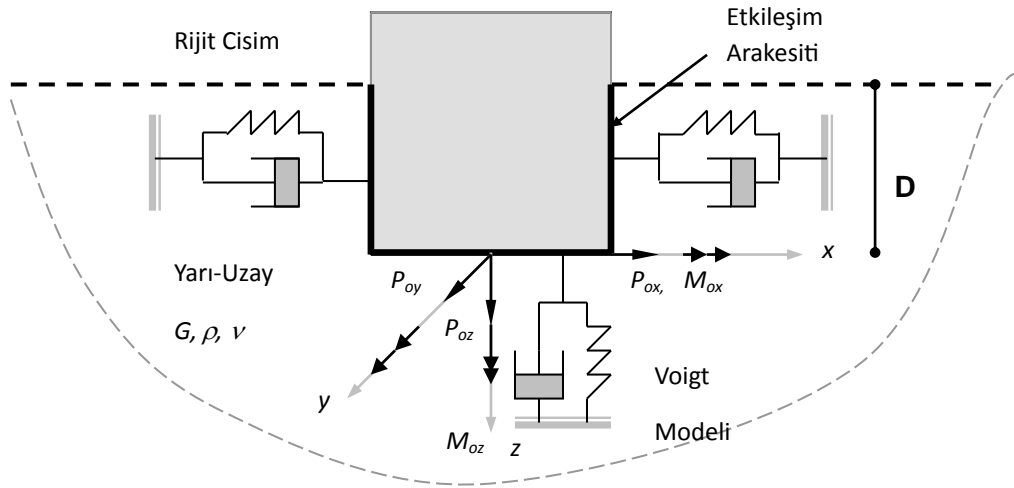
Yapı-zemin etkileşim problemlerinde, temel-zemin arakesiti için geliştirilen empedans fonksiyonlarının kullanımı rijit-betonarme makine temel titreşimlerinin incelenmesi ile ortaya çıkmıştır. Genel anlamda, temelin tüm serbestlik dereceleri (ötelenme ve dönme) harmonik yük etkisi altında araştırılarak birtakım sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, nükleer santraller ve barajlar gibi rijit ve masif yapıların dinamik yük etkisi altındaki davranışlarında, empedans analizi kullanılarak yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır (Gazetas, 1991).

Bu yöntemin çözüm aşamalarını dış yüklerin etkisi altındaki temelin hareketlerinin belirlenmesi ve bunun sonucunda da zemin ve temel özelliklerini dikkate alarak üst yapının yerdeğiştirme bileşenlerinin hesaplanması oluşturmaktadır. Bir başka ifadeyle, empedans fonksiyonları temel-zemin değme yüzeyinde tanımlanmaktadır. Bu durum yapı-temel sisteminin hareketini kütlelen bağımsız inceleme imkanını vermektedir.

Homojen, izotrop ve lineer elastik olduğu varsayılan zemin bölgesi, yarı sonsuz ortam yaklaşımı kullanılarak idealleştirilir. Harmonik titreşimler etkisi altındaki kütlelen yapı temelinin sonsuz rijit olarak alınması durumunda arakesit yerdeğiştirmelerini, temelin rijit hareket serbestlik dereceleri cinsinden bir merkez noktada ( $O$ ) üçü öteleme ( $u_{ox}$ ,  $u_{oy}$ ,  $u_{oz}$ ) ve üçü dönme ( $\gamma_{ox}$ ,  $\gamma_{oy}$ ,  $\gamma_{oz}$ ) olmak üzere toplam altı bileşenle tanımlamak mümkündür.

Şekil 2.12'deki gösterimde yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini; sönümleyiciler ise zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen fiktif zemin sönümünü (radyasyon sönümü veya

geometrik sönüm) açıklamaktadır. Zeminin özellikleri, kayma modülü  $G$ , birim hacim kütle  $\rho$  ve Poisson oranı  $\nu$  ile tanımlanmıştır.



Şekil 2.12. Elastik yarı uzayda rijit cisim modeli (Çelebi ve diğ., 2006a)

Rijit cismin referans noktasına ( $O$ ) göre yazılan hareket denkleminin Fourier dönüşümü ile çözülmesi durumunda, kuvvet ile yerdeğiştirme arasındaki ilişki yer hareketinin,  $\tilde{u}_{gx}$ , sadece  $x$  doğrultusunda olması durumu için,

$$\begin{Bmatrix} \tilde{P}_{ox} \\ \tilde{P}_{oy} \\ \tilde{P}_{oz} \\ \tilde{M}_{ox} \\ \tilde{M}_{oy} \\ \tilde{M}_{oz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}(\omega) & 0 & 0 & 0 & K_{x,my}(\omega) & 0 \\ 0 & K_{yy}(\omega) & 0 & K_{y,mx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}(\omega) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{m_x,y}(\omega) & 0 & K_{m_x}(\omega) & 0 & 0 \\ K_{m_y,x}(\omega) & 0 & 0 & 0 & K_{m_y}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{m_z}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ox} - \tilde{u}_{gx} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{u}_{oz} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{oz} \end{Bmatrix}$$

$$P = KU \quad (2.10)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $P$  vektörü temel plağı ile zemin arakesitinde yer alan etkileşim kuvvetlerini ifade ederken,  $U$  ise rijit temel hareketinin kararlı davranışını yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden gösteren vektördür. Bu durumda, temelin her bir

titreşim moduna karşı gelen frekansa bağlı karmaşık değerli dinamik rijitlik matrisi, bir başka deyişle kütsüz temelin empedans matrisi  $K$  ile gösterilmiştir. Zemin altsisteminde etkileşim yüzeyi için tanımlanan dinamik rijitlik matrisinin tersi alınarak, frekansa bağlı kompleks dinamik fleksibilite matrisi elde edilir ve bunlardan yararlanarak elde edilen transfer fonksiyonları  $f$  kullanılarak rijit temel çözümüne gidilir;

$$U = K^{-1} P = fP \quad (2.11)$$

Eğer yapı-temel sistemi iki simetri düzlemiyle tanımlanmış ise, öteleme ile burulma hareketi arasında bağışıklık olmaz. Bu durumda dinamik rijitlik matrisinde bu terimlerin sıfıra eşit olduğu görülür. Ayrıca farklı doğrultulara ait yanal öteleme bileşenlerinin birbirine olan etkileri ve eğilme-dönme serbestlik derecelerinin kendi aralarındaki etkileşimleri, eğilme-dönme bileşenlerinin burulma serbestlik derecesi ile karşılıklı etkileşimi söz konusu olmadığından, bu terimler de sıfıra eşit olur. Bunun yanında  $K$  matrisinin köşegen terimleriyle birlikte, her bir simetri düzleminde yanal öteleme ile dönme hareketleri arasındaki etkileşimi gösteren terimleri de dikkate almak gerekir.

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin analizinde boyutsuz parametrelerle çözümler gerçekleştirildiğinden boyutsuz frekans faktörü tanımlamak yararlı olacaktır. Bu durumda;

$$a_o = \frac{\omega B}{c_s} \quad (2.12)$$

şeklini alır. Bu eşitlikte titreşim kaynağının açısal frekansı  $\omega$  (radyan/saniye), dairesel temelin yarıçapı yada dikdörtgen temelin yarı genişliği  $B$ , yarı uzayın kayma dalga hızı  $c_s$  ile gösterilmektedir. En genel ifadesiyle dinamik empedans matrisinin terimleri boyutsuz frekans parametresine bağılı olarak;

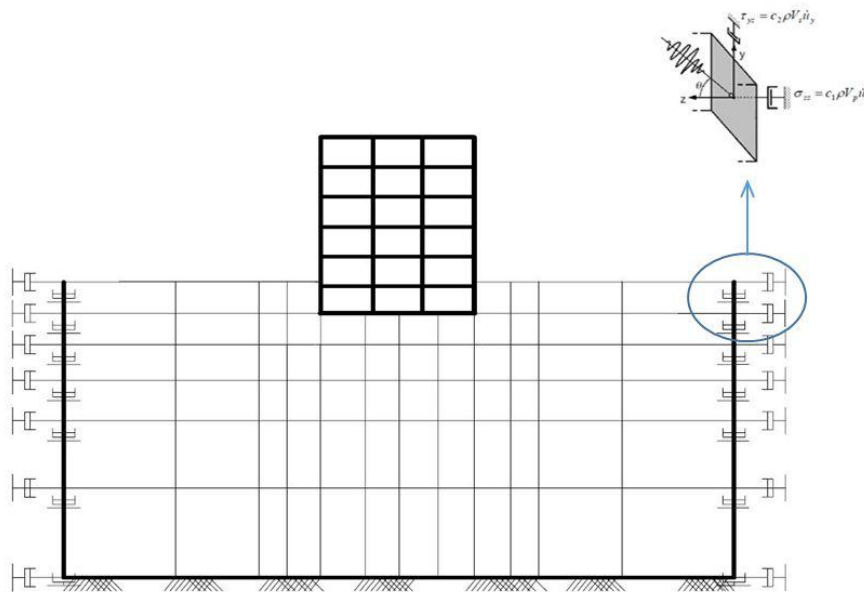
$$K_\alpha(\omega) = K_{s\infty\alpha}(k_\alpha(a_o) + ia_o c_\alpha(a_o))(1 + 2i\beta) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $K_{s\infty j}$  statik rijitliği,  $\beta$  ise yapısal sönümü göstermektedir. Empedans fonksiyonunun boyutsuz rijitlik ve sönüm katsayıları sırasıyla  $k_\alpha$  ve  $c_\alpha$  ile belirtilmiştir. (Çelebi ve diğ., 2006a).

### 2.2.2. Doğrudan çözüm yaklaşımı yöntemi

Yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinin çözümünde önemli çözüm aşamaları olan zemindeki geometrik süreksizlikler, mekanik özellikler ile doğrusal olmayan davranışın tanımlanabilmesi ve temel sisteminin zemin ortamına gömülü olması durumlarının rahatlıkla göz önüne alınabildiği yönteme doğrudan çözüm yaklaşımı adı verilmektedir. Doğrudan çözüm metodunun en önemli avantajlarından biri zeminin doğrusal olmayan davranışının gerçeğe en yakın biçimde temsil edilmesine imkan vermesidir (Wolf, 1994; Borja ve diğ., 1999).

Üstyapı ve zeminin tek bir ortak sistem olarak modellendiği bu yöntemde yaygın olarak sonlu elemanlar metodu ile analizler gerçekleştirilmektedir. Dalga yayılım probleminin sonlu eleman simülasyonu için yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için yapay sınırlara ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Doğrudan çözüm yaklaşımı yönteminde kullanılan yapı-zemin sistemi

Bu sınırlarda viskoz sönümleyici elemanlar (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969) ve sonsuz elemanlar (Dasgupta, 1982; Wolf ve Song, 1994) yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğer ayrıklaştırılan bölgenin sınırları yeterli derecede uzakta seçilmemişse, bölgenin kesim noktalarında geçirgen (soğurgan) sınırlar kullanılsa bile, tam geçirimsizlik sağlanamadığından dolayı uzaklaşan ve yansıyan dalgaların çakışmasından analiz sonuçlarında beklenmedik sayısal belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir.

Yapısal çözümlerinin hızlı ve öngörülen doğrulukta gerçekleşebilmesi amacıyla yapı-zemin etkileşim problemi için 2D sonlu elemanlar modeli kullanılarak düzlem şekil değiştirme koşulları altında hareket denklemlerinin zaman tanım aralığında çözümü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [\tilde{C}]\{\dot{u}(t)\} + \tilde{P}(\sigma) = \tilde{F}(t) \quad (2.14)$$

$$[\tilde{C}] = [C] + [C_b] \quad (2.15)$$

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2.16)$$

$$[C_b] = \int [N]^T \begin{bmatrix} c_1 \rho c_p & 0 \\ 0 & c_2 \rho c_s \end{bmatrix} [N] dA \quad (2.17)$$

Burada, denklem (2.14)'de tanımlanan genel hareket denklemindeki  $\tilde{P}(\sigma)$  ifadesi, nümerik modele etkiyen dinamik yüklerin meydana getirdiği gerilmeye bağlı kuvvet matrisini ifade etmektedir. Özel sönüm matrisine  $[\tilde{C}]$  ait denklemlerde,  $[C]$  yakın ve uzak bölgeler için malzeme sönüm matrisini,  $[C_b]$  ise zemin bölgesinin sonsuzluğunu ifade eden radyasyon sönümünü modelleyen sınır integral matrisini belirtmektedir (Kramer, 1996).

Sonlu elemanlar yaklaşımında Rayleigh sönümü  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$  sistemin kütle ve rijitlik matrisleri içerisindeki sönüm etkilerini bir araya toplayan en uygun sönüm ölçütlerinden birini oluşturmaktadır. Sistemin malzeme sönümünde  $\alpha$  orantı sabiti kütlelerin katkısını gösterirken,  $\beta$  sabiti rijitliğin sönümdeki etkisini belirlemektedir. Yeraltının sonsuzluğunda yayılarak kaybolan titreşim enerjisini tanımlayan geometrik sönüm ise sınır integral matrisi olarak denklem (2.17)'de verilmiştir.

Radyasyon sönüm matrisinde viskoz sönümleyicinin soğurgan etkisini düzenlemek için boyutsuz iyileştirme katsayıları ( $c_1$  ve  $c_2$ ) kullanılmaktadır. Burada  $c_p$  ve  $c_s$  sırasıyla basınç ve kayma dalgası yayılma hızlarını,  $\rho$  ise birim hacmin kütleini ifade etmektedir. Matematik modelin sahip olduğu düğüm noktası için yazılan sonlu eleman şekil fonksiyonu ise;

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & \dots & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & \dots & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

matrisi ile tanımlanmaktadır.

### 2.2.2.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi

Tüm problemi temsil eden matematik modeller için yarı sonsuz zemin bölgesinin sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmasında kesim noktalarında özel sınır koşullarının belirlenmesinin zorluğundan dolayı, sonsuz büyük bir zemin bölgesi gibi sürekli bir ortam, sonsuz serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülebilir. Böyle bir sistemin hareket denklemi, ortamın sonsuz küçük bir eleman parçasının göz önüne alınmasıyla kısmi diferansiyel denklemi ile ifade edilebilir.

Lineer problemlerde incelenen bölgenin sadece sınırlarının ayrıklaştırılmasıyla çözüm boyutunun bir mertebe indirgenmesiyle daha az bilinmeyen kullanılması ve sınırdaki radyasyon koşulunu doğrudan sağlaması, sınır elemanlar yönteminin sürekli ortamlar mekaniğinde dalga yayılımı problemleri için uygun bir nümerik yaklaşım olduğunu göstermektedir. Cisim kuvvetlerinin varlığı hesaba katılmadığında ve sıfır başlangıç koşulları uygulandığında sınır integral denklemi;

$$c_{ik}(\xi) \tilde{u}_i^*(\xi, \omega) = \int_{\Gamma} \tilde{u}_{ik}^*(x, \xi, \omega) \tilde{t}_i(x, \xi, \omega) \partial\Gamma - \int_{\Gamma} \tilde{t}_{ik}^*(x, \xi, \omega) \tilde{u}_i(x, \xi, \omega) \partial\Gamma \quad (2.19)$$

basitleştirilmiş bir şekilde frekans tanım aralığında ifade edilebilir. Burada,  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$  dikkate alınan elastik bölgenin  $\Omega$  sınırlarını gösterirken  $\tilde{t}_{ik}^*(x, \xi, \omega)$

ve  $\tilde{u}_{ik}^*(x, \xi, \omega)$  terimleri ise sonsuz elastik ortamın herhangi bir  $\xi$  noktasına  $k$  doğrultusunda etki eden birim şiddetli tekil kuvvet nedeniyle, elastik ortamın diğer bir  $x$  noktasında  $i$  doğrultusunda oluşan gerilme ve yerdeğiştirme bileşenlerinin temel çözümleri olarak bilinmektedir. İntegral terimlerinden bağımsız olan  $c_{ik}$  sınır parametresi ise Poisson oranına ve birim yüklemenin uygulandığı noktanın çevresindeki geometrinin düzgünlüğe bağlı değerler almaktadır (Çelebi ve diğ., 2006a). Yarı sonsuz ortamı ilgilendiren problemlerde sınır integral denkleminin (2.19) sayısal çözümünü gerçekleştirebilmek için bölge yüzeyinin sınır elemanlarla ayrıklaştırılması yoluna gidilerek diferansiyel denklemin daha basit ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$c \mathbf{u}(\xi) = \sum_{e=1}^{N_e} \left( \int_{\Gamma^e} \tilde{\mathbf{u}}^* \partial \Gamma \right) \mathbf{t}^e - \sum_{e=1}^{N_e} \left( \int_{\Gamma^e} \tilde{\mathbf{t}}^* \partial \Gamma \right) \mathbf{u}^e \quad (2.20)$$

Bu eşitlikte yer alan  $\mathbf{u}^e$  ve  $\mathbf{t}^e$  vektörlerinin terimleri,  $e$  nolu seçilmiş elemanın her bir ayrık düğüm noktasına karşı gelen üçer adet yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerinden meydana gelmektedir.

Sınır integral bağıntısı lineer denklem sistemine indirgenerek tekrar düzenlendiğinde, sınır elemanlar yönteminin temel denklemi olarak da ifade edilen matris eşitliği aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{t}} = \tilde{\mathbf{T}} \tilde{\mathbf{u}} ; \mathbf{U}^l \mathbf{t}^m = \mathbf{T}^l \mathbf{u}^m + \sum_{k=1}^{m-1} [ \mathbf{T}^{(m-k+1)} \mathbf{u}^k - \mathbf{U}^{(m-k+1)} \mathbf{t}^k ] \quad (2.21)$$

Burada  $\tilde{\mathbf{u}}$  ve  $\tilde{\mathbf{t}}$  vektörleri, sınır elemanların ağırlık merkezinde tanımlanan düğüm noktalarına karşı gelen frekansa bağlı kompleks yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerini göstermektedir.  $\tilde{\mathbf{U}}$  ve  $\tilde{\mathbf{T}}$  matrisleri ise her bir sınır eleman yüzeyi  $\Gamma^e$  için tanımlanan ve problemin temel çözüm terimlerini içeren katsayılar matrislerinden meydana gelmektedir.



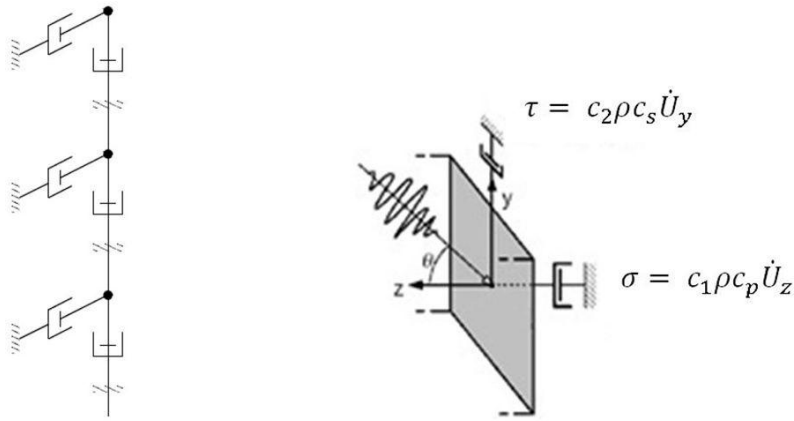
Dalga yayılım problemi için yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için sonlu elemanlar yöntemine alternatif olarak kullanılan sınır elemanlar yöntemi veya hibrit çözümlerde (sonlu ve sınır elemanlar yöntemlerinin ortak kullanımı) sonsuz, yarı-sonsuz veya çok büyük zemin bölgelerinin ayrıklaştırılması için kullanılan sayısal yaklaşımlar ile kalibrasyon hassasiyeti yüksek modeller geliştirilebilir.

### 2.2.2.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme

Dinamik analizlerde viskoz yapay sınırların geçirimsizliğinin tanımlanmasındaki belirsizliklerden dolayı sınırlarda olası dalga yansımalarının yapısal davranışının kararlılığını bozmasına yol açmadan kalıcı titreşimi elde etmek için bölge sınırlarını statik çözümlere göre daha uzakta oluşturmak güvenli bir çözüm yoludur. Yapılan araştırmalardan bu sınır yerlerinin üstyapıdan en az temel taban genişliğinin 8–10 katı kadar uzakta olacak şekilde düzenlenmesi gerektiği önerilmektedir (Dasgupta, 1982).

Yapı-zemin dinamik etkileşim problemleri için geliştirilen çözüm yöntemlerinde yarı sonsuz zemin bölgesinin sonlu elemanlarla ayrıklaştırılması amacıyla zeminin kesim yüzeylerinde eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler gibi özel sınır koşulları kullanılarak geometrik sönüm hesaba katılabilmektedir. Bu sınırlarda kullanılan viskoz sönümleyici elemanlar ile titreşim kaynağından dışarıya doğru yayılan dalgaların sınırlardan geri yansıması engellenerek, zeminin sonsuzluğu nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerji radyasyon sönümü adı verilen bir mekanizma ile tanımlanabilmektedir.

Eşdeğer viskoz sönümleyiciler tarafından sınırlarda soğurulan normal ve kayma gerilmeleri Şekil 2.14'de gösterilmiştir. Burada  $c_p$  ve  $c_s$  sırasıyla basınç ve kayma dalgası yayılma hızlarını,  $\dot{u}_i$  ( $i=x, y$  ve  $z$ ) ilgili doğrultulardaki partikül hızlarını göstermektedir. Birim hacmin kütlesi  $\rho$  ile verilmektedir.



Şekil 2.14. Viskoz sönümleyici sınırlar

Kullanılan sınır şartlarının soğurulma karakteristikleri dalgaların frekansına bağlı olmadığı için bu yapay sınırlar hem harmonik hem de harmonik olmayan dalgaları sönümleyebilmektedir. Sınırlarda enerjinin tam anlamıyla tüketilebilmesi dalgaların gelme açısına bağlıdır. Viskoz sönümleyicinin soğurgan etkisini düzenlemek için boyutsuz iyileştirme katsayıları ( $c_1$  ve  $c_2$ ) kullanılmaktadır.

## **BÖLÜM 3. ZEMİN-YAPI ORTAK SİSTEMİNİN DALGA YAYILIM PROBLEMİ İÇİN ÖNERİLEN SONLU ELEMAN YÖNTEMİ VE MODELİN DOĞRULANMASI**

### **3.1. Dinamik Yük Kaynağı**

Yüksek hız trenlerinin demiryolu üstyapısı ve çevre zeminde meydana getirmiş oldukları titreşimlerinin gerçeğe yakın incelenmesi, geliştirilen modele etkileyen hareketli dinamik yüklerin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu bölümde, Türkiye'nin yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan HT 65000 serisi lokomotif seti tekerlek yüklerinin demiryolu üstyapısındaki değişimleri zaman ve frekans tanım aralığında elde edilmiştir.

Lineer elastik yarı sonsuz uzay olarak idealleştirilen zemin üzerinde yer alan demiryolu üstyapısında, sabit hızla hareket eden katar yükünün değme yüzeyinde meydana getirdiği gerilme dağılışı, elastik zemine oturan sürekli bir kirişin üzerinde hareket eden çizgisel bir yükün davranışına benzetilerek elde edilmiştir (Bkz bölüm 3.1.2). Sayısal çözümlerde kirişin rijitliği yaklaşık olarak demiryolu üstyapısının rijitliğine eşdeğer olarak alınmıştır. Frekans bölgesindeki çözümler ise hızlı Fourier dönüşümü yapılarak gerçekleştirilmiştir.

#### **3.1.1. Türkiyede yüksek hızlı tren projeleri**

Ülkemizdeki yüksek hızlı tren projesi alanındaki çalışmalarına ilk olarak 2003 yılında Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından hızlı tren hattı döşenerek başlanmıştır. İlk hat, toplam uzunluğu 533 km olması öngörülen İstanbul-Ankara hattıdır. Hattın şu an kullanımda olan Ankara-Eskişehir kısmı 245 km'den oluşmaktadır. Yapımı 2006'da başlayan ve toplam uzunluğu 212 km olan Ankara-Konya hızlı tren hattında ise 2011 yılından bu yana aktif olarak seferler devam etmektedir.

Ulaştırma Bakanlığı tarafından yürütülen en büyük projelerden biri olan İstanbul-Ankara yüksek hızlı tren projesi ile ülkemizin iki büyük şehri arasındaki seyahat süresi azaltılarak hızlı, emniyetli ve konforlu ulaşım sağlanarak, ulaşımda demiryolu payının artırılması planlanmaktadır. Yüksek hız tren seferlerinin tam anlamıyla başlaması ile Türkiye bu teknolojiyi kullanan ülkeler arasında Avrupa'da 6. ve dünyada 8. Ülke olacaktır.

Ankara-İstanbul arasındaki yüksek hızlı tren projesi, mevcut hattan bağımsız  $V=250$  km/h hıza uygun, tamamı elektrikli, sinyalli yeni çift hatlı hızlı demiryolu yapımını içermektedir. Toplam uzunluğu 533 km olan projenin kesimlerini Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, Ankara-Sincan (24 km), Sincan-Esenkent (15 km), Esenkent-Eskişehir (206 km), Eskişehir - İnönü (30 km), İnönü-Vezirhan (54 km), Vezirhan-Köseköy (104 km) ve Köseköy-Gebze (56 km) hızlı tren hatları oluşturmaktadır (Demirezer, Anonim). Bu proje ile, yolcu taşımacılığında %10 olan demiryolu payının %78'e çıkarılması hedeflenmektedir.

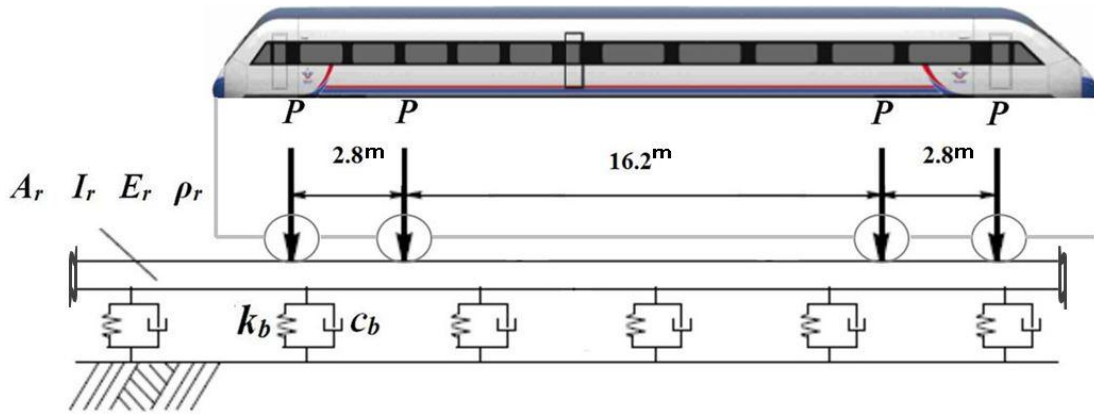


Şekil 3.1. Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesi kesimleri gösterimi (Demirezer, Anonim)

### 3.1.2. Elastik yatağa oturan sürekli kirişlerin çözümü

Tüm yapısal çözümler, elastik yarı uzay olarak idealize edilen zemin yüzeyine oturan sürekli bir kirişin üzerinde sabit hızla hareket eden bir yükün dinamik dış etki olarak göz önüne alınmasıyla gerçekleştirilmiştir.

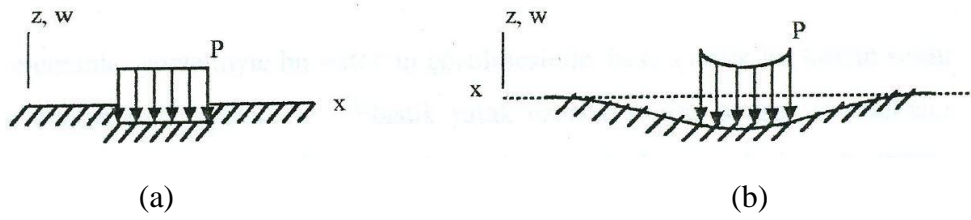
Demiryolu ve hemen altındaki zeminde kuvvetli titreşim üreten yüksek-hız trenlerinin üstyapı düzleminden geçişinin tanımlanması için Şekil 3.2’de görüldüğü üzere basit bir model ortaya konulmuştur (Huber, 1988). Bu modelde hızlı tren dingil yükü, dingil açıklıkları ve hareket hızıyla; üstyapı ise belli bir eğilme rijitliği olan raylar ve traverslerin yatak katsayılarıyla karakterize edilmiştir.



Şekil 3.2. Yüksek hız trenlerinin yük simülasyonu için analitik model

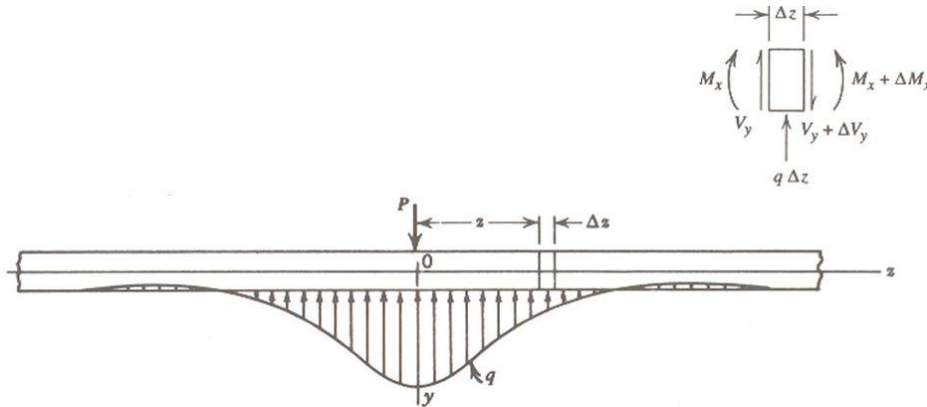
Demiryolu üstyapısına ait analitik çözümler elastik yatağa oturan kiriş olarak hesaplanabilmektedir. Elastik zemin üzerinde konumlanan kirişlere ait çalışmalarda en çok tercih edilen model Winkler elastik zemin modelidir.

Winkler tarafından önerilen idealleştirilmiş zemin ortamı modelinde, zemin etkilerinin kiriş çökmeleriyle orantılı olduğu, zemine etkiyen kuvvetlerin yalnız etkidiği noktada şekil değiştirdiği kabul edilir. Bu durumda zeminin birbirinden bağımsız ve birbirine sonsuz yakın yaylardan oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Elastik yatak üzerindeki yüzey yerdeğiştirmeleri (a) Winkler elastik yatak modeli (b) Elastik üç boyutlu yatak modeli (Cook ve Young, 1985)

Bu yayların, yalnız doğrudan doğruya yüklendiklerinde çöküp tepki gösterdikleri, ancak komşu yayların yüklenme ve çökmesinden etkilenmediği varsayılmaktadır. Bunun sonucu olarak, zemin tamamen süreksiz bir ortam olarak göz önüne alınmış olur (Hetenyi, 1955; Selvadurai, 1979). Winkler uzayı üzerine oturan tekil bir yükle yüklenmiş elastik bir kiriş Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Elastik yatağa oturmuş sonsuz uzunluktaki kiriş (Boreasi ve diğ., 1993)

Kiriş ortasına etkiyen tekil yükleme altında,  $b$  genişliğinde elastik bir kirişin winkler yarı uzayına mesnetlenmesi durumunda, Şekil 3.4’de görülen eğilme eğrisinin diferansiyel denklemi ile eğilme momentinin diferansiyel denklemi birbirine bağlıdır.

$$\frac{dy}{dz} = 0 \quad (3.1)$$

$$M_x = -EI_x \frac{d^2y}{dz^2} \quad (3.2)$$

$$q = EI_x \frac{d^4 y}{dz^4} \quad (3.3)$$

Uygulanan tekil yüke bağlı lineer elastik kirişte oluşan çökmeler, taban basıncı ile orantılı olarak oluştuğundan denklem (3.4) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$q = Ky \quad (3.4)$$

Burada,  $K$  zemin yatak katsayısını ifade etmektedir. Yukarıda verilen bağıntılardan  $q$  taban basıncına bağlı olarak oluşan  $y$  çökmesi için 4.dereceden adi bir diferansiyel denklem (3.5) elde edilir.

$$-Ky = EI_x \frac{d^4 y}{dz^4} \quad (3.5)$$

Tekil bir yük etkisindeki elastik bir kiriş için denklem (3.5)'in sabit teriminin 4.dereceden kökü elastik boy ( $L$ ) olarak bilinir.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI_x}{K}} \quad (3.6)$$

Denklem (3.5)'in genel çözümü, tanımlanan  $\beta$  katsayısına göre denklem (3.8)'deki gibi elde edilmektedir:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI_x}} \quad (3.7)$$

$$y = \frac{P\beta}{2K} e^{-\beta z} (\sin \beta z + \cos \beta z) \quad z \geq 0 \quad (3.8)$$

Gerçekleştirilen analizler için bu matematik modele ait özellikleri Tablo 3.1'de özetlenmiştir.

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

Bileşenler	Karakteristikler	Semboller	Büyüklik	Birim
<b>Lokomotif</b>	Dingil yükü	$F_z$	180	kN
<i>HT 65000</i>	Hareket hızları	$V$	69,44	m/sn
<b>Demiryolu</b>				
<i>2UIC 60</i>	Kesit alanı	$A_r$	$1.54 \times 10^{-2}$	$m^2$
	Atalet momenti	$I_z$	$6.11 \times 10^{-5}$	$m^4$
	Elastisite modülü	$E$	$2.11 \times 10^8$	$kN/m^2$
	Birim hacim ağırlık	$\gamma$	78	$kN/m^3$
<b>Balast</b>				
<i>Yay-söndürücü</i>	Rijitlik katsayısı	$k_b$	$1.26 \times 10^5$	kN/m
<i>sistem</i>	Sönüm katsayısı	$c_b$	$1.69 \times 10^2$	$kNsn/m$

### 3.1.3. Hareketli yükün modellenmesi ve zaman bölgesinde çözümü

Yüksek hızlı tren setinin zamana ve konuma bağlı yük dağılımının sayısal modele dâhil edilmesi bu çözüm algoritmasının önemli aşamalarından birisini oluşturmaktadır. Bu çalışmada katar yükü olarak sadece lokomotifin kendisi dikkate alınmıştır. Lokomotifin özağırlığı dingiller aracılığıyla raylara aktarılmaktadır.

Vagon ağırlıklarının lokomotif ağırlığına göre daha küçük değerlerde kalması, aynı zamanda da hareketlerinin zemin titreşimine olan katkısının lokomotife göre az olması nedeniyle hesaplarda etkileri dikkate alınmamıştır.

Demiryolu üstyapı tasarımında tren yüklerinin zemine aktarılması işlemi kademe kademe gerilmelerin azaltılması prensibine dayanır. En büyük gerilmeler tekerlekler ile raylar arasında oluşurken, raylar ile traversler arasındaki gerilmelerin etkisi ikinci mertebeden kaldığından, traversler ile altındaki balast yatağı arasındaki gerilmeler ihmal edilmiştir (Verbic, 1996).

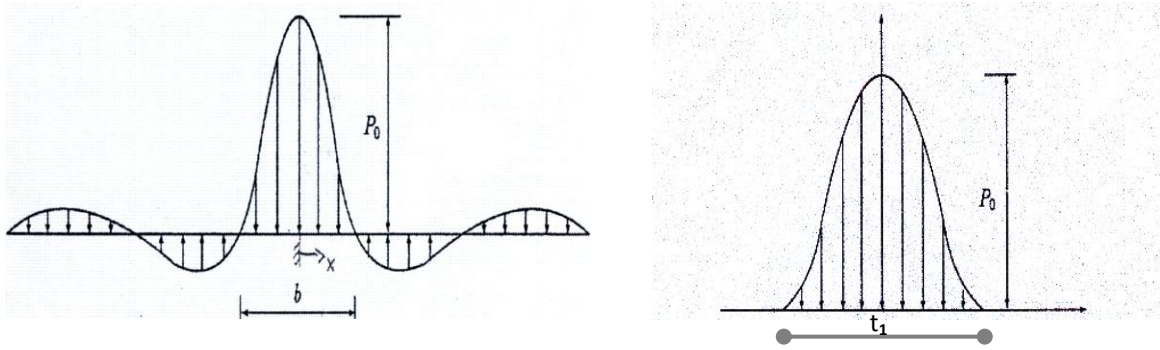
Elastik temel ortamına oturan bir şerit üzerinde hareket eden tekil yükün değme yüzeyinde meydana getirdiği gerilme dağılışı, denklem (3.9)'da verildiği gibi elastik bir zemine oturan bir kirişin gerilme davranışının belirlenmesinde kullanılan bağıntılardan elde edilir (Huber 1988).



$$p(x) = \frac{P}{\sqrt{2L}} e^{-\frac{|x|}{L}} \sin\left(\frac{|x|}{L} + \frac{\pi}{4}\right) \quad L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}} \quad (3.9)$$

Burada şeridin rijitliği yaklaşık olarak demiryolu üst yapısının rijitliğine eşdeğer alınmıştır. Gerilme diyagramının ilk iki sıfır noktası arasındaki ve  $b$  uzunluğu ile gösterilen büyük parça katar yükü olarak bu çalışmalarda dikkate alınmıştır (Şekil 3.5a).

Sabit  $v$  hızıyla hareket eden bir kuvvetin, yol güzergâhı üzerinde herhangi bir noktadaki durumu gözlemlendiğinde, o noktada sabit bir yükün darbe biçiminde etkisinin zamana bağlı değişimi elde edilir (Şekil 3.5b). Bu darbe yükünün tesir süresi  $t_1 = \frac{b}{v}$  oranına eşit olur (Huber ve diğ., 1984).



a) Üstyapı-zemin arakesitindeki gerilme dağılışı

b) Kesik darbesel türde hareketli yük

Şekil 3.5. Elastik zemine oturan bir kiriş üzerinde bulunan tekil kuvvetin zeminle arakesitinde meydana getirdiği gerilme diyagramı (Verbic, 1996)

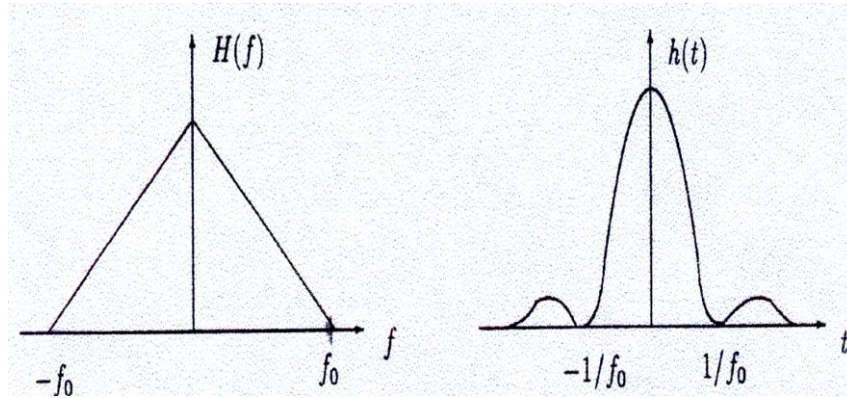
Bazı nümerik çözüm tekniklerine bağlı geliştirilen matematik modellerin, SSI2D/3D (Schmid ve diğ., 1988) ve SASSI (Lysemer ve diğ., 1988 a-b) gibi özel programlarda dinamik davranışı belirlemek için yürütülen araştırmaların çoğu frekans bölgesinde gerçekleştirildiğinden, zaman bölgesinde tanımlanan darbe yüküne ayrık Fourier dönüşümü uygulanarak frekans tanım aralığında çözümü elde edilir.

Demiryolu üstyapısı ile zemin arakesitinde oluşacak gerçek gerilme dağılımı yerine çözümü basitleştirebilmek için aşağıda verilen formül ile tanımlanan başka bir darbe fonksiyonu Schmid ve Verbic (1997) tarafından elde edilmiş ve bu yaklaşım

araştırmacılar tarafından etkin bir biçimde kullanılmıştır. (Tosecky, 2001, Çelebi ve Schmid, 2005).

$$P(t) = P_o \frac{\sin^2\left(\pi\frac{t}{t_1}\right)}{\left(\pi\frac{t}{t_1}\right)^2} \quad (3.10)$$

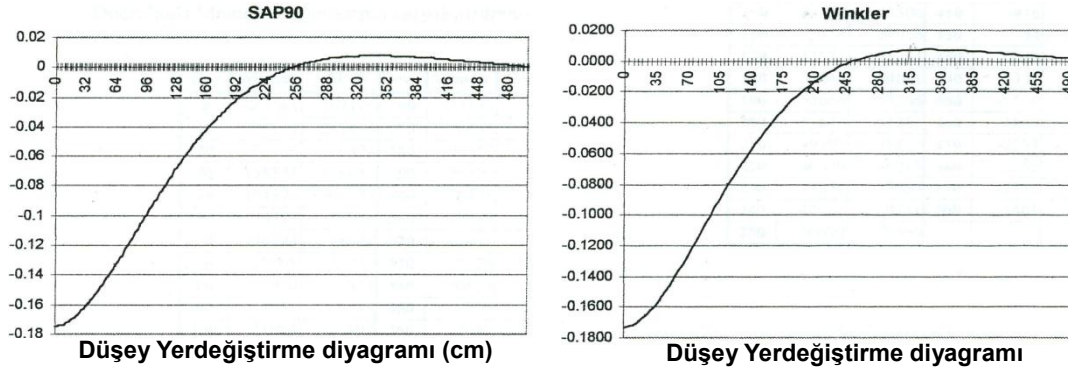
Böyle bir etkinin Fourier dönüşümü de basit bir üçgen biçiminde ortaya çıkar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Darbe etkisinin Fourier dönüşümü (Verbic, 1996)

Güler (1998) yaptığı tez çalışmasında, ray ve traverslerden oluşan demiryolu üstyapısını, elastik yatağa oturan sürekli bir kiriş olarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Geliştirilen sonlu eleman modelinde zemin bir yay olarak kabul edilmiş ray ve travers'den oluşan sonsuz kiriş yay mesnetler üzerine oturtulmuştur. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenen Winkler elastik yatak modeli analiz sonuçları analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 3.7).

Aşağıda verilen grafiklerden ve düşey doğrultuda hesaplanan yerdeğiştirmelerden görüldüğü üzere, sonlu elemanlar yöntemi ile analitik çözüm sonuçları 360cm için yaklaşık aynı değerleri vermiştir. Bu sebeple, tekerlekten raya aktarılan yükün etkili olduğu elastik boy uzunluğu  $L=3.6m$  olarak seçilmiştir. İki travers arasındaki mesafenin 0.6m olduğu düşünüldüğünde yükün etkisi yedi travers elemanına karşı gelmektedir.



(a) Çökme Diyagramları

Boy	Winkler	SAP90	Boy	Winkler	SAP90
0	-0.1734	-0.1747	260	0.0015	0.0018
10	-0.1720	-0.1730	270	0.0032	0.0035
20	-0.1681	-0.1688	280	0.0046	0.0048
30	-0.1622	-0.1627	290	0.0056	0.0059
40	-0.1547	-0.1550	300	0.0064	0.0067
50	-0.1460	-0.1462	310	0.0070	0.0072
60	-0.1365	-0.1365	320	0.0073	0.0076
70	-0.1265	-0.1264	330	0.0075	0.0077
80	-0.1161	-0.1159	340	0.0075	0.0077
90	-0.1057	-0.1054	350	0.0074	0.0076
100	-0.0953	-0.0950	360	0.0072	0.0074
110	-0.0853	-0.0849	370	0.0069	0.0071
120	-0.0755	-0.0752	380	0.0066	0.0067
130	-0.0663	-0.0659	390	0.0062	0.0063
140	-0.0575	-0.0572	400	0.0057	0.0059
150	-0.0494	-0.0490	410	0.0053	0.0054
160	-0.0418	-0.0415	420	0.0049	0.0048
170	-0.0349	-0.0345	430	0.0044	0.0043
180	-0.0286	-0.0283	440	0.0040	0.0037
190	-0.0229	-0.0226	450	0.0035	0.0032
200	-0.0178	-0.0175	460	0.0031	0.0026
210	-0.0133	-0.0130	470	0.0027	0.0020
220	-0.0094	-0.0091	480	0.0024	0.0015
230	-0.0059	-0.0057	490	0.0020	0.0009
240	-0.0030	-0.0028	500	0.0017	0.0003
250	-0.0005	-0.0003			

(b) Çökme Değerleri

Şekil 3.7. Sonsuz kirişe ait düşey doğrultuda çökme değerlerinin sonlu elemanlar ile klasik yöntem çözümlerinin karşılaştırılması (Güler, 1998)

Doktora tezi olarak yapılan bu çalışmada, Türkiye'deki yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan HT 65000 serisi lokomotif seti 4 dingilli ve ağırlığı yaklaşık

olarak  $720kN$  olarak hesaba katılmıştır. Lokomotifin uzunluğu  $25m$  olarak belirlenmiştir. Bu durumda bir tekerlek  $90 kN$ 'luk bir kuvvetle etki etmektedir. Katar yükünün konuma ve zamana bağlı dinamik büyüklüğünün tam olarak elde edilebilmesi için etkili olduğu uzunluktaki yayılı yük dağılımının bileşke değerinin lokomotifin bir tekerleğinin raya uyguladığı kuvvete eşitliğinden bulunmuştur.

İlk aşamada yükün etkili olduğu uzunluktaki rayların altında yer alan her bir traverse etki edecek tekil yük değerleri bulunur. Yukarıda verilen (3.10) nolu eşitlikteki zamana bağlı ifadeler konuma bağlı tekrar düzenlenirse ( $t=x/v$ ,  $t_1=L/2v$ ;  $t \rightarrow x$ )

$$P(t) = P_o \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \frac{2x}{L}}{2}\right)}{\left(\frac{\pi \frac{2x}{L}}{2}\right)^2} \quad (3.11)$$

*Hatırlatma:*

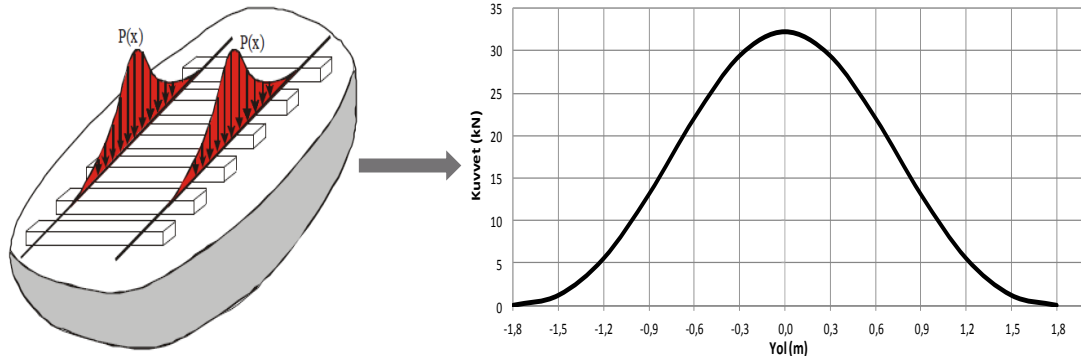
$$\lim_{x \rightarrow 0} (\sin ax)/ax=1; \lim_{x \rightarrow \infty} (\sin ax)/ax=0$$

elde edilir. Şekil 3.5b'de verilen yük eğrisinin altında kalan alan A ise,

$$A = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} p(x) dx \quad (3.12)$$

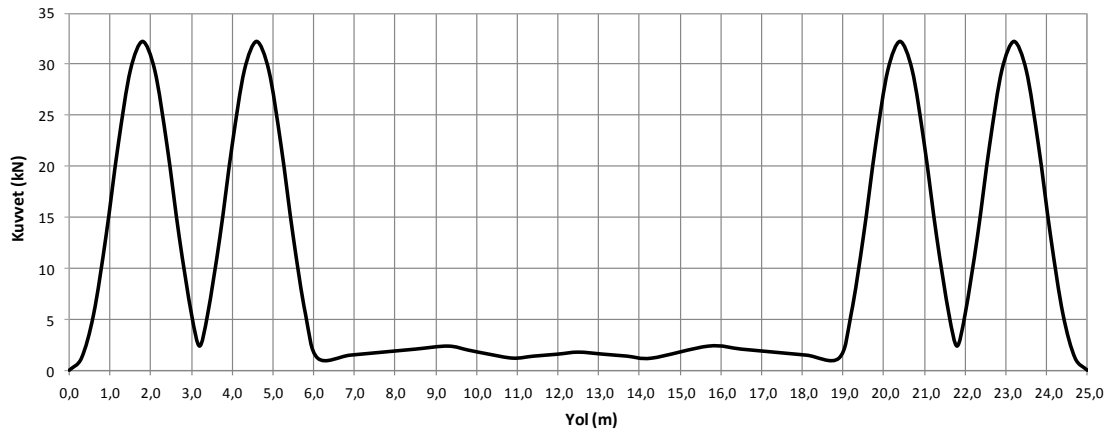
şeklinde bulunur. Yukarıdaki ifadelerin (3.11) ve (3.12) kullanılmasıyla ve tekerlek yükünün Şekil 3.5b'de gösterilmiş olan yük diyagramının alanına eşitliğinden yararlanarak  $L=3.6m$  boyunca yükün genliği  $P_o=55,38 kN/m$  olarak elde edilmiştir.

Katardan raylar arasında bulunan her bir travers elemanına aktarılan tekil kuvvetler (3.12) nolu bağıntıda integral adım mesafeleri  $\Delta L=0.6 m$  (traversler arası mesafe) olacak şekilde düzenlenmiş ve integral çözümleri matematiksel program kullanılarak yapıldıktan sonra tek teker için traverslere aktarılan eşdeğer kuvvet diyagramı elde edilmiştir (Şekil 3.8).



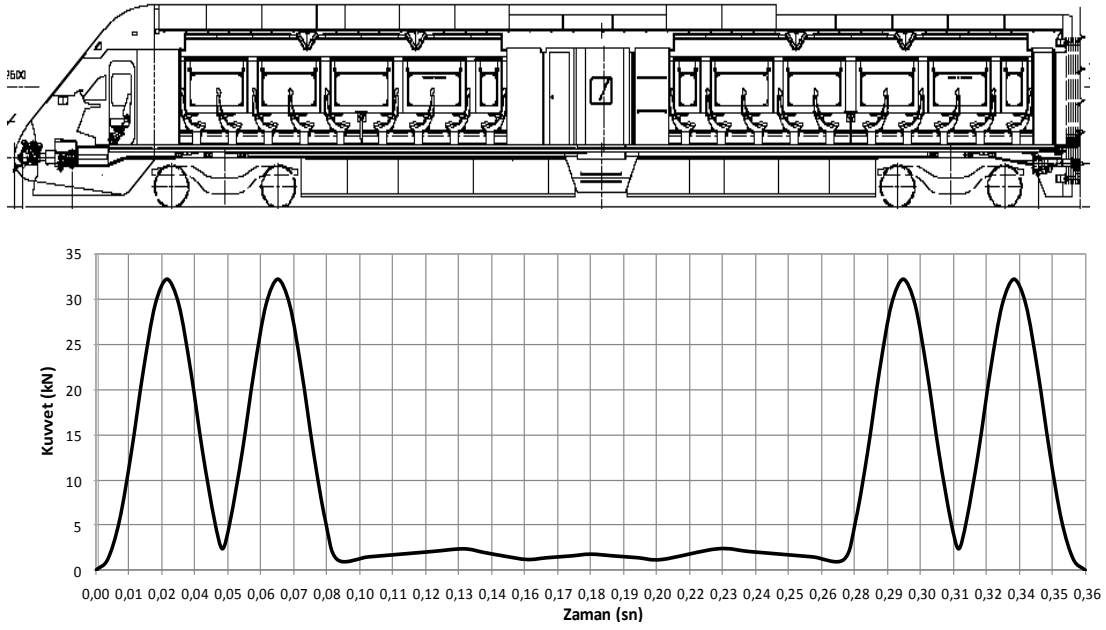
Şekil 3.8. Traverslere aktarılan tekil kuvvetler ve eşdeğer kuvvet diyagramı

Lokomotifin dört ardışık tekerinin demiryolundan geçişi esnasında ray üzerindeki etkisi, Şekil 3.8’de verilen tek bir tekere ait yük dağılımının dört kez süperpoze edilmesiyle elde edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Lokomotifin tekerlek aksları arasındaki mesafe ve tesir kuvvetlerinin dağılımı

Sayısal işlemlerde katar hızı  $V=250 \text{ km/h}=69.44 \text{ m/sn}$  olarak alınmıştır. Uzunluğu  $25 \text{ m}$  olan lokomotifin geçişi esnasında tekerleklerin değme noktalarında meydana getireceği darbe etkileri  $t = 0.36 \text{ sn}$  sürmektedir. Şekil 3.10’da katar yükünün zamana bağlı darbe etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Tesir kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi ( $V=69,44 \text{ m/sn}$ )

### 3.1.4. Frekans bölgesinde çözüm

Zaman bölgesinde tanımlanan periyodik veya periyodik olmayan titreşimli hareketin frekans tanım aralığındaki çözümü Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilebilir. Verilen bir  $f(t)$  dinamik yükün Fourier dönüşümü ve bu yükün harmonik bileşenlerine karşı gelen  $F(\omega)$  ters dönüşümleri aşağıda verilen analitik ifadeler ile tanımlanır:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.13)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (3.14)$$

Fourier veya ters Fourier dönüşümlerine ait uygulamalar bazen çok karmaşık integrallerin çözümünü gerektirdiğinden daha basit bir yaklaşım için ayrık Fourier dönüşümlerinden yararlanılır (Kramer, 1996).

Birçok uygulamada yükleme veya hareket parametreleri bir analitik fonksiyon yerine sonlu sayıdaki veri noktaları ( $N$ ) ile tanımlanır. Fourier katsayıları böyle durumlarda entegrasyon yerine toplam ile gösterilir.

$$F_n = \frac{T}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-i2\pi \frac{nk}{N}} \quad T = N\Delta t \quad (3.15)$$

$n=0,1,2,\dots \dots \dots,N-1$

$$f_k = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{-i2\pi \frac{nk}{N}} \quad T = N\Delta t \quad (3.16)$$

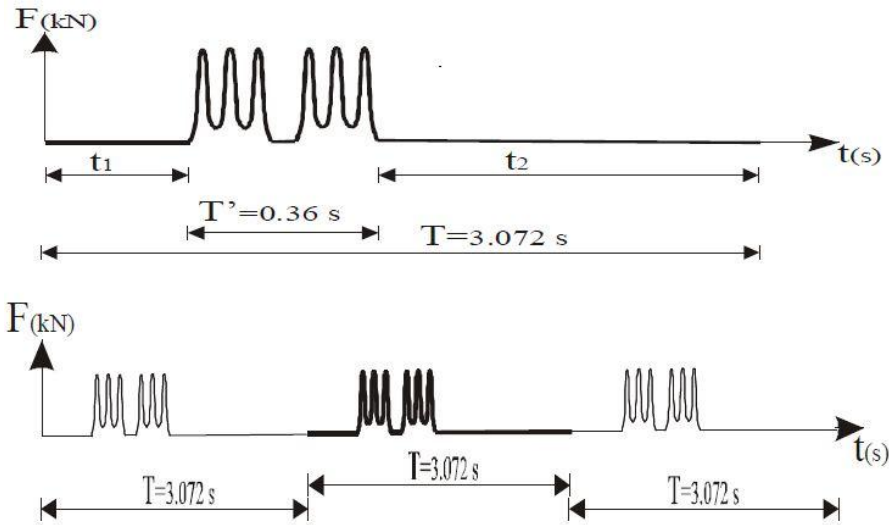
$k=0,1,2,\dots \dots \dots,N-1$

Daha etkili ve hızlı bir ayrık Fourier yaklaşımının (Hızlı Fourier Dönüşümü) uygulanabilmesi için dönüşümü tamamlamakta kullanılacak nokta sayısı  $N=2^n$  ( $n=2, 3, 4, \dots$ ) şeklinde seçilmelidir. Periyodun ( $T$ ) tanımlanması için diğer bir parametre ise, zaman adımının ( $\Delta t$ ) uygun bir şekilde belirlenmesidir. Zaman adımı, hareket adım mesafesine yani hareket doğrultusundaki güzergahın ayrıklaştırılmasında kullanılacak olan eleman boyutuna ve tren hızına bağlıdır (Çelebi ve diğ., 2006b).

Bu çalışmada hızlı Fourier dönüşümün uygulanabileceği nokta sayısı  $N=512=2^9$  olacak şekilde seçilmiş olup, katar yolunun herhangi bir noktasındaki zamana bağlı yük dağılımının şekli uzaklığa bağlı yük dağılımının şekli ile özdeş olduğundan dolayı zaman aralığı  $\Delta t=0.006$  sn olarak alınmıştır (Tosecky, 2001). Bu aşamada, Fourier dönüşümü için fonksiyonun periyodu;  $T=N\Delta t=3.072$  sn olarak bulunmuştur.

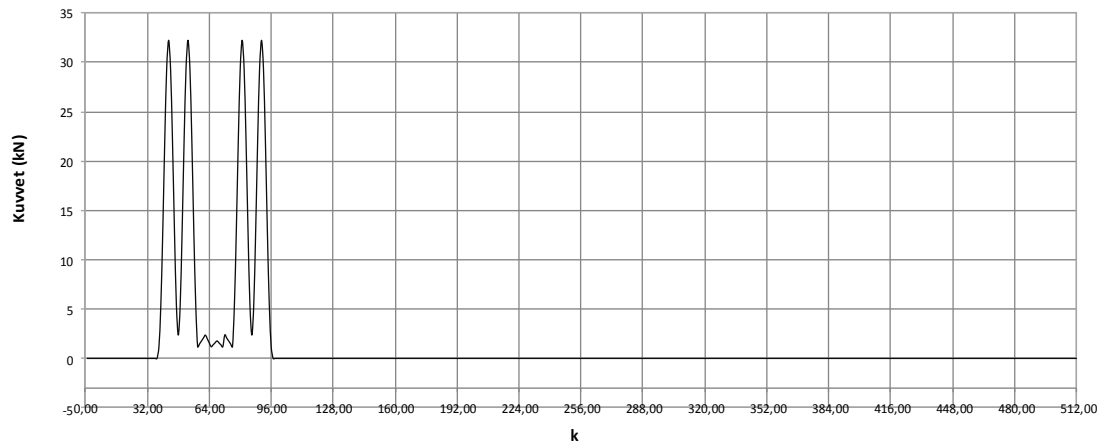
Ayrık Fourier dönüşümünün zamana bağlı ifadesini bir fonksiyon olarak değil,  $N$  sayıda veri noktalarından oluşan ve ayrık zaman adımları için fonksiyonun aldığı değerlerden meydana gelen bir dizi şeklinde ifade etmek daha doğru olacaktır.

Fourier dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi için kullanılacak fonksiyonun bir döngüsünün zamana bağlı değişimi ve tüm hareketinin periyodik davranışı Şekil 3.11'de verilmiştir. Burada  $t_1$  ve  $t_2$  zaman dilimleri hiçbir hareketin olmadığı sessiz aralıklar olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.11. Fourier dönüşümünde kullanılacak olan fonksiyonun bir döngüsünün zamana bağlı değişimi ve tüm hareketinin periyodik davranışı

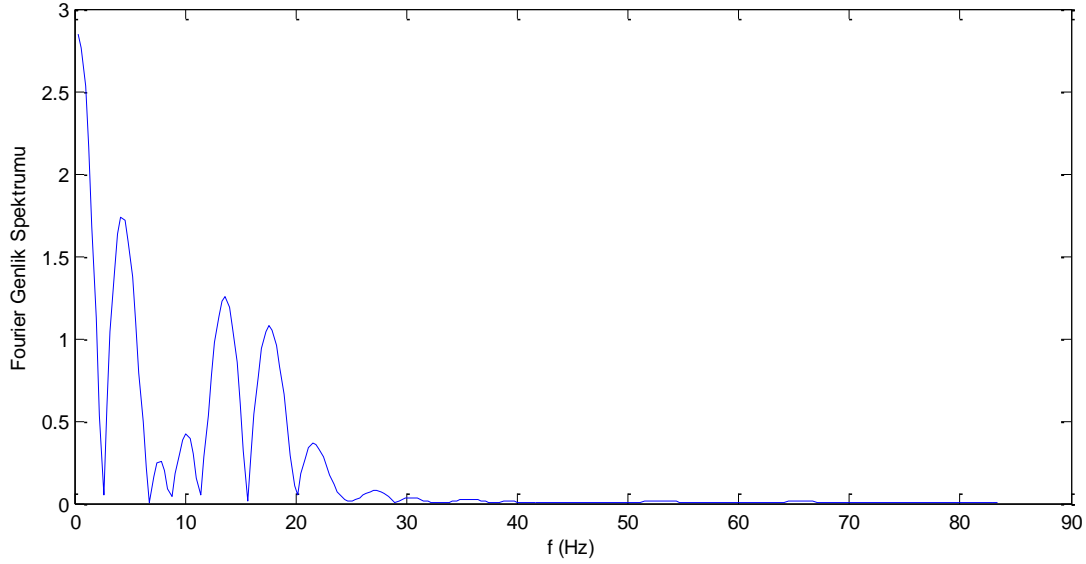
Yük fonksiyonu  $f(t)$ ,  $N_f$  sayıda satırdan oluşan  $f_k$  vektörüyle gösterilmiştir. Yüksek hızlı trenlerin oluşturmuş olduğu hareketin durgunluk dönemi olarak tanımlanan  $t_1$  süresi boyunca bu fonksiyonun ilk 36 terimi sıfır değeri alırken, 37 ile 97 arasındaki terimleri her bir zaman adımı için farklı kuvvet değerleri almaktadır. İkinci sakin süreç ise  $t_2$  zaman dilimi boyunca gerçekleşirken fonksiyonun 98'den 512'e kadar olan terimleri tekrar sıfır değerine karşılık gelmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Yük fonksiyonu ile hızlı Fourier dönüşümünde kullanılan terim sayısı arasındaki ilişki



Türkiye'nin yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan lokomotiflerin  $V=250 \text{ km/h}$  geçiş hızlarında demiryolu platformuna uyguladığı yük fonksiyonunun Fourier spektrumundaki önemli katkıları  $0 \leq f \leq 25 \text{ Hz}$  frekans aralığında görülmektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Katar yükünün frekans spektrumu ( $V=250 \text{ km/h}$ )

Yukarıdaki şekilde verilen, yüksek hızlı trenin  $V=250 \text{ km/h}$  geçişine ait frekans spektrumundan görüldüğü üzere katar yükünün oluşturmuş olduğu etkinin yüksek frekans içeriğine sahip olduğu anlaşılmıştır.

### 3.2. Sonlu Eleman Analizlerine Etki Eden Faktörler

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen nümerik bir çözüm yöntemidir. Bu çözüm yaklaşımında, sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünür ve oluşturulan her bir eleman için ayrı ayrı denklemler yazılır. Nümerik çözüme ait denklem takımları integre edilerek sistem denklemleri elde edilir. Sonuç itibarıyla, sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenmiş olur.

Seçilen birincil bilinmeyenler (yerdeğiştirme) ile bunlara bağımlı ikincil bilinmeyenlerin (gerilme, şekil değiştirme) birlikte ele alınarak geliştirilen sonlu eleman formülasyonu, karmaşık geometri, farklı yükleme şartları, sınır koşulları ve malzeme durumu gibi parametrelerin dikkate alınabildiği birçok probleme uygulanabilmektedir.

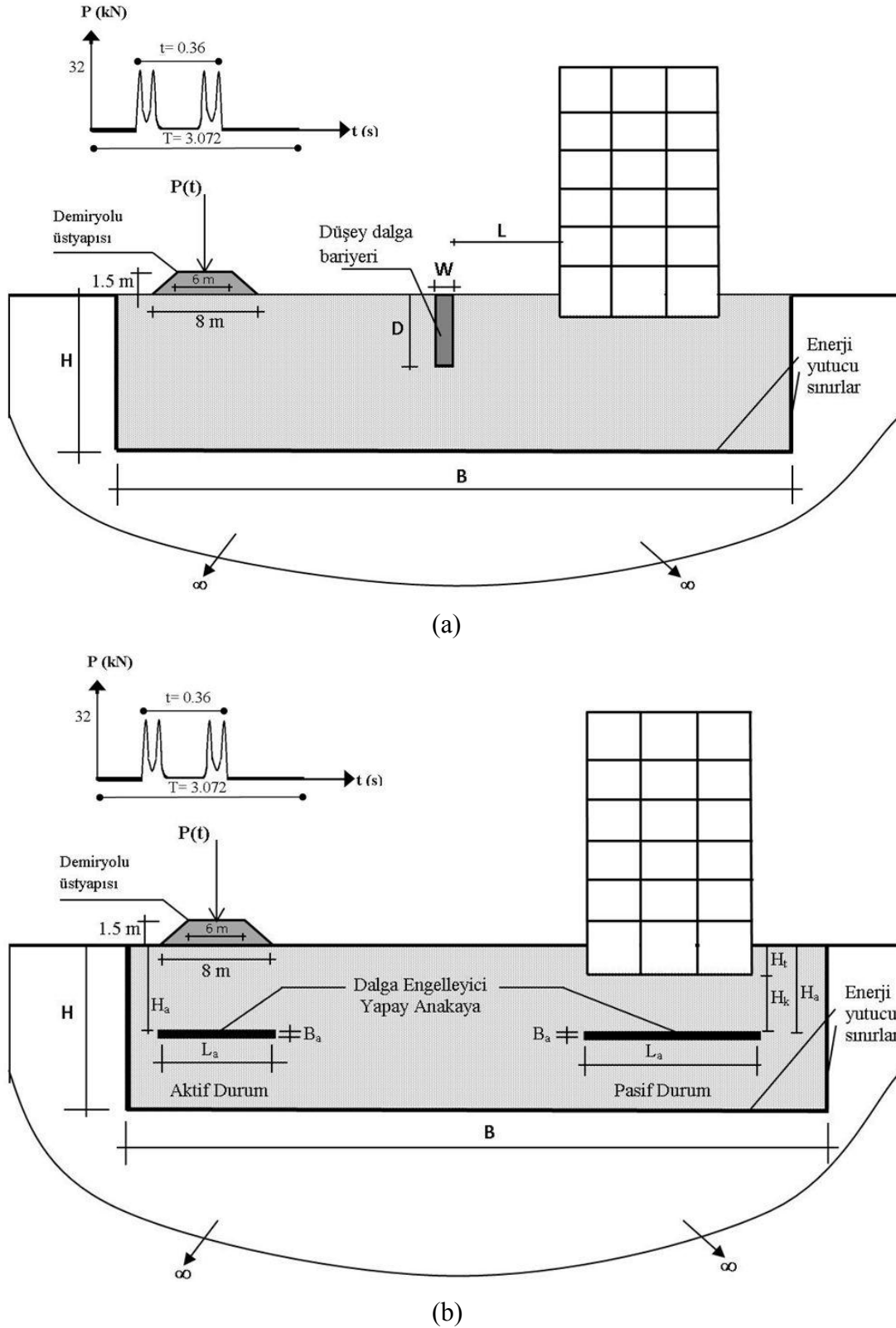
Bu çalışmada, titreşim yükünün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için, dinamik sınır şartlarının ve malzeme davranışının uygun bir şekilde tanımlanabildiği sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D dinamik modülü (Brinkgreve ve diğ., 2002) bilgisayar programı kullanılmıştır.

Dalga yalıtım bariyerinin performansını değerlendirebilmek için geliştirilen sonlu eleman modeli, düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınmıştır. Analizleri yapılacak yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin düşey ve yatay dalga bariyerleri için şematik görünümü Şekil 3.14'de verilmiştir.

### **3.2.1. Genel modelleme özellikleri**

Analiz edilecek titreşim problemlerinin çözümü için ilk olarak tüm problemi gerçekçi bir şekilde temsil eden geometrik modelin oluşturulması gerekmektedir. Noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan geometrik model, zemin tabakalarını, yapısal elemanları ve yükleri kapsar.

Plaxis 2D sonlu eleman yazılımında geometri çizgilerinin girilmesiyle kapatılmış alan olarak tanımlanan hücreler içerisinde zemin özellikleri homojendir. Bu nedenle, hücreler zemin tabakalarını oluşturan parçalar olarak düşünülebilir. Hücrelere gelen etkiler hücre içerisindeki bütün elemanlara etkimektedir.



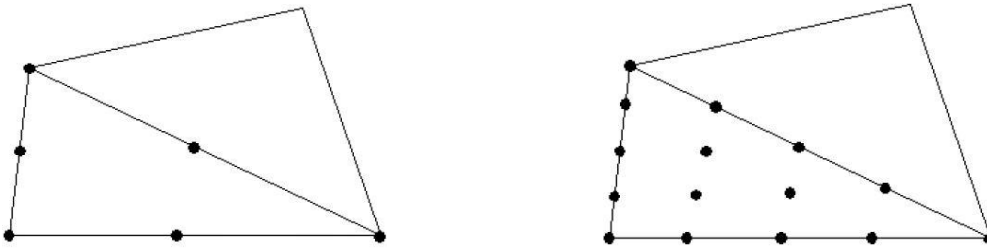
Şekil 3.14. Dalga engelleyiciler kullanarak üstyapı titreşim etkilerinin azaltılması

(a) Düşey dalga bariyeri (b) Dalga engelleyici yapay anakaya

Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında, hücreler üçgen elemanlara ayrılırlar. Plaxis 2D programının kütüphanesinde düzlem elemanlar için kullanabilecek, üçgen geometriye sahip 15-düğüm noktalı ve 6-düğüm noktalı iki farklı sonlu eleman tipi bulunmaktadır (Şekil 3.15).



Gerilme noktaları



Düğüm noktaları

(a)

(b)

Şekil 3.15. (a) 6-düğüm noktalı (b) 15-düğüm noktalı üçgen eleman sonlu eleman tipi

Geoteknik mühendisliği problemlerinde yerdeğiştirme ve taşıma gücü analizleri için özel olarak geliştirilen sonlu eleman yazılımı kullanılarak yapılan nümerik çözümlerinin gerçekçi ve güvenilir olması bakımından 15 düğüm noktalı elemanların seçimi daha uygundur. Buradaki en önemli sorun, 12 gerilme noktasına sahip 15 nodlu üçgen şeklinde sonlu eleman tipinin, 3 gerilme noktasına sahip 6 nodlu eleman tipine göre, analiz süresi açısından çok daha fazla zaman aldığıdır (Brinkgreve, 2002).

Bu çalışmada, zemin bölgesinin ayrıklaştırılması işlemi için, 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmış ve her bir düğüm noktasında düzlemin farklı doğrultuları için iki ötelenme serbestlik derecesi ( $u_x$  ve  $u_y$ ) bilinmeyen olarak tanımlanmıştır.

### 3.2.2. Malzeme davranış modelleri

Genel anlamda, yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinde yarı sonsuz elastik bir ortam olarak modellenen zemin bölgesi, dış yüklerin frekans içeriğine bağlı farklı davranış sergileyebilir. Bu tip dalga yayılım problemlerinin çözümü için geliştirilen matematik modellerde, altyapıyı oluşturan zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil eden malzeme modelinin belirlenerek, sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılması ve buna bağlı olarak radyasyon koşulunun sağlanması, kesim noktalarında uygun sınır koşullarının yazılarak, geometrik sönümün probleme dahil edilmesi gerekmektedir.

#### 3.2.2.1. Lineer elastik model

Bu model yaklaşımında, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu yani gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarının elastik bölgede lineer bir ilişkiye sahip olduğu tanımlanmaktadır. Doğrusal (elastik) izotropik homojen malzeme davranışı Elastisite modülü ( $E$ ) ve Poisson oranı ( $\nu$ ) olmak üzere yalnızca iki parametre ile tanımlanmaktadır. Plaxis programında genellikle zemin içerisindeki rijit yapıları modellemek için kullanılan ve en temel malzeme modeli olan lineer elastik malzeme davranışı için gerilme-şekildeğiştirme;

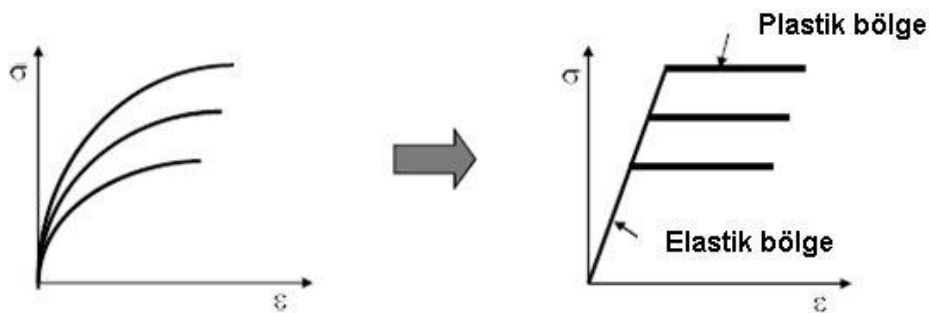
$$\begin{Bmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

denklemini yardımıyla bulunmaktadır. Burada,  $\sigma'$  zeminin efektif gerilmelerini,  $\epsilon$  zeminin şekil değiştirme artış hızlarını ifade ederken,  $E'$  efektif durumdaki elastisite modülü,  $\nu'$  ise efektif durumdaki poisson oranını tanımlamaktadır.

Zemin bölgesinin yük altında sıkışması, şekil değiştirmesi ve kayma gerilmelerine karşı direnci gibi ölçülebilen bütün mühendislik davranışları, zemin içinde verilen bir nokta üzerinde etkiyen toplam asal gerilmeler ile hidrostatik boşluk suyu basıncı arasındaki farka eşit olan efektif asal gerilmeler tarafından kontrol edilmektedir. Bu fenomen ilk defa Terzaghi (1936) tarafından fark edilerek efektif gerilme kavramı geliştirilmiştir. Zemin malzemesinin daneli bir yapıya sahip olduğu ve aralarındaki boşluklarda su ve/veya hava bulunduğu göz önüne alınırsa, uygulanan toplam yükün bir kısmının daneler arası temas düzlemlerinde oluşan gerilmeler, geriye kalan kısmının ise boşluk suyu basıncı tarafından karşılanacağı düşünülebilir.

### 3.2.2.2. Doğrusal olmayan malzeme davranışı

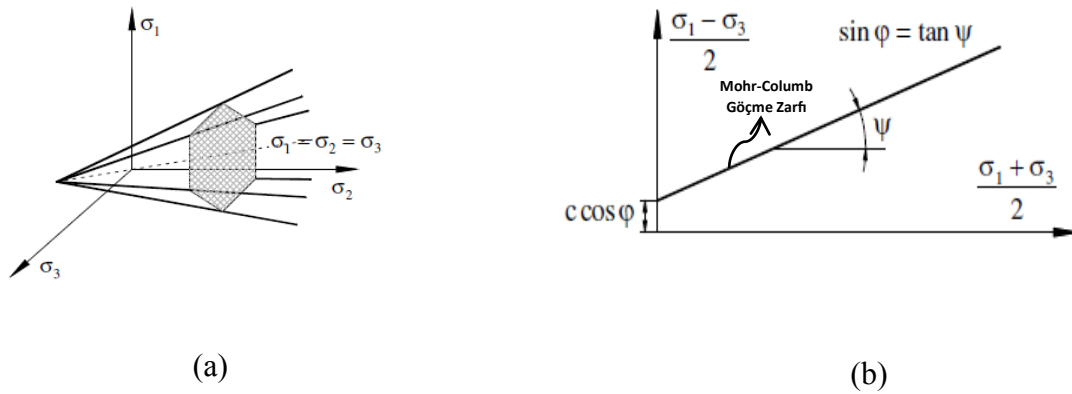
Lineer elastik malzeme dayanımı yaklaşımında akma yüzeyi sınırları aşıldığında gerilmeler dikkate alınmadığından dolayı, zemin ve beton gibi basınç dayanımları yüksek olan gevrek malzemelerde davranışın doğrusal olmayan esaslara göre şekillendiği bilinmektedir. Literatürde, uygulanan yüklere bağlı olarak malzemelerin doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı ile ilgili bünye bağlantılarını ifade eden birçok matematik model mevcuttur. Söz konusu modellerde, akma sınırından sonra meydana gelen kalıcı şekil değiştirmeler, doğrusal elastik ve plastik bölgelerde oluşmaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Elasto-plastik davranış

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan nümerik çalışmalarda, sonsuza uzanan zemin bölgesinin doğrusal olmayan davranışını temsil eden malzeme tanımlaması için Mohr-Coulomb yenilme kriteri altındaki elasto-plastik malzeme davranışı etkin

bir biçimde kullanılmaktadır (Yang ve Jeremic, 2003; Johnson ve diğ., 2006; Karthigeyan ve diğ., 2007; Madheswaran ve diğ., 2009; Çelebi ve Göktepe, 2012). Bu teoride, akma yüzeyi sadece büyük ve küçük asal gerilmelere bağlı olup, Şekil 3.17a'da görüldüğü üzere  $F(\sigma, \varphi)$  fonksiyonu ile tanımlanan ve plastik gerilmelerden bağımsız altıgen kesitli bir piramitten oluşmaktadır. Bu altıgen piramit, altyapıyı oluşturan zemin tabakasının maruz kaldığı dinamik yüklemelerin neden olduğu elasto-plastik malzeme davranışını ifade eden göçme/yenilme zarfını şekillendirmektedir. Gerilme noktaları Şekil 3.17b'de görünen göçme zarfı içinde kalırsa zemin elastik davranış sergileyecek, yenilme yüzeyine ulaşırsa zemin malzemesinde kalıcı veya plastik şekil değiştirmeler oluşacaktır.



Şekil 3.17. Mohr-Coulomb akma kriteri

Mohr-Coulomb zemin davranış modelini tanımlamak için gerekli plastisite parametreleri sırasıyla, kayma direnci açısı ( $\varphi$ ), şişme açısı ( $\psi$ ) ve kohezyon değeri ( $c$ ) 'dir. Nümerik analizlerde altyapıyı oluşturan zemin bölgesinin elastiklik özelliği ise, elastisite modülü ( $E$ ) ve Poisson oranı ( $\nu$ ) ile tanımlanmaktadır. Mohr-Coulomb elasto-plastik malzeme davranışının iki boyutlu durumda akma kriteri yenilme fonksiyonu belirlenen  $(x, y)$  koordinat sisteminde aşağıdaki gibi yazılabilir (Smith ve Griffith, 1982).

$$f(\sigma, \varphi) = |\sigma_i - \sigma_j| - (\sigma_i + \sigma_j) \sin \varphi - c \cos \varphi \quad (3.18)$$

$$g(\sigma, \psi) = |\sigma_i - \sigma_j| - (\sigma_i + \sigma_j) \sin \psi \quad (3.19)$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{ii} + \sigma_{jj}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2}\right)^2 + \sigma_{ij}^2}, \quad \sigma_j = \frac{\sigma_{ii} + \sigma_{jj}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2}\right)^2 + \sigma_{ij}^2} \quad (3.20)$$

Üstyapı-zemin ortak sisteminin yatay ve düşey arakesitlerinde dinamik etkileşimi rasyonel bir yaklaşımla idealize edebilmek için arayüz dayanım azaltma katsayısı ( $R_{inter}$ ) kullanılmıştır. Etkileşim yüzeyinde küçük deformasyonların oluşabileceği elastik ve kalıcı deformasyonların oluşabileceği plastik davranışı ayırt etmek için Coulomb kıstasından yararlanılmıştır. Plastik davranış için kayma gerilmesi ( $\tau$ ),

$$|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (3.21)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $\varphi_i$  ve  $c_i$  sırasıyla ara yüzeyin kayma direnci açısını ve kohezyon değerini göstermektedir. Ara kesit özellikleri kendisini çevreleyen malzeme özelliklerine ve ortak mukavemet azaltma faktörüne bağlı olarak aşağıda verilen kurallara göre hesaplanır;

$$c_i = R_{inter} c_{zemin}$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{zemin} \leq \tan \varphi_{zemin} \quad (3.22)$$

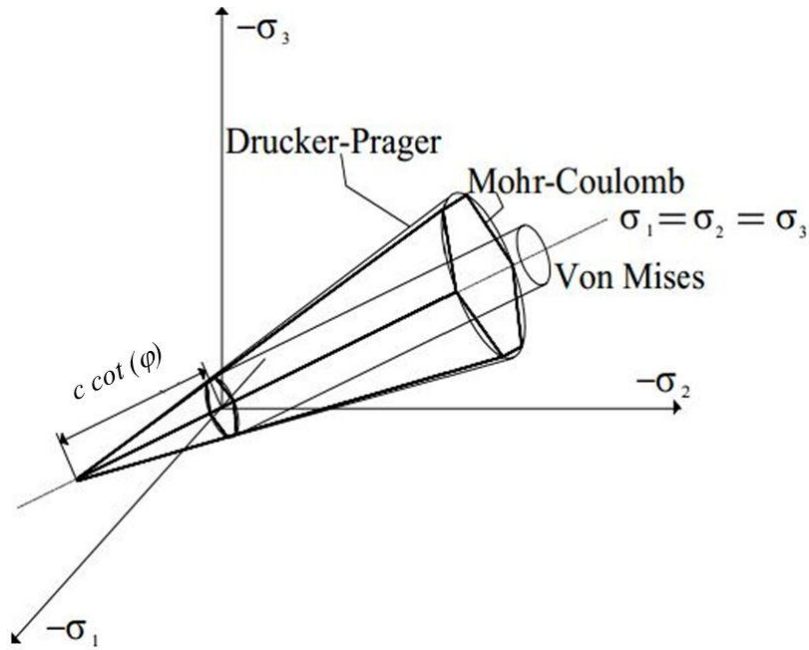
$\psi_i = 0^\circ$  için  $R_{inter} < 1$ , diğer durumda  $\psi_i = \psi_{soil}$

Genelde, gerçek yapı-zemin dinamik davranışında ara yüzey kendini çevreleyen zemine göre daha zayıf ve daha elastik davranış gösterdiğinden mukavemet özellikleri kendilerini çevreleyen zemininkinden daha düşük değerde veya eşit ( $R_{inter} \leq 1$ ) olması gerekir. Yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinin sonlu elmanlar analizinde arayüz dayanım azaltma katsayısı için  $R_{inter} = 0.67$  değeri kullanılarak sayısal çözümler yapılması önerilmiştir (Brinkgreve, 2002).

Malzemelerin lineer olmayan davranışlarını tanımlamak için geliştirilen bir başka matematik model ise Mohr-Coulomb hipotezinin bir genelleştirmesi olan Drucker-Prager akma kriteridir. Bu yaklaşım, von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde modifikasyonundan elde edilmiştir. Zeminin kohezyon ( $c$ ) ve kayma



direnci açısı ( $\varphi$ ) gibi parametrelerine bağlı olarak ifade edilen Drucker-Prager yaklaşımında, plastik şekil değiştirme hacimdeki değişimle birlikte oluşmaktadır. Şekil 3.18'de görüldüğü üzere akma yüzeyi, Mohr-Coulomb akma yüzeyinin köşelerine temas ederek çevreleyecek şekilde malzeme parametrelerine sahip dik bir koni biçimindedir (Zeinkiewicz ve Taylor, 1991).

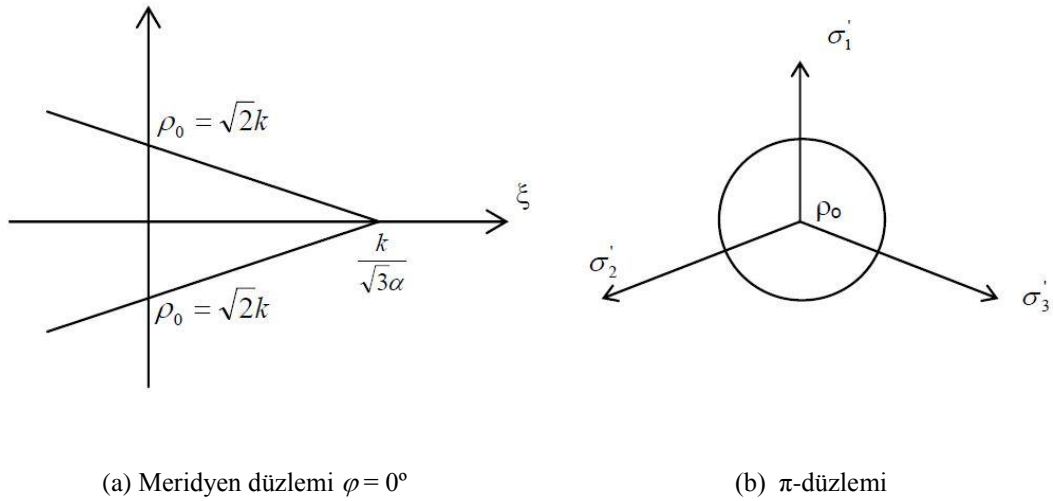


Şekil 3.18. Drucker-Prager, Mohr-Coulomb ve von Mises akma yüzeyleri (Calayır ve Karaton, 2004)

Drucker-Prager malzeme modelinde akma kriteri;

$$f(I_1, J_2) = aI_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3.23)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Burada  $a$  ve  $k$  malzeme sabitlerini,  $I_1$  gerilme tansörünün birinci invariantı ve  $J_2$  deviatör tansörünün ikinci invariantıdır.  $a = 0$  olması durumunda kriter, von-Mises kriteri ile aynı olacaktır. Denklem 3.23'in gösterdiği akma yüzeyi, asal gerilme uzayında bir dairesel konidir; meridyenleri ve  $\pi$ -düzlemindeki kesiti Şekil 3.19'da görüldüğü gibidir (Chen, 1988).



Şekil 3.19. Drucker-Prager akma kriteri (Chen, 1988)

Şekil 3.19’da verildiği gibi Drucker-Prager kriterinin dairesi, Mohr–Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse,  $\varphi = 60^\circ$  için  $a$  ve  $k$  değerleri belirlenecek basınç meridyenine uygun olarak;

$$a = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (3.24)$$

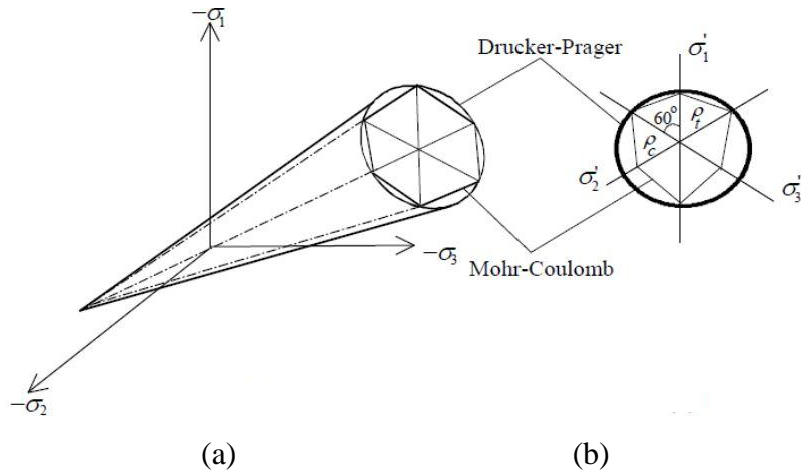
$$k = \frac{6 c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $\varphi$  ve  $c$  Mohr-Coulomb akma kriterinde de kullanılan zemin malzemesinin kayma direnci açısı ve kohezyon değerleridir. Denklem (3.3) ve (3.4)’deki sabitler ile belirlenen koni, Mohr-Coulomb akma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen bir dış zarf görünümündedir (Şekil 3.20). Ayrıca çekme meridyeninden ( $\rho$ ) geçen,  $\varphi = 0^\circ$  ile belirlenecek iç koniyi ifade eden sabitler;

$$a = \frac{2 \sin \vartheta}{\sqrt{3}(3 + \sin \vartheta)} \quad (3.26)$$

$$k = \frac{6 c \cos \vartheta}{\sqrt{3}(3 + \sin \vartheta)} \quad (3.27)$$

denklemleri yardımıyla belirlenebilir (Arslan, 2004).



Şekil 3.20. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin kıyaslanması  
(a) asal gerilme uzayında (b) deviatör düzleminde (Chen, 1988)

Bu çalışmada zemin malzemesinin doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı, daha etkili sonuçlar vermesinden dolayı, Mohr-Coulomb yenilme kriterinin kullanıldığı elastik-tam plastik malzeme modeli ile temsil edilmiştir.

### 3.3. Dalga Yayılım Problemi İçin Geliştirilen Sonlu Eleman Yöntemi ve Modelin Doğrulanması

#### 3.3.1. Analizde kullanılan malzeme davranış modelleri ve sonlu eleman türleri

Hareketli yükün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D (Brinkgreve ve diğ., 2002) bilgisayar programından yararlanılmıştır. Geliştirilen matematik modelde demiryolu altyapısını oluşturan ve Mohr-Coulomb malzeme modeli ile benzeştirilerek dikkate alınan zemin bölgesinin malzeme parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Zemin ortamının mekanik özellikleri

Parametre	Sembol	Birim	Büyüklik
Birim hacim ağırlık	$\gamma$	(kN/m <sup>3</sup> )	20.00
Elastisite modülü	$E$	(kPa)	53100.00
Kayma modülü	$G$	(kPa)	20420.00
Poisson oranı	$\nu$	-	0.30
Basınç dalgası	$c_p$	m/s	187
Kayma dalgası	$c_s$	m/s	100.00
Rayleigh sönüm katsayıları	$\alpha, \beta$	-	0.01
Boşluk oranı	$e$	-	0.80
Kohezyon	$c$	(kPa)	0.00
Kayma direnci açısı	$\varphi$	(°)	28.00
Şişme açısı	$\psi$	(°)	0
Arayüz dayanım azaltma faktörü	$R_{inter}$	-	0.67

Analizlerde dinamik davranışı incelenen yapı modeli,  $H_t = 1.5m$  temel derinliğinde 6 katlı 3 açıklıklı betonarme düzlem bir çerçevedir. Binanın yüksekliği 18 m genişliği ise 12 m'dir. Sözkonusu yapının yük kaynağından uzaklığı titreşim etkilerinin daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla 13 m olarak seçilmiştir. Demiryolu platformunun üst taban genişliği 6 m, alt taban genişliği 8 m ve zeminden yüksekliği 1.5m olarak belirlenmiştir (Şekil 3.14). Demiryolu platformu ve bina türü yapının malzeme davranış özellikleri doğrusal elastik olarak ele alınmış olup mekanik özelliklerine ait bilgiler Tablo 3.3'de verilmiştir.

Mühendisliğin pratik uygulamaları açısından kapsamlı parametrik araştırmalar ile yapısal çözümlerinin hızlı ve öngörülen doğrulukta gerçekleştirilmesi için sistemin geometrik ve malzeme özelliklerinin tren yükünün hareketi doğrultusunda değişmediği kabulü altında düzlem şekil değiştirme problemi olarak 2D sonlu elemanlar modeli benimsenmiştir.

Zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında 12 gerilme noktasına sahip 15 nodlu üçgen şeklinde sonlu eleman tipi kullanılmıştır. Her bir düğüm noktasında düzlemin farklı doğrultuları için iki ötelenme serbestlik derecesi ( $u_x$  ve  $u_y$ ) bilinmeyen olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.3. Üstyapıların mekanik özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
<i>Demiryolu üstyapısı</i>			
Eksenel rijitlik	$EA$	$3.49 \times 10^6$	(kN)
Eğilme rijitliği	$EI$	$6.55 \times 10^5$	(kNm <sup>2</sup> )
Ağırlık	$w$	29.43	(kNm <sup>2</sup> )
Poisson oranı	$\nu$	0.33	-
<i>Betonarme yapı</i>	$\nu$	0.20	-
<i>Kolonlar</i>			
Eksenel rijitlik	$EA$	$6.22 \times 10^6$	(kN)
Eğilme rijitliği	$EI$	$4.67 \times 10^4$	(kNm <sup>2</sup> )
Ağırlık	$w$	7.5	(kN/m <sup>2</sup> )
<i>Kirişler</i>			
Eksenel rijitlik	$EA$	$6.22 \times 10^6$	(kN)
Eğilme rijitliği	$EI$	$1.87 \times 10^5$	(kNm <sup>2</sup> )
Ağırlık	$w$	15	(kN/m <sup>2</sup> )

Demiryolu üstyapısı ve binanın çerçeve taşıyıcı sistemi geometrik açıdan modellenirken, her bir nod için iki ötelenme ( $u_x$  ve  $u_y$ ), x-y düzleminde bir dönme serbestlik derecesine ( $\phi_z$ ) sahip Mindlin kiriş teorisini esas alan 5 nodlu çubuk elemanlar kullanılmıştır.

### 3.3.2. Uygulanan sonlu eleman ağ yapısı

Yapısal modeli iyi derecelendirilmiş sonlu eleman ağ yapısı ile analiz etmek, hesaplanması istenen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtacak kadar iyi seçilmiş, şekil verilmiş uygun boyutlu elemanların ve deplasman fonksiyonlarının kullanılması demektir. Yapısal sistemi istenilen doğruluk düzeyinde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek, uygun şekil fonksiyonlarını seçmek ve doğru sınır şartlarını belirlemek ancak problemin fiziğinin ve verilen yükleme altında davranışının iyi tahmin edilmesiyle mümkündür.

Sonsuza uzanan bölgelerin modellenmesinde kullanılacak sonlu elemanların maksimum boyutları diğer bir ifadeyle nod aralıkları, yayılan dalga türünün boyu ( $\lambda$ ) ile kontrol edilmektedir. Dalga yayılma hızı ve yük kaynağının frekans aralığı

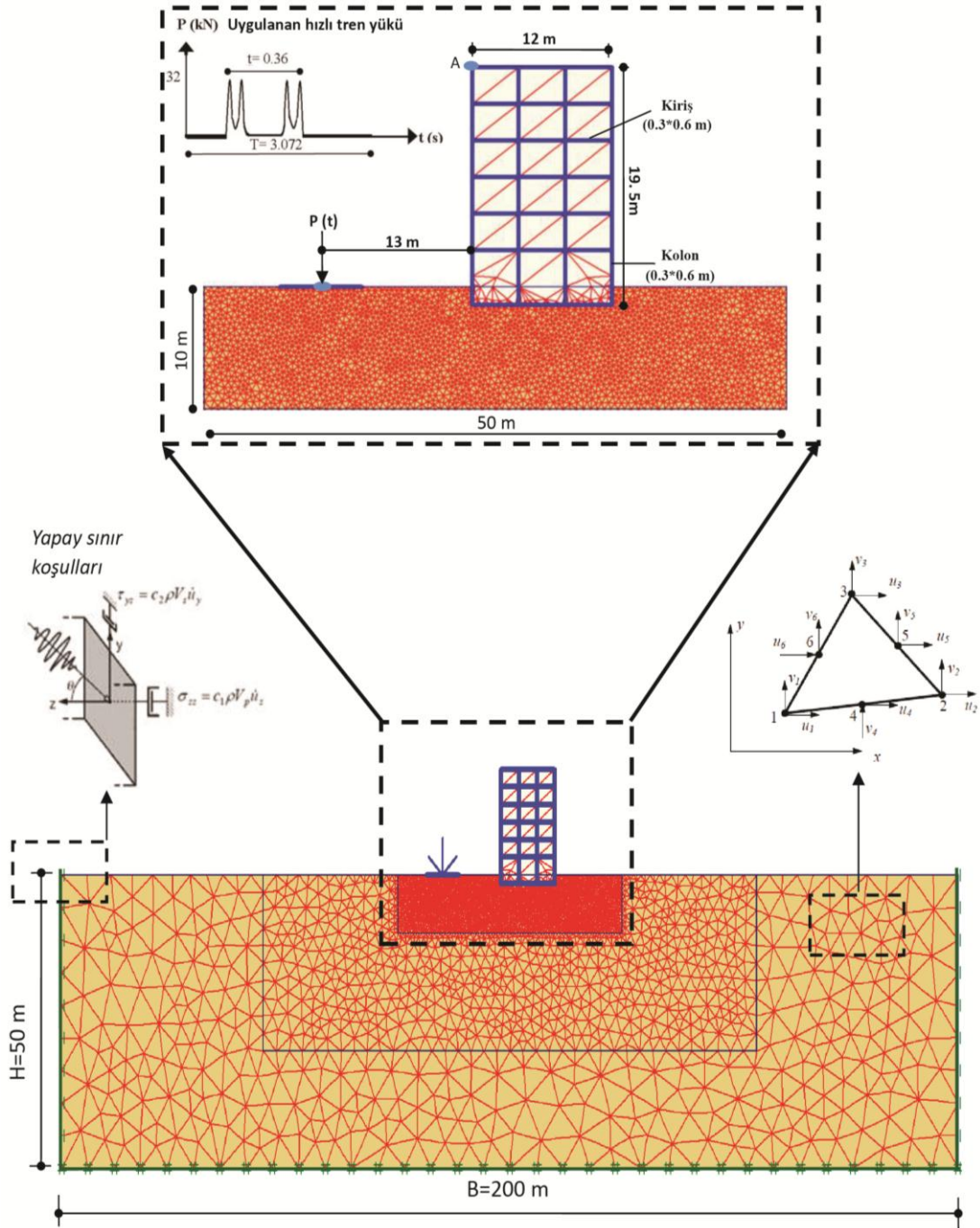
kullanılacak eleman boyutunu belirlediğinden, elemanların sayısının azaltılması genellikle ayrıklaştırılan bölgenin büyüklüğünü sınırlamaktadır.

Ayrıklaştırılan bölgenin boyutunun küçültülmesiyle, sınır şartlarının probleme etkisi artar. Ancak, kesim noktalarında uygun yapay sınır şartlarının oluşturulmasıyla sonsuza uzanan zemin sonlu bir bölgeye hapsedilerek modellenebilir. Ayrıca kısa dalga boylu frekans bileşenleri geniş aralıklı düğümlerle modellendiğinde, yüksek frekans bileşenleri filtrelenebilir. Birçok araştırmacı farklı açısal frekanslarda sayısal modele yüklenen dalga boylarının ortamdaki şekil değiştirme biçimini yeterli yaklaşıklık düzeyinde idealize edebilmek için sonlu eleman boyutunun dikkatlice seçilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Sayısal modelde sonuçların tutarlılığı ve doğruluk düzeyi açısından sonlu eleman boyutunun ( $\Delta h$ ) üst değeri en kısa dalga boyuna ( $\lambda_{min}$ ) göre sınırlandırılmıştır (Kuhlemeyer ve Lysmer, 1973; Lysemer ve diğ., 1975 ).

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{min}}{k} = \frac{v_j}{kf_{maks}} \quad (3.28)$$

Burada,  $k$  çarpan sabiti sonlu eleman tipine ve kullanılan şekil fonksiyonuna bağlı olarak  $5 \leq k \leq 10$  aralığında değişmektedir. Dinamik yüke ait Fourier spektrumunun önemli bileşenlerini veren en büyük frekans değeri  $f_{maks}$  ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada özellikle  $V=250 \text{ km/h}$  hızla ilerleyen lokomotifin demiryolu platformuna uyguladığı yük fonksiyonunun Fourier spektrumundaki önemli katkıları  $0 \leq f \leq 25 \text{ Hz}$  frekans aralığında görülmektedir (Şekil 3.13). Yüklemeden dolayı üstyapı-bariyer-zemin ortak sisteminin davranışında hızlı değişimlerin görülebileceği yakın bölgelerde doğrusal olmayan şekil değiştirmeyi de daha iyi inceleyebilmek için sıkı bir ağ yapısı kullanılmıştır. Çalışmanın amacına göre yapısal davranışın birinci dereceden önem kazandığı plastik şekil değiştirmenin beklendiği zemin parçası ( $H_1=10m$ ,  $B_1=50 m$ ) küçük boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli (yalıtımsız model)

Zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında kullanılan sonlu eleman boyutları yapıya ve yük kaynağına yakın bölge için Rayleigh tipi yüzeysel dalga boyunun ( $\lambda_R=0.9\lambda_s$ ) altıda birinden küçük kalacak şekilde seçilmiştir (burada  $\Delta h=0.34$  m). Böylece geliştirilen modelin çözüm hassasiyetini etkileyecek etkenler ortadan kaldırılmıştır. Yakın bölgeden uzaklaştıkça kullanılan sonlu eleman boyutları yukarıda verilen

koşulu (3.28) çok fazla aşmayacak şekilde büyütülerek hesaplama yükü ve buna bağlı olarak analiz süreci dengelenmiştir.

### 3.3.3. Courant koşulunun sağlanması

Yapı-zemin dinamik etkileşimi için geliştirilen matematik simülasyonun doğruluk düzeyi iki temel parametre ile kontrol edilmektedir. Bunlardan biri üst sınır koşuluna bağlanan (3.28) sonlu eleman modelinin nodları arasındaki mesafedir ve diğeri de çözümde göz önüne alınan zaman adım aralığıdır.

Bu çalışmada ele alınan iki boyutlu düzlem şekil değiştirme problemini yöneten hareket denklemlerinin zaman tanım aralığında çözümü Newmark'ın sabit ortalama ivme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Sayısal integrasyonda çözümün kesin çözüme yakınsaması hesaplarda kullanılan zaman artımına ( $\Delta t$ ) bağlıdır. Sayısal uygulamaların çözüm adımlarında kullanılacak zaman artımının en büyük değeri Courant ölçütü ( $c \leq 1$ ) olarak tanımlanan kararlılık koşulunun göz önünde bulundurulmasıyla belirlenmiştir (Courant ve diğ., 1967).

$$\frac{v_j \Delta t}{\Delta h} = c \quad (3.29)$$

Burada  $v_j$  problemde dikkate alınan dalga yayılma hızını göstermektedir. Dalga yayılım problemlerinin veya doğrusal olmayan titreşimlerin sayısal çözümleri için kullanılacak yaklaşık yöntemlerde zaman artım değeri kararlılık koşulu ile sınırlandırılmaktadır. Özellikle yüksek titreşim modlarının sayısal analizlerde yeterli doğrulukta temsil edilebilmesi için kararlılık koşulunun tüm modlarda sağlanması beklenmektedir. Aksi takdirde çözümün ıraksaması kaçınılmaz olur.

Farklı dalga türlerini hesaba katıldığı zemin titreşim problemlerinin analizinde zaman artımı ( $\Delta t$ ), ortamdaki dalga yayılma hızıyla belirlenirken, kullanılacak sonlu eleman boyutunun en küçük dalga hızına bağlı olduğuna dikkat etmek gerekir. Dalgaların en yüksek ve en düşük yayılma hızları arasındaki farkın büyük olmasından dolayı öngörülen model için küçük sonlu eleman kullanımına ve kısa



zaman artımıyla sayısal çözümün gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, dış yükün karakteri ve ortalama sonlu eleman boyutu göz önünde bulundurularak Courant koşulunun sağlanmasına dikkat edilmiştir (Göktepe ve diğ., 2011). Yönetici denklemlerin sayısal integrasyonunda zaman adımı  $\Delta t=0.0103$  sn alınarak analizler yürütülmüştür.

### 3.3.4. Sınır koşullarının belirlenmesi

Sürekli sistemlerin uygun bir sayısal yöntem kullanılması sonucunda ayrık bir sistem olarak ele alınmasında, serbestlik derecesi çoğaltılarak çözümün yaklaşıklık derecesi artırılabilir. Analitik olarak kesin çözüme yakınsama, modelde hesaba katılan serbestlik derecesinin sonsuza yaklaştırılmasıyla elde edilir.

Bilgisayarların sağladığı hız ve etkinlik inşaat mühendisliğini gittikçe daha büyük ve karmaşık problemlerin çözümüne yöneltmektedir. Ayrıca çeşitli dış etkiler altında yapı davranışının gerçeğe daha yakın olarak izlenmek istenmesi durumunda, sistemde göz önüne alınan bilinmeyen sayısının artırılması ve bunun beraberinde getirdiği çeşitli güçlüklerin de aşılması gerekmektedir.

Söz konusu nedenlerle artan işlem hacmine bağlı olarak, mevcut belleğin ekonomik kullanımı ve öngörülen doğruluk düzeyine mümkün olan en kısa sürede erişme isteği, bilgisayar teknolojisindeki tüm gelişmelere rağmen hala önemini korumaktadır. Bu çalışmada, sınırsız ortam olarak kabul edilen sonlu serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülerek modellenmesi uygun sınır şartlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Dalga yayılım probleminin sonlu eleman simülasyonu için yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için viskoz sönümleyici elemanlar (White ve diğ., 1977) ve sonsuz elemanlar (Lynn ve Hadid, 1981) kullanılmaktadır. Bu yakın sınırlarla hapsedilen ortamdaki dalgaların karmaşık bir şekilde saçılması nedeniyle

sonsuzu uzanan bölgelerdeki gerçek dalga yayılma hareketi tam idealize edilmediği için doğruluk düzeyi tartışılır sonuçlar elde edilmektedir.

Dinamik analizlerde viskoz yapay sınırların geçirirmliliğinin tanımlanmasındaki belirsizliklerden dolayı sınırlarda olası dalga yansımalarının yapısal davranışının kararlılığını bozmasına yol açmadan kalıcı titreşimi elde etmek için bölge sınırlarını statik çözümlere göre daha uzakta oluşturmak güvenli bir çözüm yoludur. Yapılan araştırmalardan bu sınır yerlerinin üstyapıdan en az temel taban genişliğinin 8–10 katı kadar uzakta olacak şekilde düzenlenmesi gerektiği önerilmektedir (Rosset ve Kausel, 1976). Aksi takdirde gerilme dalgalarının sınırlardan yansyıp tekrar problemin ele alındığı bölgeye geri dönmesi sonucunda sayısal sonuçların hassasiyetinin bozulmasına yol açacaktır.

Bu çalışmada yansımaların etkisini yok etmek için yapay sönümleyicilerin yapının sağ tarafından 90 m, sol tarafından 98 m sınırlara uzakta olacak şekilde yerleştirilmesiyle özel önlem alınmıştır. Geliştirilen çözüm yönteminde, sistemden dışarıya doğru yayılan ve zeminin sonsuzluğu nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için bölgenin sınırlarında eşdeğer anlamda kullanılan, radyasyon sönümü adı verilen ve malzeme sönümü ile ilgisi bulunmayan bir sönüm mekanizması kullanılmıştır (Şekil 3.21). Kullanılan sınır şartlarının soğurulma karakteristikleri dalgaların frekansına bağlı olmadığı için bu yapay sınırlar hem harmonik hem de harmonik olmayan dalgaları sönümleyebilmektedir.

Sınırlarda enerjinin tam anlamıyla tüketilebilmesi dalgaların gelme açısına bağlıdır. Mühendisliğin pratik uygulamaları açısından, gelen dalgalarının sınırlara dik veya küçük açıyla ( $\theta \leq 30$ ) etkidiği varsayıldığından, boyutsuz iyileştirme katsayıları ( $c_1$  ve  $c_2$ ) birim değerinde hesaplara katılmaktadır. Bu çalışmada basınç dalgası için  $c_1=1$  ve kayma dalgasının sınırlarda rasyonel ölçüde geçirirmliliğini sağlamak için tavsiye edilen değeri  $c_2=0.2$  olarak alınmıştır (Brinkgreve ve diğ., 2002).

### 3.3.5. Rayleigh sönüm parametrelerinin tanımlanması

Sönüm, yapısal anlamda göz önüne alınan sistemlerin dinamik davranışının şeklini ve genliğini önemli derecede etkilemektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların büyük bir kısmında, halen sönüm parametresinin tanımlanmasında genel kabul görmüş bir yöntemin gelişimi tam anlamıyla elde edilmemiştir. Bunun yerine mühendislik amaçları için geometrik ve malzeme sönümlerini sayısal hesaplara katabilmek için bazı önlemler alınmıştır. Viskoz etkilerden dolayı fiziksel sönüm Rayleigh sönümü ile dikkate alınmaktadır. Mühendislik uygulamalarında histeretik malzeme sönümü için genel olarak kullanılan parametre  $\xi$  ile gösterilen sönüm oranıdır. Sonlu elemanlar yaklaşımında Rayleigh sönümü, sistemin kütle ve rijitlik matrisleri içerisindeki sönüm etkilerini bir araya toplayan en uygun sönüm ölçütlerinden birini oluşturmaktadır:

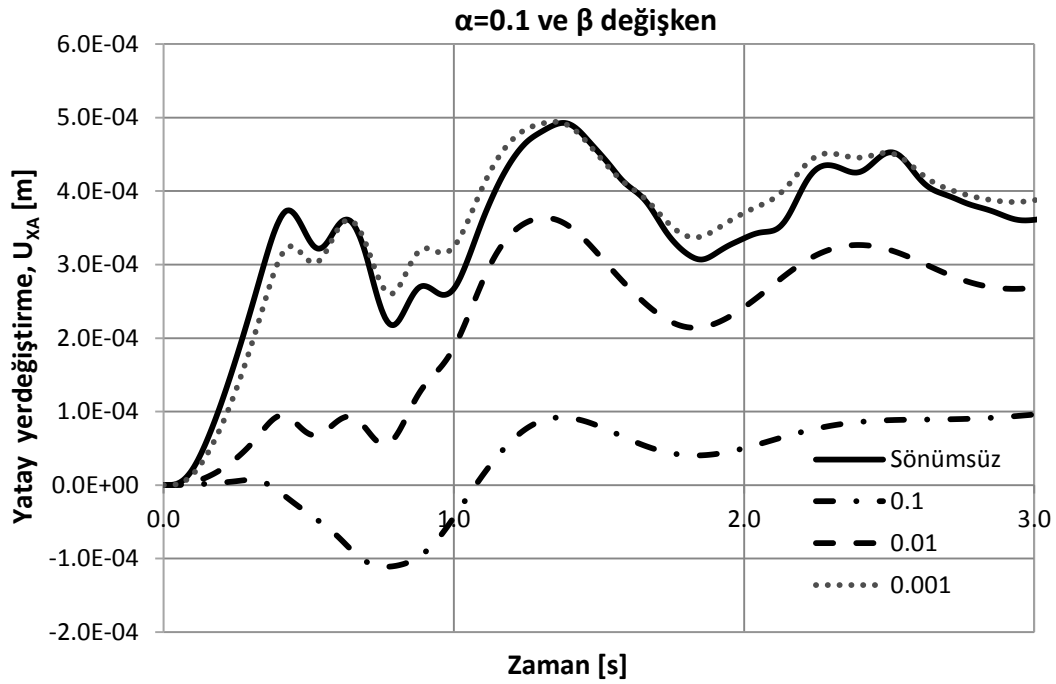
$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.30)$$

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

Sistemin malzeme sönümünde  $\alpha$  orantı sabiti kütlelerin katkısını gösterirken,  $\beta$  sabiti rijitliğin sönümdeki etkisini belirlemektedir. Burada  $\alpha$  ne kadar büyürse, küçük frekanslı genlikler o kadar çok sönümlenirken, büyük frekanslı genlikler ise  $\beta$  parametresiyle orantılı olarak azalmaktadır. Zeminlerde ele alınan sönüm kayma şekil değiştirme genliğiyle birlikte orantılı olarak artmaktadır. Yapı sistemleri ve temellerin titreşiminde zeminin malzeme sönümü, yeraltının sonsuzluğunda yayılarak kaybolan titreşim enerjisini tanımlayan geometrik sönümle karşılaştırıldığında, ikincil derecede kaldığı ve belli kurallar çerçevesinde sayısal hesaplarda göz ardı edilebileceği söylenebilir. Bundan dolayı, yapı-zemin birlikteliği dikkate alınarak yapılan sonlu eleman analizlerinde, baskın karakterdeki frekanslara ve modal sönüm oranlarına bağlı belirlenmesi gereken Rayleigh sönümü yerine, bu zemin sönümü için kullanılacak en uygun orantı sabitleri sına-yanılma ölçümleme yöntemiyle belirlenmiştir (Göktepe ve Çelebi, 2012). Sayısal uygulamalarda malzeme sönümünün göz ardı edilmesi durumunda bile dalgaların geometrik sönüme bağlı tükendiği görülmektedir.

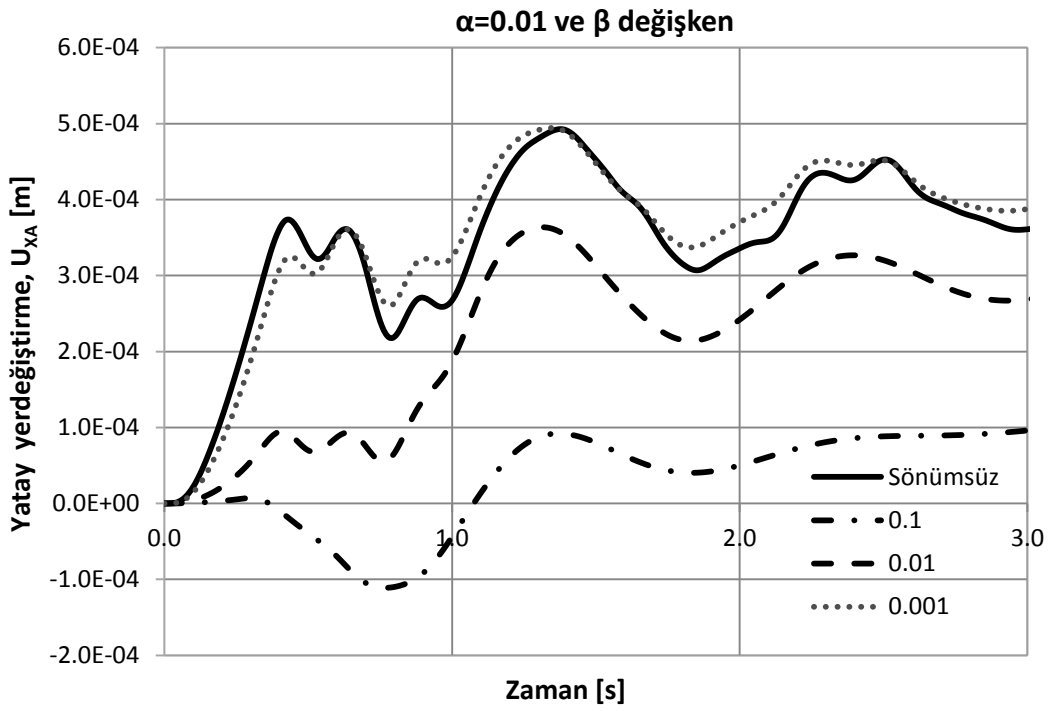
Model sınırlarında geometrik sönümün hesaba katıldığı iki boyutlu sonlu eleman analizleri için Rayleigh sönüm değerini çözümün kararlılığını bozacak derecede küçültmemek gerekir. Pratik uygulamalar açısından Rayleigh sönümünün rijitlikle orantılı sabiti, yaygın olarak analizlerde kullanılmaktadır. Zeminlerde kütleyle orantılı bir sönüm parametresi tanımlanmamışken, sonlu eleman hesaplarında rijitlikle orantılı sönüm sabiti birçok zemin türü için dikkate alınabilmektedir.

Bu çalışmanın ilk aşamasında öngörülen modelde zemin ortamı için kullanılacak Rayleigh sönüm katsayılarının sistem üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 3.22’de görüldüğü gibi, yalıtımsız zemin durumu için seyahat hızı  $V=250 \text{ km/h}$  olan trenin geçişi esnasında demiryolu güzergâhının  $l=13\text{m}$  uzağındaki binanın tepe noktasından (A noktası) alınan yatay titreşimler dikkate alınarak Rayleigh sönümünün farklı orantı sabitleri için elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır.

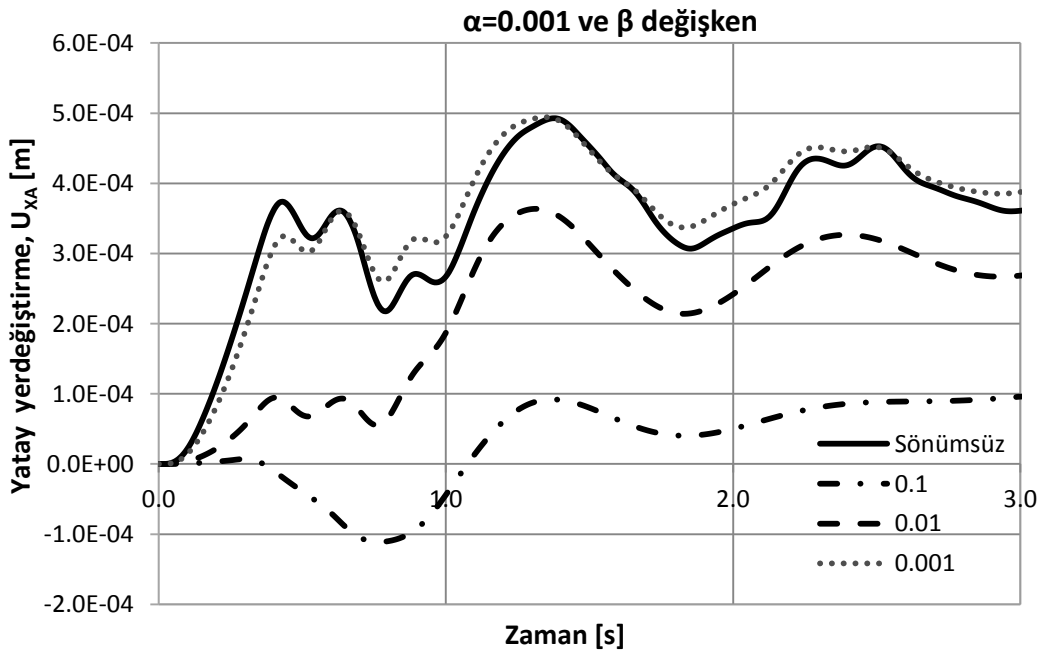


Şekil 3.22. Bina tepe noktası yatay yerdeğıştirmesinin Rayleigh sönümü orantı sabitlerine bağlı zaman geçmişı

(a)  $\alpha=0.1$  ve  $\beta$ =değışken (b)  $\alpha=0.01$  ve  $\beta$ =değışken (c)  $\alpha=0.001$  ve  $\beta$ =değışken



(b)



(c)

Şekil 3.22. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Rayleigh sönümü oranı sabitlerine bağlı zaman geçmişi

(a)  $\alpha=0.1$  ve  $\beta$ =değişken (b)  $\alpha=0.01$  ve  $\beta$ =değişken (c)  $\alpha=0.001$  ve  $\beta$ =değişken (devamı)

Bina tepe noktasına ait yatay yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimi  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayılarına göre Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Malzeme sönümünün sayısal hesaplara katılmadığı ( $\alpha=\beta=0$ ) durumlarda bile model sınırlarında tanımlanan geometrik sönümünün sistemin titreşim enerjisinin tktilmesinde ne derece etkili olduğu verilen grafikte sürekli çizgi ile gösterilen zamanla genliği azalan yatay yerdeğiştirme eğrisinden anlaşılmaktadır.

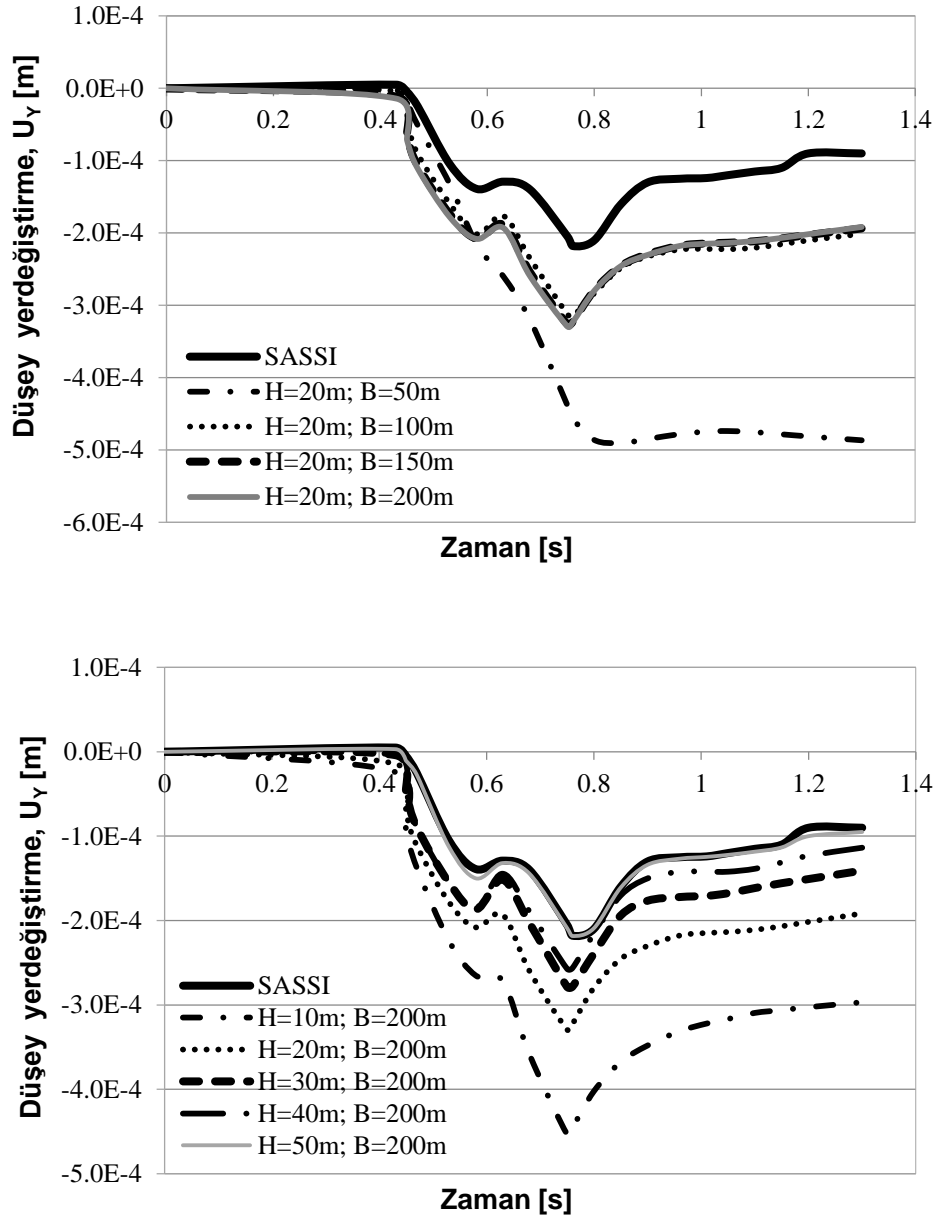
Ktle katılım katsayısının ( $\alpha$ ) etkisi sayısal sonuçları değiştirmezken, rijitlik katılım katsayısının ( $\beta$ ) değişimi sonuçlarda etkili olmuştur. Bundan sonraki yapısal zmlmelerde Rayleigh orantı sabitleri  $\alpha=0.01$  ve  $\beta=0.01$  alınmıştır. Burada  $\alpha$  katsayısının sonuçlarının üzerinde etkili olmaması, dış yük frekansının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sayısal hesaplarda rijitlikle orantılı katılım çarpanının  $\beta=0.01$  seçilmesiyle yaklaşık olarak 10 Hznn frekansların sönümlenmesi beklenmektedir.

### 3.4. Matematik Modelin Kalibrasyonu

Dalga yayılışının incelendiği sürekli ortam mekaniğinde sistemin sonlu eleman ağ yapısının sıklılığı hassas bir yaklaşımla düzenlenirken, problemin sınır özelliklerinin de aynı hassasiyetle doğru tanımlanması hem öngörülen doğruluk düzeyine erişebilme hem de çözüm sürecinin hesap yüküne bağlı olarak dengelenebilmesi açısından son derece önemlidir. İletilen dalgaların zemin sınırlarından yansıyıp geri dönmemesi için problemin ele alındığı bölgenin küçük tutulmaması gerekir. Ayrıca sonsuza uzanan zemin bölgesinden çıkartılan sonlu zemin parçasının sınır Şartlarının geriye kalan zemin bölgesini nasıl temsil edeceğinin iyi belirlenmesi gerekir.

Bu çalışmada yarı sonsuz zemin ortamının idealleştirilmesi için geliştirilen sonlu eleman modelinin doğruluk düzeyi ve yöntemin geçerliliği, zeminin sınırlarına dalga yayılma Şartlarını sağlayan yapay sönümleyiciler yerleştirilerek oluşturulan bölgenin büyüklüğüne göre incelenmiştir. Ayrıca ele alınan problem yakın ve uzak bölgeler için farklı ağ sıklılıklarında analiz edilerek en uygun ağ yapısı dış yükünün titreşim frekansına bağlınn eleman boyutuna göre belirlenmiştir.

Sonsuza uzanan zemin bölgesinin ayrıklaştırılması için farklı ölçeklerde ele alınan sonlu eleman modelleri kullanılarak demiryolu üstyapısından belli uzaklıkta ( $L=14.2$  m) zeminin serbest yüzeyinde seçilen gözlem noktalarındaki düşey yerdeğiştirmelerin ( $U_y$ ) zamana bağlı değişimleri tren hızına bağlı elde edilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Zemin yüzeyinde seçilen bir noktada düşey yerdeğiştirmenin önerilen model büyüklüğüne bağlı

zaman geişiminin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması

Sayısal sonuçların kontrolü, deprem yer hareketinin neden olduğu yapı-zemin etkileşim problemini çözmek amacıyla geliştirilen SASSI (Lysemer ve diğ. 1988 a-b) programının ilgili modüllerini hareketli yüklerin ürettiği yüzey titreşimlerini incelemek için dalga yayılım problemlerine uyarlayan Tosecky (2001)'nin çalışmalarına göre yapılmıştır. Bu sayısal model zemin ortamının sınırsızlığını gelişmiş yapay sınırlar kullanarak altsistem yaklaşımı içerisinde ince tabakalar/esnek hacim yöntemiyle ele almaktadır.

İlk aşamada problemde ele alınacak zemin bölgesinin yatay açılımının uzunluğuna karar verilerek, sonlu bölgenin toplam uzunluğunun  $B=200\text{ m}$  alınması yeterli görülmüştür. Her iki taraftan zemin sınırı, yapı taban genişliğinin yaklaşık olarak 8 katı kadar uzakta oluşturulmuştur. Daha sonra ise zemin bölgesinin derinliği  $H=50\text{ m}$  olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.23'da verilen grafikler incelendiğinde, elde edilen sonuçların diğer yöntemle uyum içerisinde olması önerilen modelin yeterliliğini göstermektedir.

Ayrıca, modelin doğrulanması işlemi Amick ve Gendreau (2000) tarafından geliştirilen ve Bornitz'in iki nokta arasındaki enerji azalımı ile ilgili olarak sunmuş olduğu teorik formülasyon kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Bu teoriye göre, geometrik ve malzeme sönümünün yerdeğiştirme genliklerinde neden olduğu azalım aşağıdaki formülasyon kullanılarak ifade edilmektedir.

$$u_b = u_a \left( \frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (3.31)$$

Buna göre, yük kaynağından  $r_b$  mesafesindeki yerdeğiştirme genliği  $u_b$  ile,  $r_a$  mesafesindeki yerdeğiştirme genliği ise  $u_a$  ile ifade edilmektedir. Formülasyondaki,  $\gamma$  geometrik azalım katsayısı olup, dış yükün neden olduğu sismik dalga yayılım mekanizmasına ve dış yükün pozisyonuna bağlı olarak Tablo 3.4'den seçilmektedir.



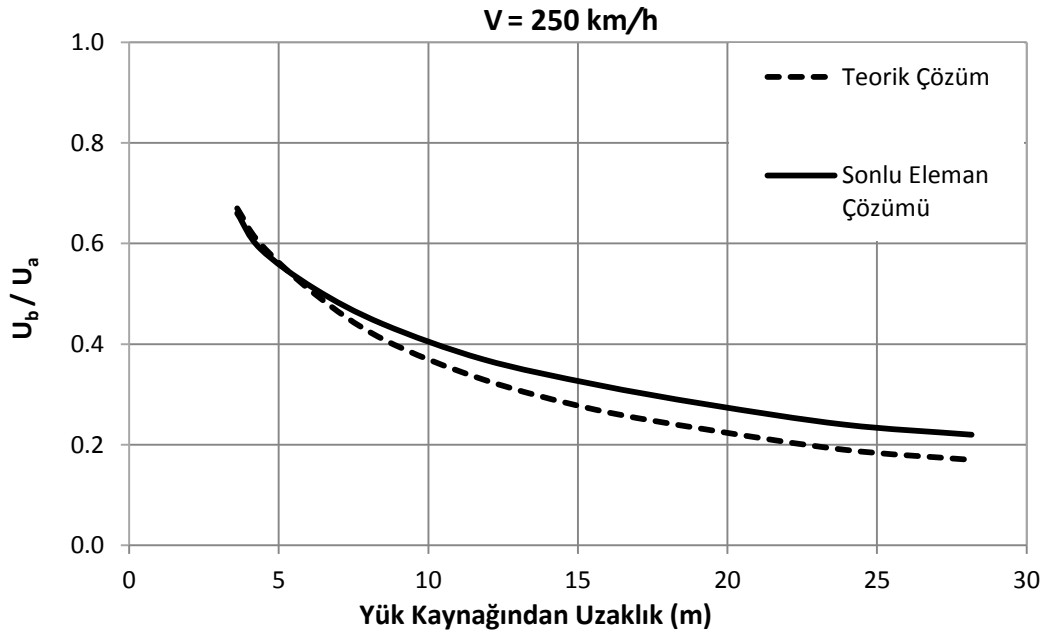
Tablo 3.4. Dalga tipine bağlı olarak teorik geometrik azalım katsayıları (Kim ve Lee, 1998)

Yük Kaynağı	Dalga Tipi	Ölçüm Noktası	$\gamma$
Yüzeysel	Rayleigh	Yüzey	0.5
Yüzeysel	Body	Yüzey	1
Derin	Body	Yüzey	1
Derin	Body	Derin	1

$\alpha$  ile gösterilen malzeme azalım katsayısı ise, zeminin tipine ve dış yükün frekans içeriğine bağlı olarak aşağıdaki formülasyon kullanılarak hesaplanmaktadır.

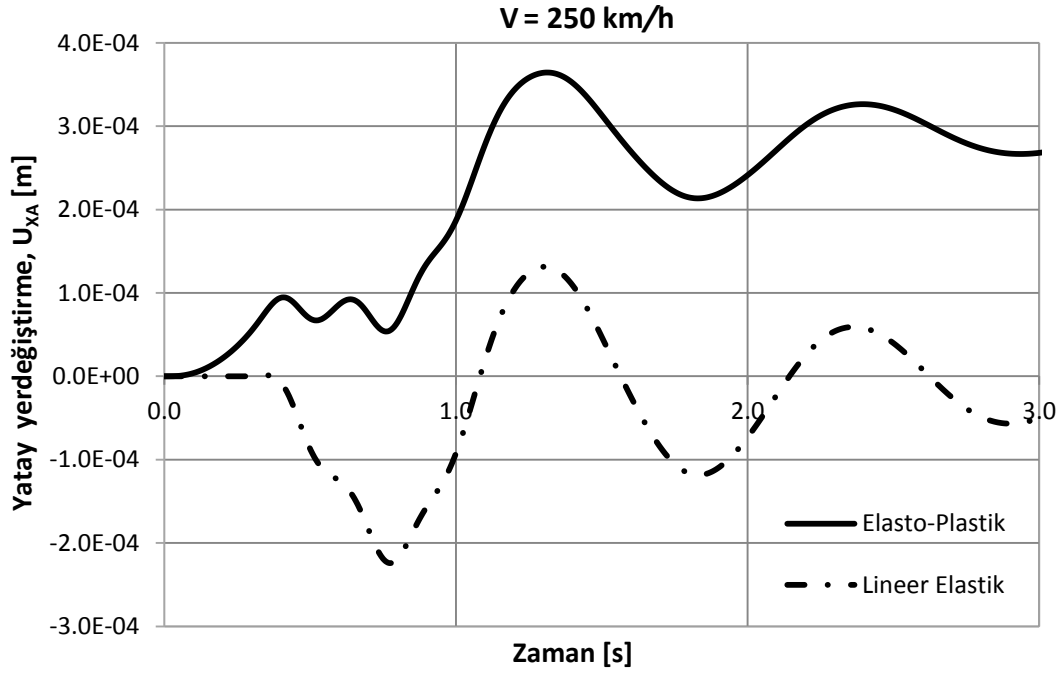
$$\alpha = \frac{2\pi f D}{V_R} \quad (3.32)$$

Yerdeğiştirme genliklerinde elde edilen azaltma oranları, yapı-zemin ortak sisteminin dalga yayılım problemi için önerilen sonlu eleman çözümü ile Bornitz analitik yaklaşımı için Şekil 3.24’de verilmiştir. Elde edilen grafiklerin uyum içerisinde olması önerilen modelin doğruluğunu bir kez daha kanıtlamıştır.



Şekil 3.24. Elde edilen sonlu eleman sonuçlarının teorik çözümle karşılaştırılması

Yalıtımsız durum için seçilen gözlem noktasında (*A noktası*), tren hızına bağlı olarak elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin ( $U_x$ ) zamana bağlı değişimleri, zeminin mekanik davranışının önemini vurgulamak amacıyla lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modelleri için Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin lineer elastik ve elasto-plastik zemin malzeme modellerine göre karşılaştırılması (yalıtımsız model)

Yukarıda verilen grafikten, yüksek hızlı tren trafiğinin oluşturduğu büyük genlikteki titreşimlerin etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilen sayısal model yardımıyla yapılan hesaplamalarda, zeminin öngörülen mekanik davranışı için tercih edilen elasto-plastik Mohr-Coulomb malzeme modelinin önemi daha iyi anlaşılmıştır.

## **BÖLÜM 4. DALGA BARIYER MODELLERİ KULLANILARAK YÜKSEK HIZLI TRENLERİN YAPILARDA OLUŞTURDUĞU TİTREŞİM ETKİLERİNİN AZALTILMASI VE SAYISAL UYGULAMA**

Hızlı demiryolu hattına yakın yapıları yumuşak zemin koşullarında taşınan kuvvetli titreşimlerden korumak için dalga bariyeri olarak, yapay anakaya modeli ile yalıtım potansiyeli yüksek olan içi boş ve içi doldurulmuş hendekler inşaat mühendisliğinin pratik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmanın öncelikli amacı yüksek hızlı tren trafiğinin ürettiği titreşimleri ve dalga bariyerinin yerleştirilmesi ile çevre binalardaki etkilerinin azaltılmasına ilişkin çözümleri, yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkilerini de kapsayan bir dalga yayılım problemi olarak ele alıp, ayrık sayısal çözüm yöntemlerinden yararlanarak idealize edebilmektir. Yoğun yerleşim bölgelerinden geçirilmesi planlanan ve yumuşak zeminlerde inşa edilecek hızlı demiryolu hatları için karşılaşılabilecek kuvvetle muhtemel olan rezonans durumundaki hasar verici titreşimlerden, yolun ve çevre yapıların korunmasında kullanılacak dalga bariyerinin ideal boyutlarının ve yerinin belirlenerek (aktif veya pasif yalıtıma karar verilmesi), yalıtım için en uygun dolgu malzemesinin seçimi bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada sistematik bir program akışı içerisinde ayrıntılı parametrik uygulamalar gerçekleştirilerek yüksek hızda hareket eden tren yüklerinin simülasyonu ile yoğun yerleşim merkezlerinde, özellikle taşıma gücü açısından zayıf, alüvyon zeminlerde neden olduğu kuvvetli dalga yayılımı ve sonucunda yapı-zemin dinamik etkileşim problemi, geliştirilen yapı-zemin-dalga bariyer sisteminin simülasyon modeli ile doğrudan analiz edilerek en uygun yalıtım aracı belirlenmiştir. Çevre yapılarda hasar yapıcı titreşim etkilerinin azaltılması için yenilikçi çözüm önerileri sunulmuştur.

Üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D dinamik modülü (Brinkgreve ve diğ., 2002) bilgisayar programından yararlanılmıştır. Düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınan

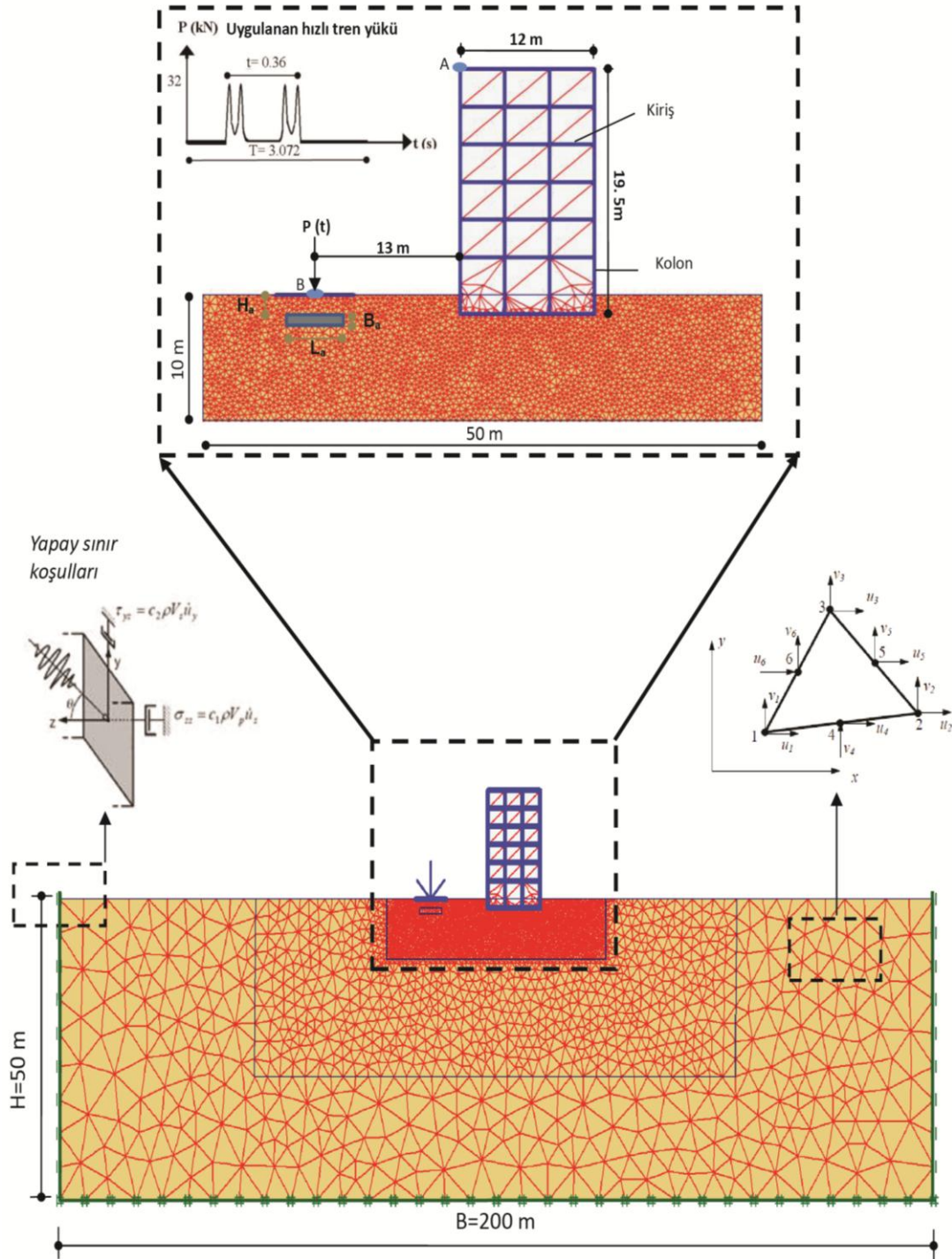
yapay anakaya ve hendek uygulamaları için, ortalama 58015 düğüm noktasına atanan bilinmeyenleri kapsayan denklemlerin çözümü en fazla 12 saat sürerken, farklı parametrelerin dikkate alındığı 300 farklı matematik model üzerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile bilgisayar ortamında yapılan bir adet dinamik analiz bilgisayarın hafızasında yaklaşık olarak 1 GB, tüm uygulamalar ise 300 GB'lık yer kaplamıştır.

#### 4.1. Yapay Anakaya Uygulaması

Bu çalışmada öncelikli olarak yapay taban kaya bariyer modelinin aktif ve pasif yalıtım durumlarına göre performansını değerlendirebilmek için geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde, sistematik bir program akışı içerisinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak demiryolu üstyapısının alt tabanı (*B noktası*) ve binanın çatı katı düzeyi (*A noktası*) seçilmiştir (Şekil 4.1). Bölüm 3'de verildiği üzere, yapısal davranışın birinci dereceden önem kazandığı plastik şekil değiştirmenin beklendiği zemin parçası ( $H_I=10m$ ,  $B_I=50m$ ) küçük boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiş ve yakın bölgeden uzaklaştıkça kullanılan sonlu eleman boyutları denklem (3.28) dikkate alınarak büyütülmüştür. Sayısal integrasyonun çözüm adımlarında kullanılacak zaman artımının ( $\Delta t$ ) en büyük değeri, Courant ölçütü ( $c \leq 1$ ) olarak tanımlanan kararlılık koşulunun göz önünde bulundurulmasıyla belirlenmiş ve  $\Delta t=0.0103$  sn alınarak analizler yürütülmüştür. Geliştirilen matematik modelde demiryolu altyapısını oluşturan zeminin öngörülen mekanik davranışı lineer elastik ve Mohr Coulomb yenilme kriteri altında elasto-plastik malzeme davranış modeli ile benzeştirilerek dikkate alınmıştır. Oluşturulan sayısal modelde dalga engelleyici yapay kayanın mekanik özelliklerine ait bilgiler Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Beton malzeme özellikleri

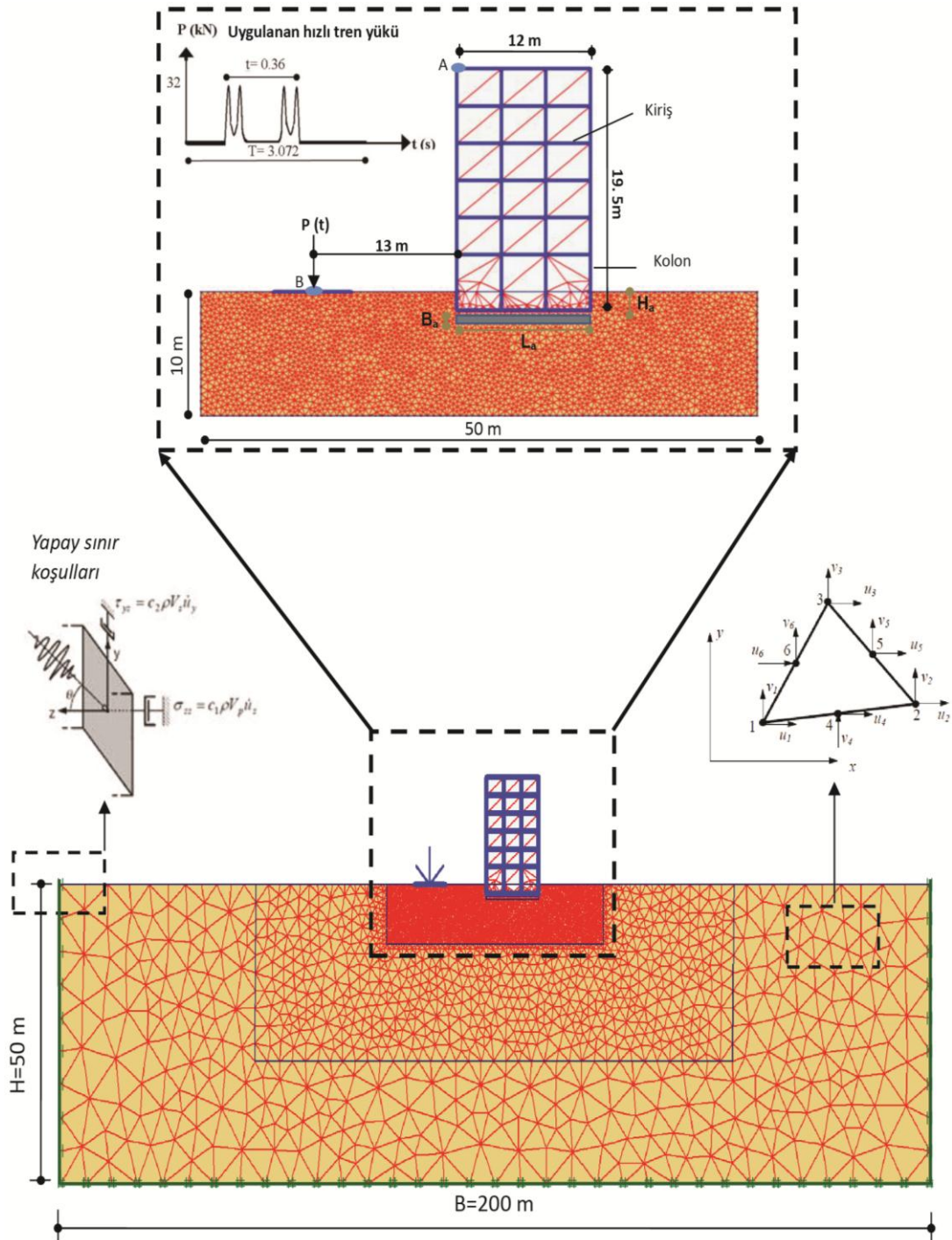
Parametre	Sembol	Birim	Büyükölük
Birim hacim ağırlık	$\gamma$	(kN/m <sup>3</sup> )	24.00
Elastisite modülü	$E$	(kPa)	$3 \times 10^7$
Rayleigh sönüm katsayıları	$\alpha, \beta$	-	0.01
Poisson oranı	$\nu$	-	0.2
Arayüz dayanım azaltma faktörü	$R_{inter}$	-	0.67



**(a) aktif yalıtım durumu**

Şekil 4.1. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için yapay anakaya modeli

(a) aktif yalıtım durumu (b) pasif yalıtım durumu



### (b) pasif yalıtım durumu

Şekil 4.1. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için yapay anakaya modeli

(a) aktif yalıtım durumu (b) pasif yalıtım durumu (devamı)

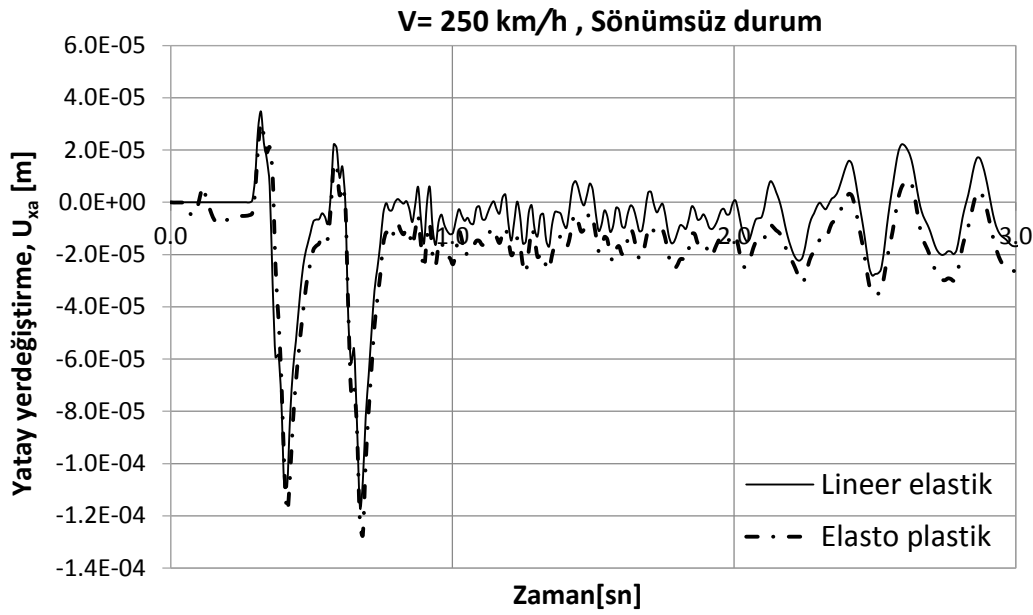
İlk aşamada yapay taban kayanın konumlandırılacağı kritik derinliğe bağlı olarak kesit boyutları belirlenmiştir. Sonraki aşamada ise, dalga bariyer modelinin analizlerde öngörülen optimum boyutları kullanılarak, empedans kontrastı ( $IR$ ) olarak tanımlanan bariyer malzemesi yoğunluğunun yapısal davranışa etkisi, aktif ve pasif yalıtım durumları için incelenmiştir. Ayrıca, mevcut demiryolu üstyapısı rijitliğinin ( $E$ ) dalga yayılım problemine olan etkileri kapsamlı parametrik analizler yapılarak araştırılmıştır.

#### 4.1.1. Yapay kayanın konumlandırılacağı kritik derinlik tespiti

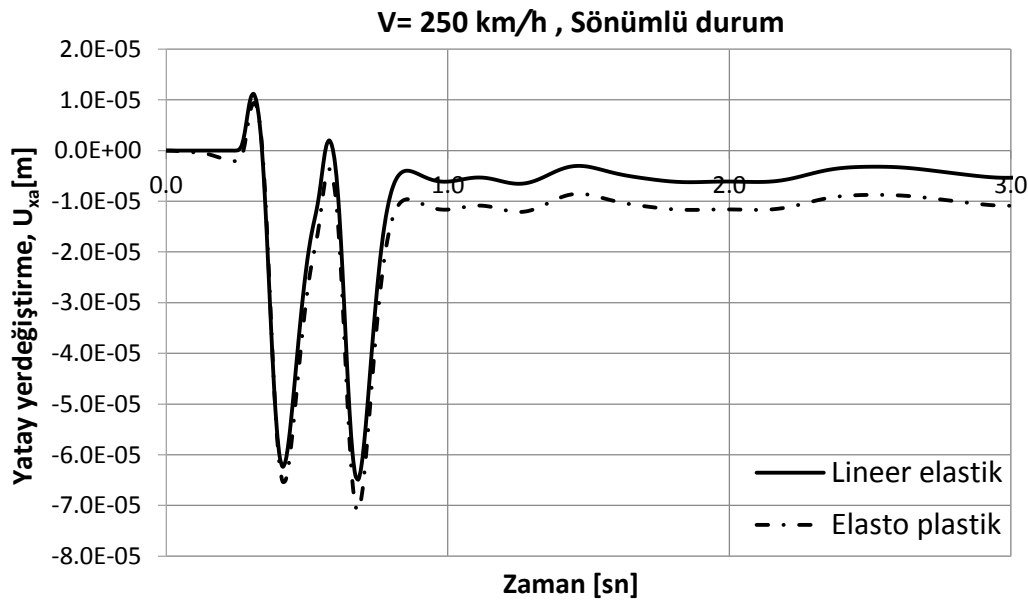
Çalışmanın bu kısmında aktif ve pasif yalıtım durumları için geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde, yapay taban kayanın konumlandırılacağı optimum derinliği tespit etmek amacıyla kapsamlı parametrik araştırmalar yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinin ilk aşamasında üstyapı modellenmemiş (binasız durum) ve gözlem noktası olarak demiryolu üstyapısından  $l=13m$  uzaklıktaki zeminin serbest yüzeyi ( $a$  noktası) seçilmiştir.

Yalıtımsız durum dikkate alınarak, seçilen gözlem noktasında elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin ( $U_{xa}$ ) zamana bağlı değişimleri, zeminin mekanik davranışının önemini vurgulamak amacıyla, malzeme sönümünün hesaba katılıp katılmadığı iki farklı durum için Şekil 4.2-4.3’de verilmiştir.

Radyasyon sönümleyicinin olmaması durumunda, zemin ortamında oluşan dalga yayılımının azaltılamayacağı bilinen bir gerçektir. Malzeme sönümünün sayısal hesaplara katılmadığı ( $\alpha=\beta=0$ ) durumlarda bile model sınırlarında tanımlanan radyasyon sönümünün sistemin titreşim enerjisinin tüketilmesinde ne derece etkili olduğu, aşağıda verilen grafiklerdeki zamana bağlı genliği azalan yatay yerdeğiştirme eğrilerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. Sönümsüz durum için yatay yerdeğiştirmenin serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi (yalıtımsız durum)



Şekil 4.3. Sönümlü durum için yatay yerdeğiştirmenin serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi (yalıtımsız durum)

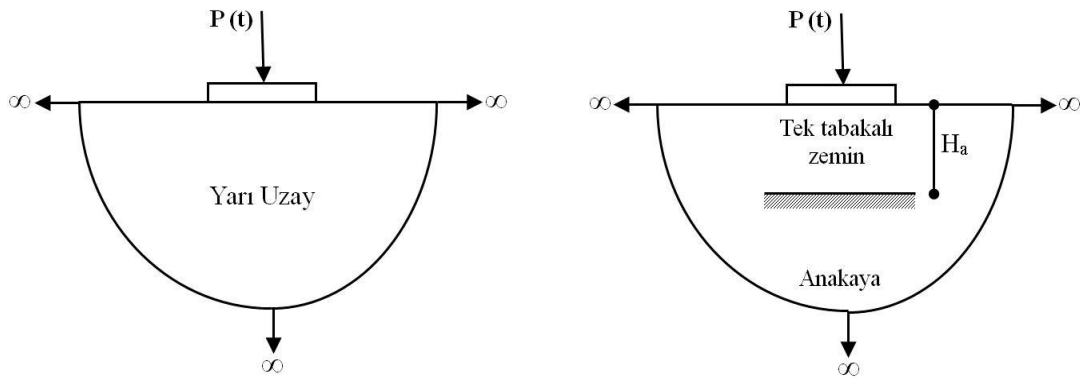
Dalgaların geri yansıması, anakaya ile zemin yüzeyi arasındaki zemin tabaka kalınlığına ( $H_a$ ), zemin özelliğine ve titreşimlerin yönüne bağlıdır. Titreşim frekansı verildiğinde, bu frekansa bağlı kritik tabaka kalınlığı ( $H_a$ ) bulunabilir. Bu şartlar altında dış yükün titreşim frekansı zeminin öz frekansından daha az ise dalga



yayılmı olmaz. Eğer titreşim frekansı zemin frekansına eşit ise rezonans durumu beklenir. Titreşim frekansı zeminin frekansından büyük ise dalga yayılımı gerçekleşir.

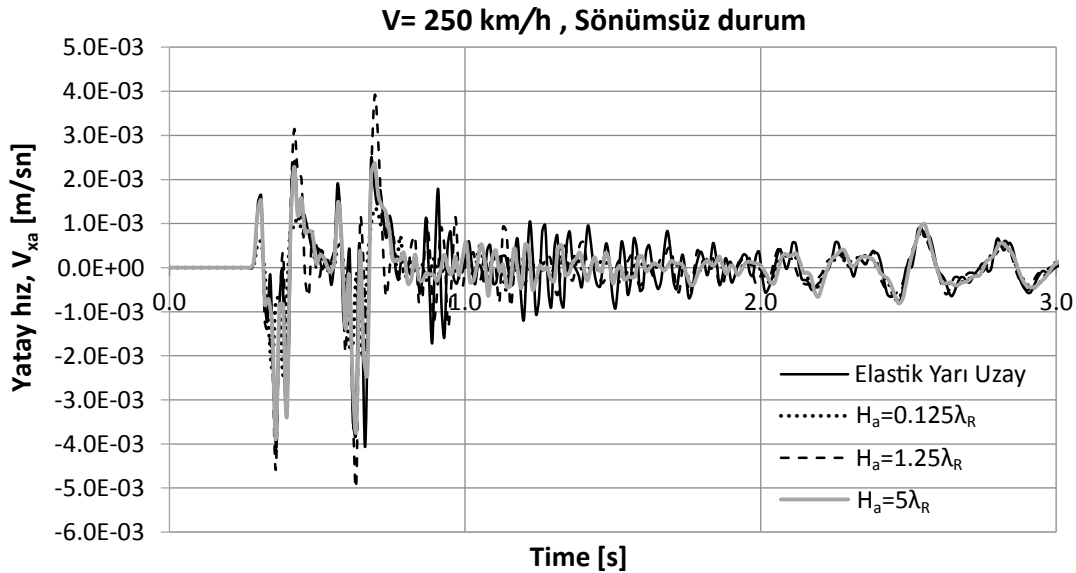
$$H_a \leq c_s \frac{(2n-1)}{4f} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki formülasyonda,  $c_s$  zemin malzemesinin kayma dalgası hızı,  $f$  ise titreşim kaynağının frekansındır. Titreşim kaynağından gelen dalgaların azaltılması için titreşim kaynağının altında oluşturulacak yapay taban kayanın konumlandırılacağı kritik derinliğin bulunması amacıyla, Rayleigh yüzey dalgasına bağlı olarak yapay kayanın konumlandırıldığı farklı yükseklikler elde edilmiştir (Adam ve Chouw, 2001). Bu çalışmada, Rayleigh dalgasının dalga boyu  $\lambda_R=4m$  olarak hesaplanmış olup aktif yalıtım durumu için farklı tabaka kalınlıkları  $H_a=0.125\lambda_R$ ,  $H_a=1.25\lambda_R$ ,  $H_a=5\lambda_R$  olarak belirlenmiştir. Pasif yalıtım durumunda ise, üstyapının  $H_t=1.5m$  olan temel derinliği de dikkate alınarak katman yükseklikleri  $H_a=0.125\lambda_R$ ,  $H_a=0.375\lambda_R$ ,  $H_a=5\lambda_R$  olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Buradaki esas amaç, yapay kayanın konumlandırıldığı farklı tabaka yüksekliklerine bağlı elde edilen nümerik sonuçlar ile lineer elastik yarı uzay çözümleri karşılaştırılarak, aktif ve pasif yalıtım durumlarına göre rezonans etkilerini gözlemlemek ve yapay kayanın konumlandırılacağı kritik derinliği tespit etmektir. Geliştirilen sayısal modelin lineer elastik yarı uzay ve anakaya tabanlı şematik gösterimi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Geliştirilen sayısal modelin yarı uzay ve anakaya tabanlı şematik gösterimi

Aktif yalıtım durumu için yapay kayanın konumlandırılacağı kritik derinliği tespit etmek amacıyla, demiryolu üst yapısından  $l=13m$  uzaklıktaki zeminin serbest yüzeyinde tren hızına bağlı olarak elde edilen yatay hızların ( $V_{xa}$ ) zamana bağlı değişimleri malzeme sönümünün dikkate alınmadığı lineer elastik yarı uzay ve yapay kayanın konumlandırıldığı farklı yükseklikler için Şekil 4.5’de verilmiştir. Grafikten,  $V=250 km/h$  geçiş hızına sahip tren yükünün titreşim frekansının,  $H_a=0.125\lambda_R$  tabaka kalınlığındaki zemin frekansından daha düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Bunun bir sonucu olarak, dalga yayılımının gerçekleşmediği veya az bir oranda gerçekleştiği anlaşılmaktadır.  $H_a=1.25\lambda_R$  katman yüksekliğinin, kritik tabaka kalınlığına yakın olmasının sonucu olarak, tren yükünün titreşim frekansı zeminin frekansına yaklaşmaktadır. Yatay hız genliklerinin çok büyük değerlerde olmasıyla rezonans etkileri gözlemlenmiş olup zemin içerisinde yayılan dalgaların anakayadan güçlü bir şekilde yansıdığı anlaşılmaktadır.  $H_a=5\lambda_R$  tabaka kalınlığında ise, elde edilen yatay hız değerlerinin lineer elastik yarı uzay çözümüne yaklaştığı görülmektedir. Buradan hareketle, tren yükünün titreşim frekansının zeminin frekansından büyük olduğu ve dalga yayılımının gerçekleştiği ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Sönümsüz durum için yatay hızın serbest zemin yüzeyindeki zaman geçişi (aktif yalıtım)

Aktif yalıtım durumuna ait dalga engelleyici yapay kaya modelinin konumlandırılması gereken optimum derinliği tespit etmek amacıyla, lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modellerine bağlı malzeme sönümünün hesaba katılıp katılmadığı iki farklı durumda, yapay kayanın yerleştirildiği farklı yükseklikler için elde edilen grafikler, karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.6 ve 4.7’de verilmiştir. Aktif durum için, dalga bariyer modelinin analizlerde öngörülen optimum uzunluk ( $L_a$ ) ve kalınlık ( $B_a$ ) gibi kesit boyutları, yazarın daha önceki analitik çalışmalarına (Göktepe vd., 2010, Çelebi ve Göktepe, 2012) dayalı olarak belirlendiğinden yapay kaya uzunluğu  $L_a = 7m$  ve kalınlığı  $B_a = 1m$  olarak alınmıştır.

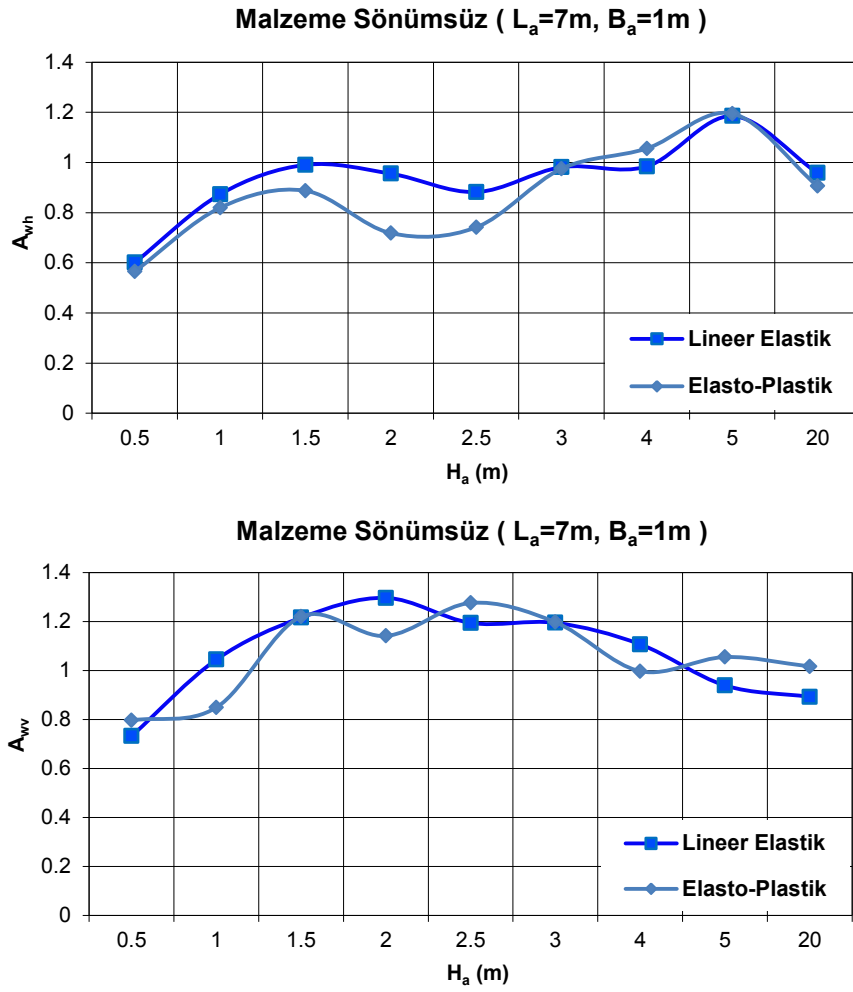
Yapay kayanın dalgayı perdeleme etkisini göstermek için kullanılan dalga azaltma oranı ( $A_{wi}$ ) boyutsuz parametresi;

$$A_{wi} = \frac{V_X}{\bar{V}_X} \quad (4.2)$$

$$i = v, h$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Burada,  $V_X$  yalıtımlı durumdaki hızı,  $\bar{V}_X$  ise yalıtımsız durumdaki hızı göstermekte olup, düşey değerlerde elde edilen azaltma oranı için  $A_{wv}$ , yatay değerlerde ise  $A_{wh}$  olarak gösterilmiştir. Dalga azaltma oranı  $A_{wi}$  değerinin 0 olması durumunda bariyerin tam yalıtım sağladığı, 1 olması durumunda ise yalıtım etkisinin gerçekleşmediği değerlendirilmiştir.

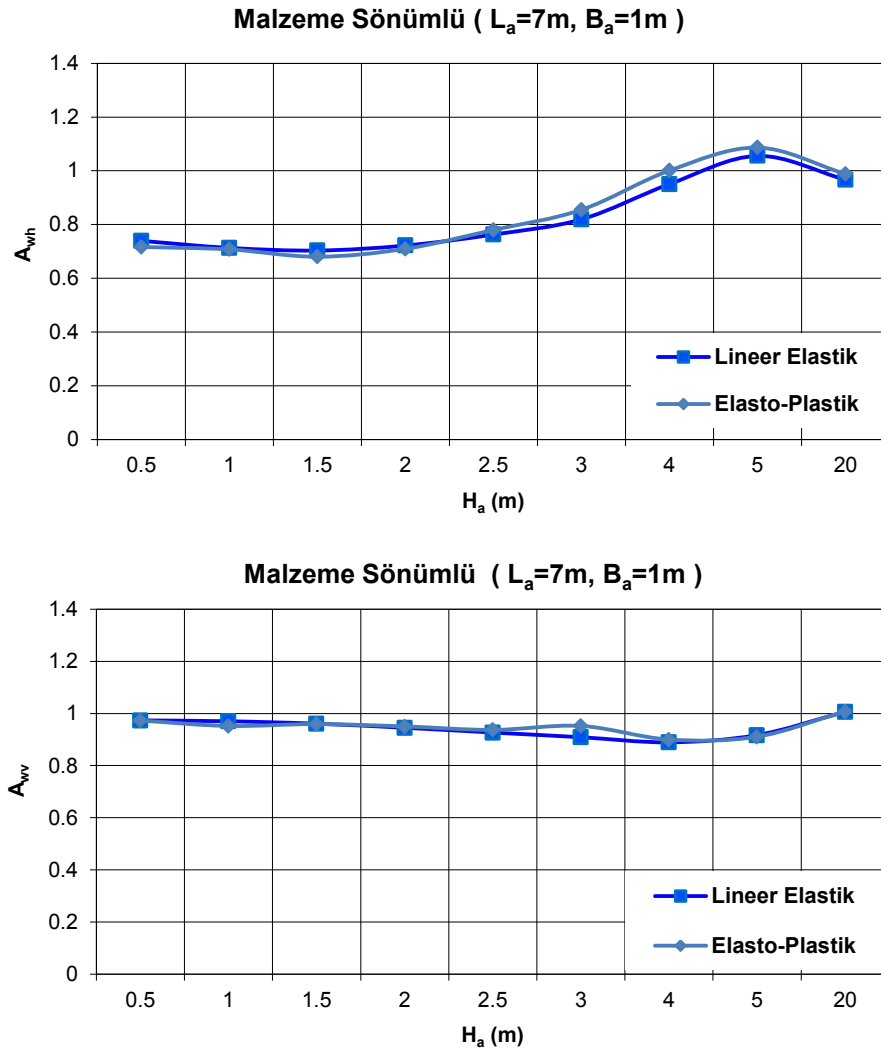
Analizlerde malzeme sönümünün dikkate alınmadığı lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modelleri için yapay kaya derinliğinin zeminin serbest yüzeyindeki yatay hız genliklerinde %40-45, düşey hız genliklerinde ise %20-25 civarında yalıtım gösterdiği görülmektedir. Hızlı tren trafiğinin tekrarlı geçişleri sırasında ürettikleri yüksek frekanslı titreşimlerin etkisini azaltmak için yatay hız genliklerinde elde edilen azaltma oranlarından, kritik derinliğin  $H_a=5m$  civarında olduğu söylenebilir. Düşey hız genliklerinden elde edilen azaltma oranlarından ise, kritik derinliğin  $H_a=2-2,5m$  civarında olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Sönümsüz durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı

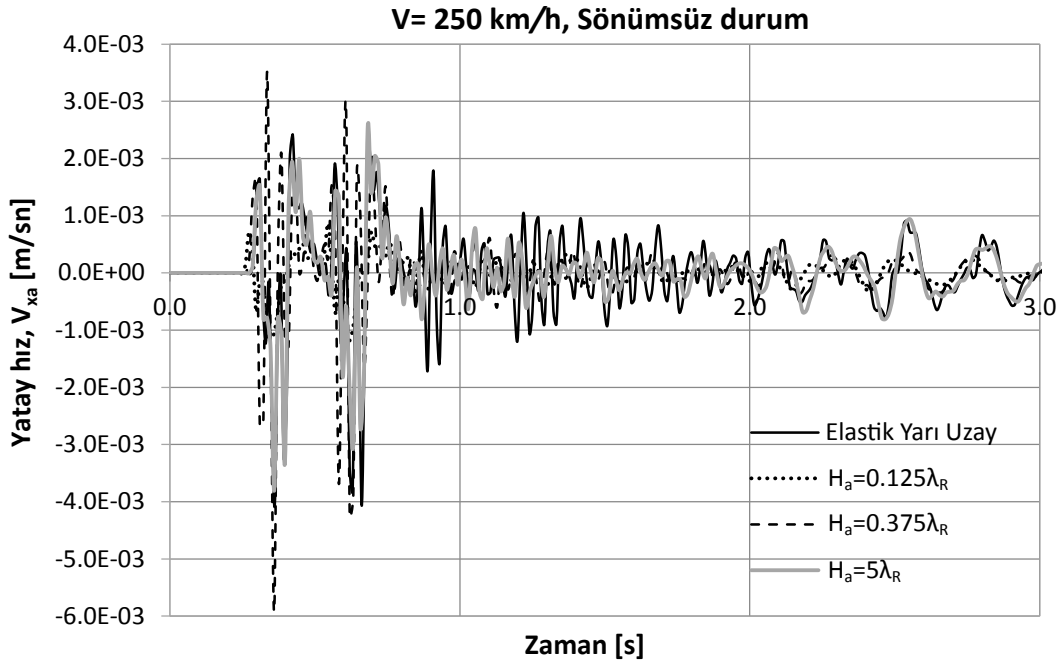
(aktif yalıtım)

Malzeme sönümünün dikkate alındığı lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modelleri için dalga bariyeri  $H_a=0.5m$  derinliğinde %30 civarında azaltma etkisi yapmaktadır. Şekil 4.7'deki verilen grafiklerden dalga engelleyici yapay kayanın göstermiş olduğu performansın, farklı zemin davranış modellerine bağlı olarak çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Pasif yalıtım durumunda yapay kayanın konumlandırılacağı kritik derinliği tespit etmek amacıyla, serbest zemin yüzeyinde seçilen gözlem noktasında (*a noktası*) tren hızına bağlı olarak elde edilen yatay hızların ( $V_{xa}$ ) zamana bağlı değişimleri, malzeme sönümünün dikkate alınmadığı lineer elastik yarı uzay ve yapay kayanın konumlandırıldığı farklı yükseklikler için Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı (aktif yalıtım)

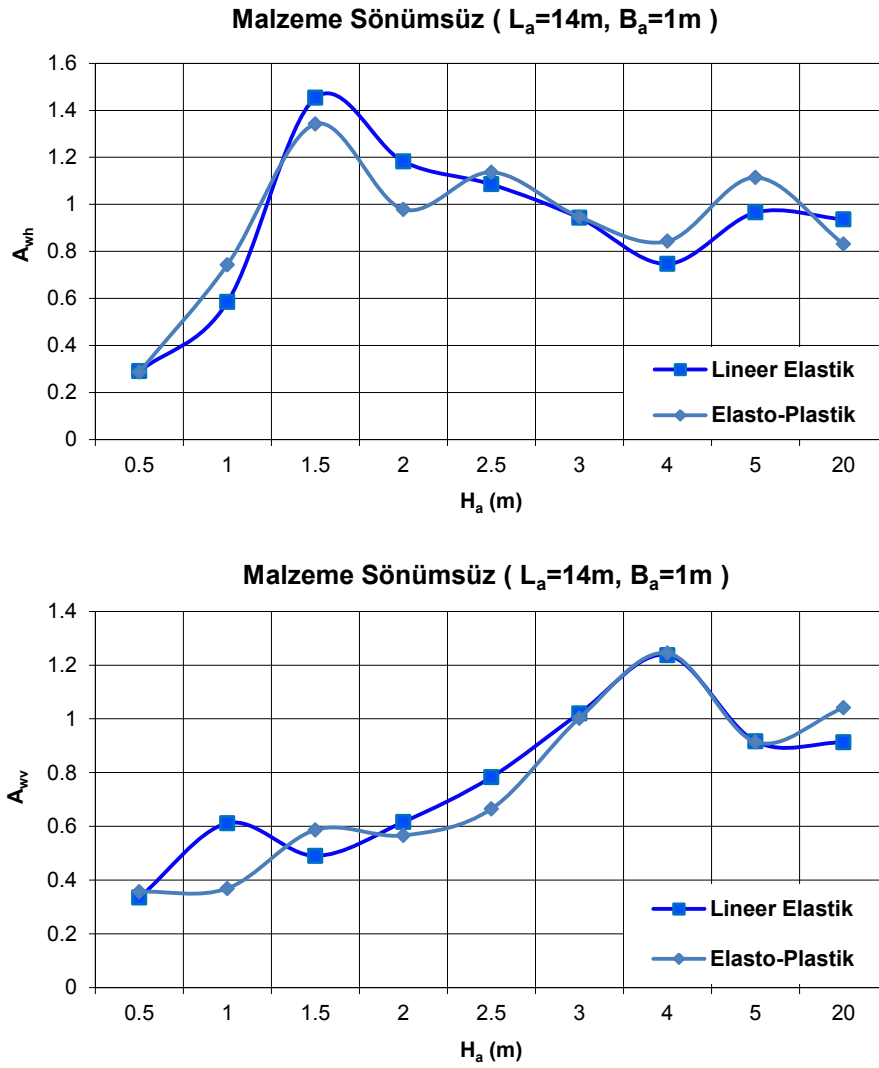
Dinamik yükün titreşim frekansı,  $H_a=0.125\lambda_R$  tabaka kalınlığındaki zemin frekansından daha düşük değerde olduğundan dalga yayılımının gerçekleşmediği veya az bir oranda gerçekleştiği anlaşılmaktadır.  $H_a=0.375\lambda_R$  tabaka yüksekliğinin, kritik tabaka kalınlığına yakın olmasının sonucu olarak, tren yükünün titreşim frekansının zeminin frekansına yaklaştığı görülmekte ve bu tabaka kalınlığında rezonans etkilerine bağlı olarak dalgaların yayılım karakterinin değiştiği gözlemlenmiştir.  $H_a=5\lambda_R$  tabaka kalınlığında ise, yatay hız değerlerinin lineer elastik yarı uzay çözümüne yaklaştığı ve dış yükün titreşim frekansının zeminin öz frekansından büyük olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Sönümsüz durum için yatay hızın serbest zemin yüzeyindeki zaman geçmişi  
(pasif yalıtım)

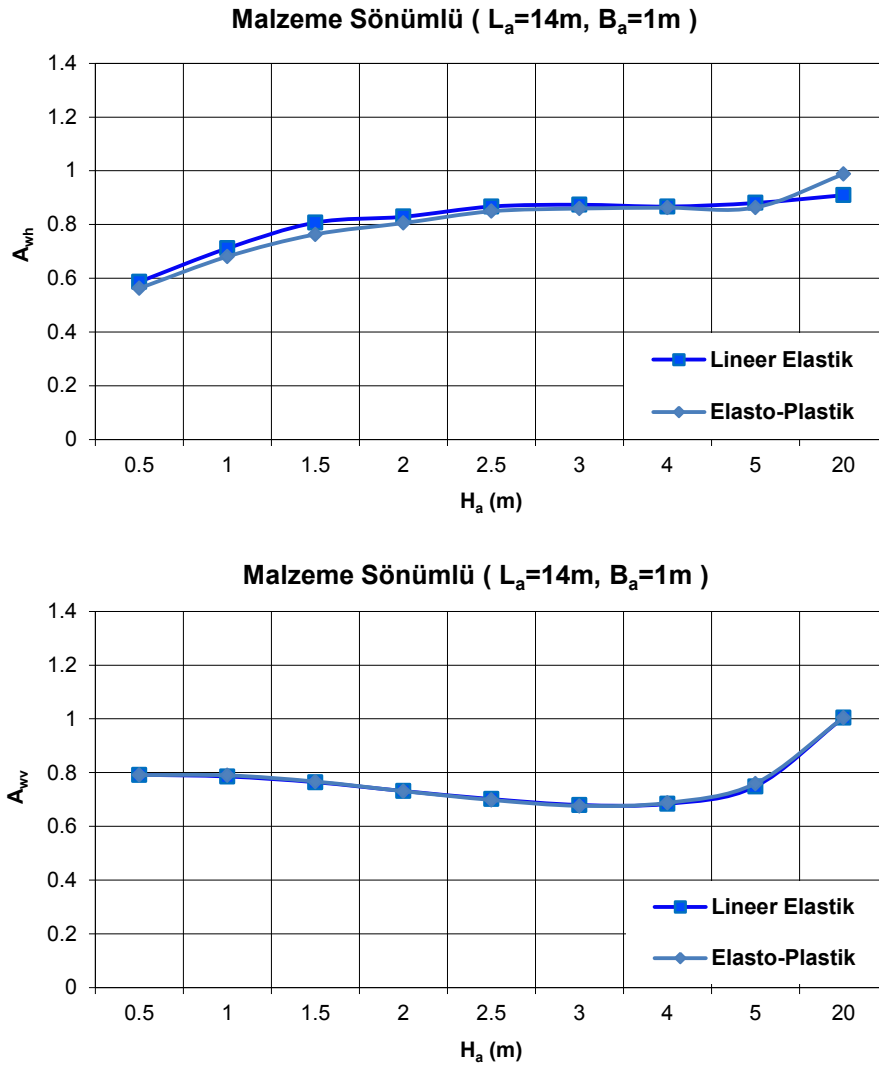
Pasif yalıtım durumuna ait dalga engelleyici yapay kayanın konumlandırıldığı farklı katman yüksekliklerine göre elde edilen yalıtım performansları, lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modellerine bağlı malzeme sönümünün hesaba katılıp katılmadığı iki farklı durum için Şekil 4.9-4.10'da verilmiştir. Sonlu eleman analizlerinde dalga bariyer modelinin analizlerde öngörülen optimum uzunluk ( $L_a$ ) ve kalınlık ( $B_a$ ) gibi kesit boyutları, yazarın daha önceki analitik çalışmalarına (Göktepe vd., 2010; Çelebi ve Göktepe, 2012) dayalı olarak belirlendiğinden, yapay kaya uzunluğu  $L_a = 14m$  ve kalınlığı  $B_a = 1m$  olarak alınmıştır.

Analizlerde malzeme sönümünün dikkate alınmadığı lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modelleri için yapay kaya derinliğinin zeminin serbest yüzeyindeki yatay hız genliklerinde %70, düşey hız genliklerinde ise %60-65 civarında yalıtım etkisi gösterdiği görülmektedir. Dinamik yük kaynağına bağlı oluşan titreşim etkilerini azaltmak için yatay hız genliklerinde elde edilen azaltma oranlarından, kritik derinliğin  $H_a = 1.5m$  civarında olduğu söylenebilir. Zeminin serbest yüzeyinde oluşan düşey hız genliklerine bağlı elde edilen azaltma oranlarından ise, kritik derinliğin  $H_a = 4m$  civarında olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Sönümsüz durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı (pasif yalıtım)

Malzeme sönümünün dikkate alındığı duruma göre, dalga bariyeri  $H_a=0.5m$  derinliğinde %40 yalıtım etkisi meydana getirmiştir. Yapay kayanın sergilediği performansın, lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modellerinde benzer davranış gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga azaltma oranı  
(pasif yalıtım)

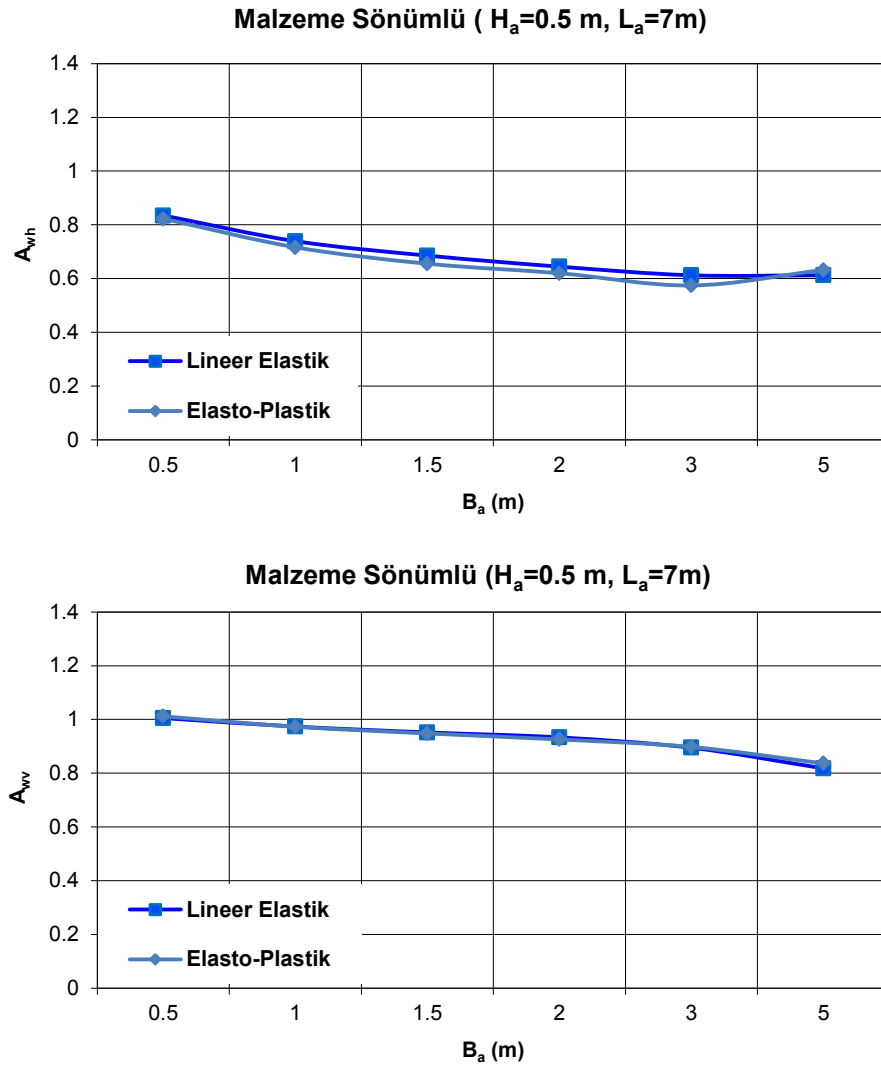
Çalışmanın bu kısmında, aktif ve pasif yalıtım durumlarına göre demiryolu üstyapısından belli bir uzaklıkta zeminin serbest yüzeyinde oluşan yatay ve düşey hız genlikleri kullanılarak, dalga bariyerine ait kritik derinliğin tespiti ve hangi oranlarda azaltma etkisi oluşturduğu gösterilmiştir. Bundan sonraki aşamada, dinamik davranışı incelenecek olan yapının dikkate alınacağı dalga yayılım probleminde, bariyerin optimum kesit boyutları aktif ve pasif yalıtım durumları için tespit edilmeye çalışılarak yapı-zemin etkileşiminin önemi vurgulanacaktır. Binanın varlığının kesit boyutlarını ve yalıtım yüzdesini hangi oranlarda değiştirdiği



konusunda fikir sahibi olmak için aktif yalıtım durumuna göre kapsamlı analizler yapılmıştır.

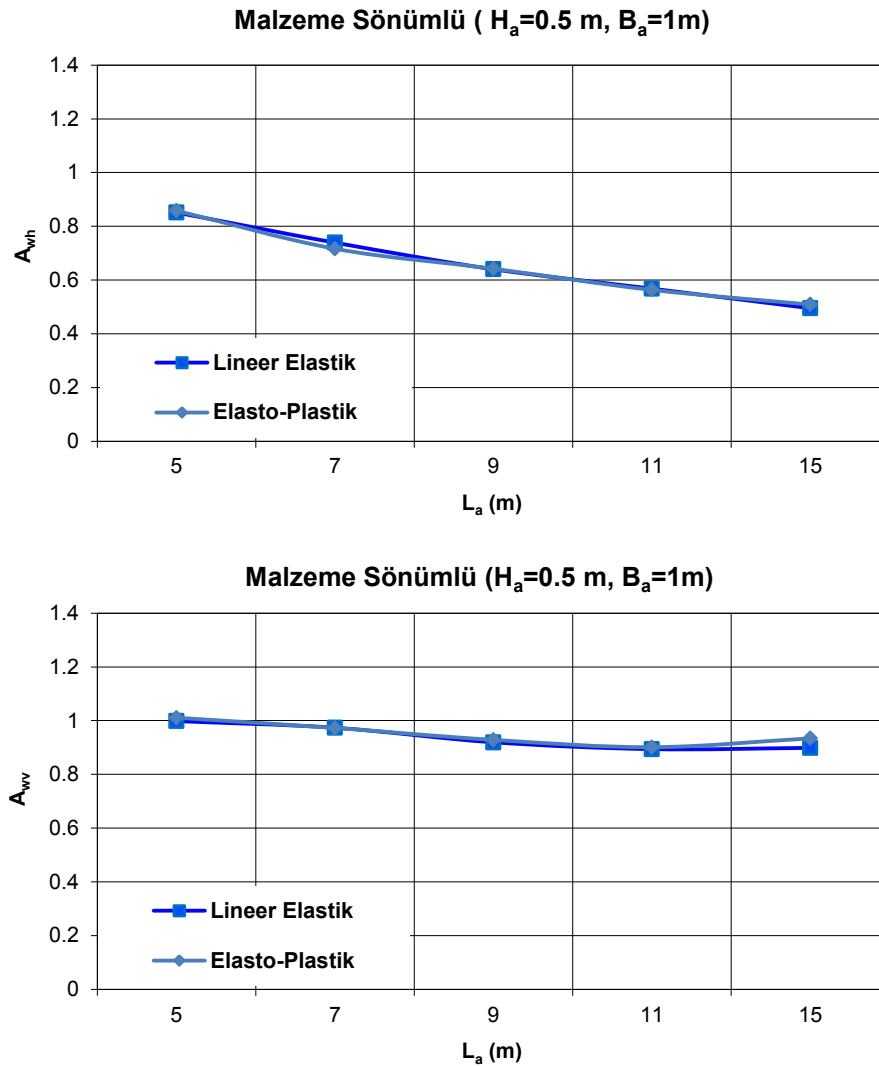
#### 4.1.2. Optimum kesit boyutlarının belirlenmesi

Aktif yalıtım durumu için, bina olmaması durumunda yapay kayanın konumlandırılacağı en uygun derinlik, yukarıdaki bölümde bahsedildiği üzere  $H_a=0.5m$  olarak seçilmiştir. Dalga bariyerinin optimum kalınlığını ( $B_a$ ) tespit etmek amacıyla malzeme sönümünün dikkate alındığı lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modelleri için zeminin serbest yüzeyinde seçilen gözlem noktasında ( $a$  noktası) yapılan nümerik analizlerin sonucu Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya kalınlığına bağlı olarak dalga azaltma oranı (aktif yalıtım)

Grafiklerden en iyi yalıtımın  $B_a=3m$  kalınlık için olduğu tespit edilmiş, fakat  $B_a=1m$  kalınlık için elde edilen azaltma oranları ile kıyas edildiğinde çok büyük bir fark olmadığı anlaşılmıştır. Mühendislik olarak önerilen çözümün ekonomik boyutu düşünüldüğünde yapay kaya kalınlığı  $B_a=1m$  olarak seçilmiştir. Yapay kayanın konumlandırılacağı en uygun derinlik  $H_a=0.5m$  ve yapay kaya kalınlığı  $B_a=1m$  olarak belirlendikten sonra, en uygun yapay kaya uzunluğunu ( $L_a$ ) belirlemek amacıyla sayısal analizler yapılarak sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Sönümlü durum için dalga engelleyici yapay kaya uzunluğuna bağlı olarak dalga azaltma oranı  
(aktif yalıtım)

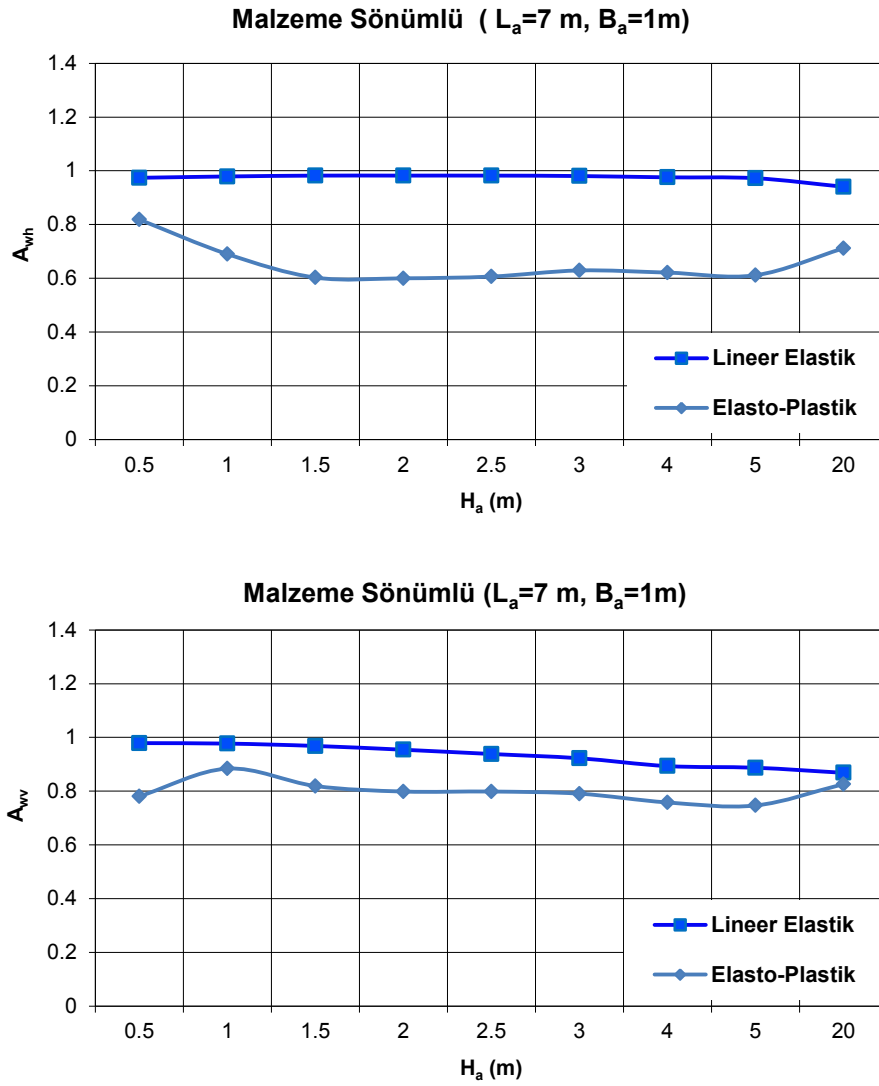
Grafiklerden, gözlem noktası olarak seçilen demiryolu üstyapısından  $l=13m$  uzaklıktaki zeminin serbest yüzeyindeki yatay hız genliklerinde oluşan azaltma

faktörü ile yapay kaya uzunluğu arasında, doğrusal bir orantı görülmektedir. Düşey hız genliklerinde ise bu durum  $L_a=11m$  uzunluğa kadar devam etmektedir. Buna bağlı olarak yapay kayanın pratik olarak inşası düşünüldüğünde, en uygun uzunluğun  $L_a=10m$  olmasına karar verilmiştir (Şekil 4.12).

Dalga bariyerinin aktif yalıtım durumu için en uygun model boyutları  $H_a=0.5m$ ,  $B_a=1m$  ve  $L_a=10m$  olarak tespit edilmiş olup, en uygun model boyutlarının yalıtımsız duruma göre, demiryolu üstyapısından  $l=13m$  uzaklıktaki zeminin serbest yüzeyindeki yatay ve düşey hız genliklerinin azaltılmasında, %40-45 civarında etkili olduğu görülmüştür.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında, yüksek hızlı tren trafiğini ifade eden dinamik yük etkisi altında binada oluşacak titreşimleri azaltmak için, zemin ortamının doğrusal elastik ve doğrusal olmayan davranışının dikkate alındığı sayısal model üzerinde yapay kaya modelleri geliştirilmiştir. Aktif ve pasif yalıtım durumları için geliştirilen bariyer modellerinin, binanın çatı katı düzeyinde (*A noktası*) oluşan yatay ve düşey titreşim etkilerini ne kadar azalttığı incelenerek, en uygun yalıtım şekli araştırılmıştır (Şekil 4.1).

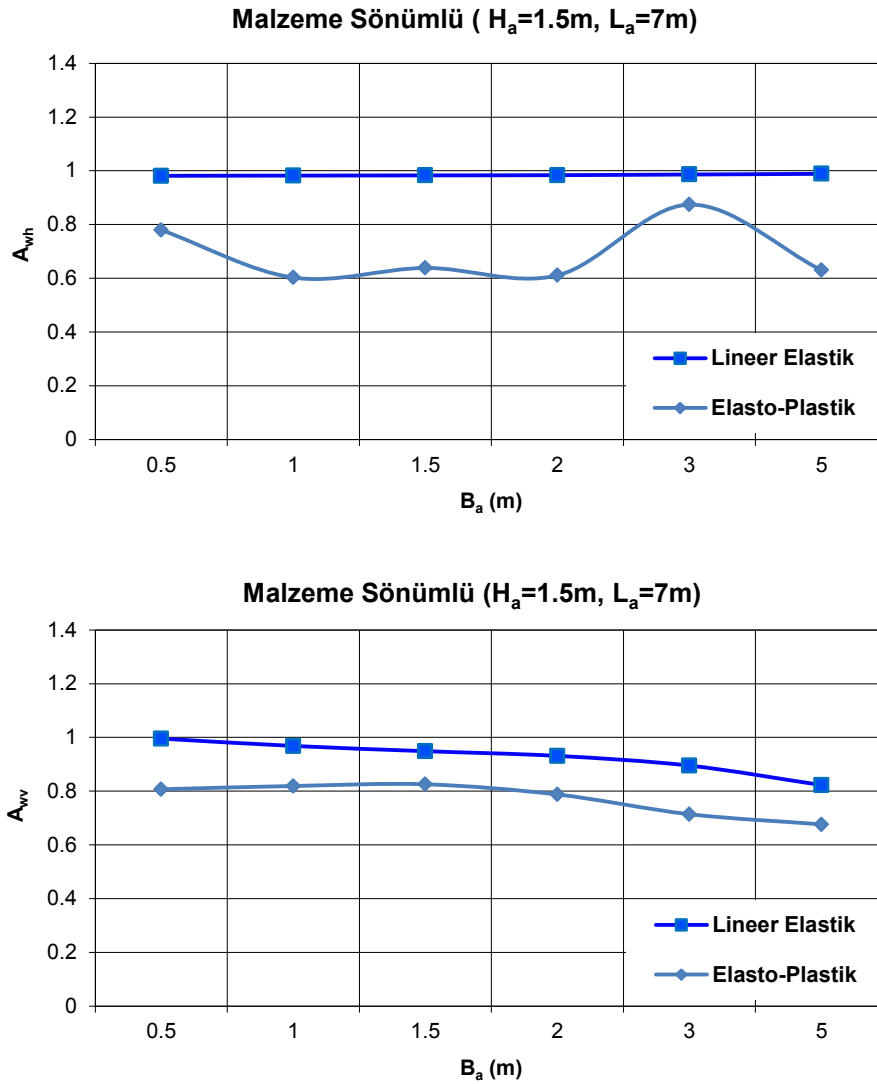
İlk olarak aktif yalıtım durumunda yapay kaya farklı derinliklere konumlandırılarak yatay ve düşey hız genliklerinde göstermiş olduğu performans grafikler halinde Şekil 4.13'de verilmiştir. Grafiklerden dalga engelleyici yapay kayanın, lineer elastik zemin durumu için yalıtım etkisi göstermediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte zemin malzemesinin doğrusal olmayan davranışını tanımlayabilmek amacıyla kullanılan elasto-plastik malzeme modelinde, dalga bariyeri %40 yalıtım performansı sergilemiş ve yapay kayanın konumlandırılacağı en uygun derinlik  $H_a=1.5m$  olarak seçilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga perdeleme oranı

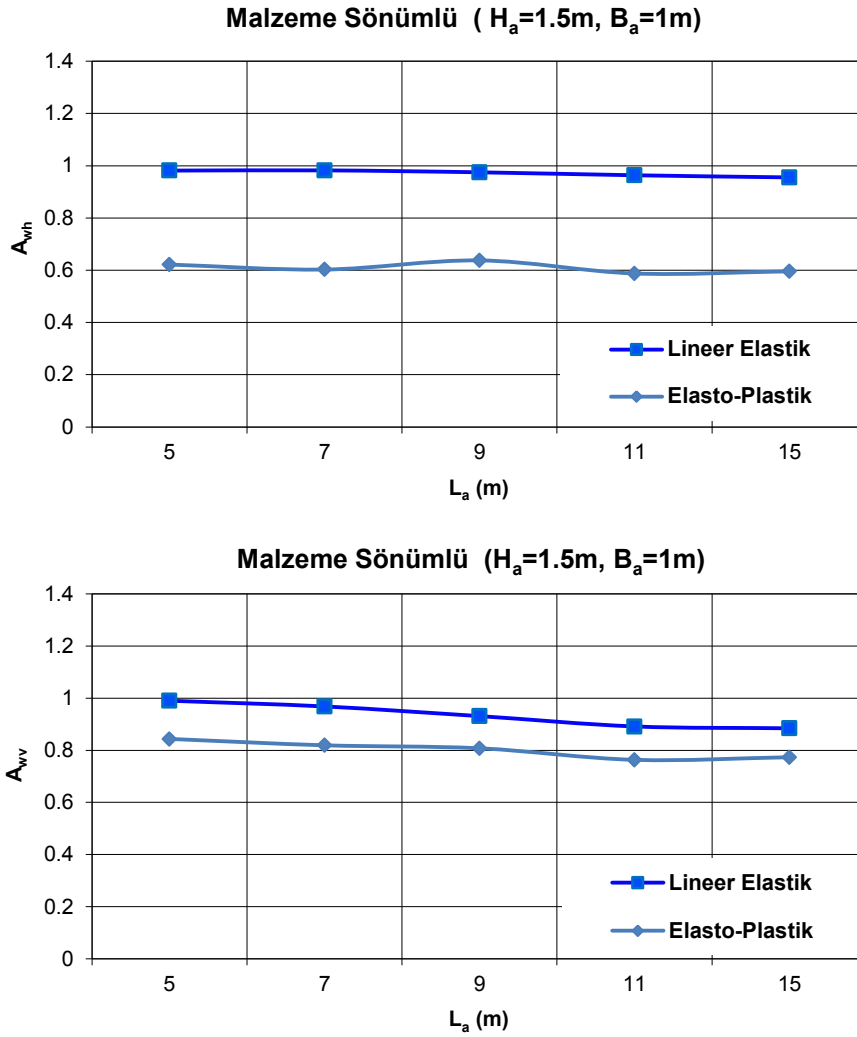
(aktif yalıtım)

Aktif yalıtım durumu için, yapay kayanın yerleştirildiği derinlik  $H_a=1.5m$  ve boyu  $L_a=7m$  olmak üzere bariyerin farklı kalınlıklardaki ( $B_a$ ) dalga perdeleme oranı Şekil 4.14’de verilmiştir. Grafiklerden en iyi yalıtımın, elasto-plastik zemin koşulları altında  $B_a=1m$  kalınlık için yatay hız genliklerinde %40 performans ile oluştuğu tespit edilmiş ve yapay kaya kalınlığı  $B_a=1m$  olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, lineer elastik ortamda bariyerin çok fazla yalıtım etkisi göstermediği görülmektedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Dalga engelleyici yapay kaya kalınlığına bağlı olarak dalga perdeleme oranı (aktif yalıtım)

Aktif yalıtım durumunda, yapay kayanın konumlandırılacağı en uygun derinlik  $H_a=1.5m$  ve yapay kaya kalınlığı  $B_a = 1m$  olarak seçildikten sonra, en uygun yapay kaya uzunluğunu ( $L_a$ ) belirlemek amacıyla, sayısal analizler yapılarak sonuçları Şekil 4.15’de verilmiştir. Grafiklerden, dalga engelleyici bariyerin binalarda oluşan yatay genlik değerlerinde %40 civarında azaltma etkisi gösterdiği görülmüştür. Dalga bariyer uzunluğunun dalga perdelemesine çok fazla etkisinin olmadığından dolayı en uygun uzunluğun  $L_a=5m$  olmasına karar verilmiştir.

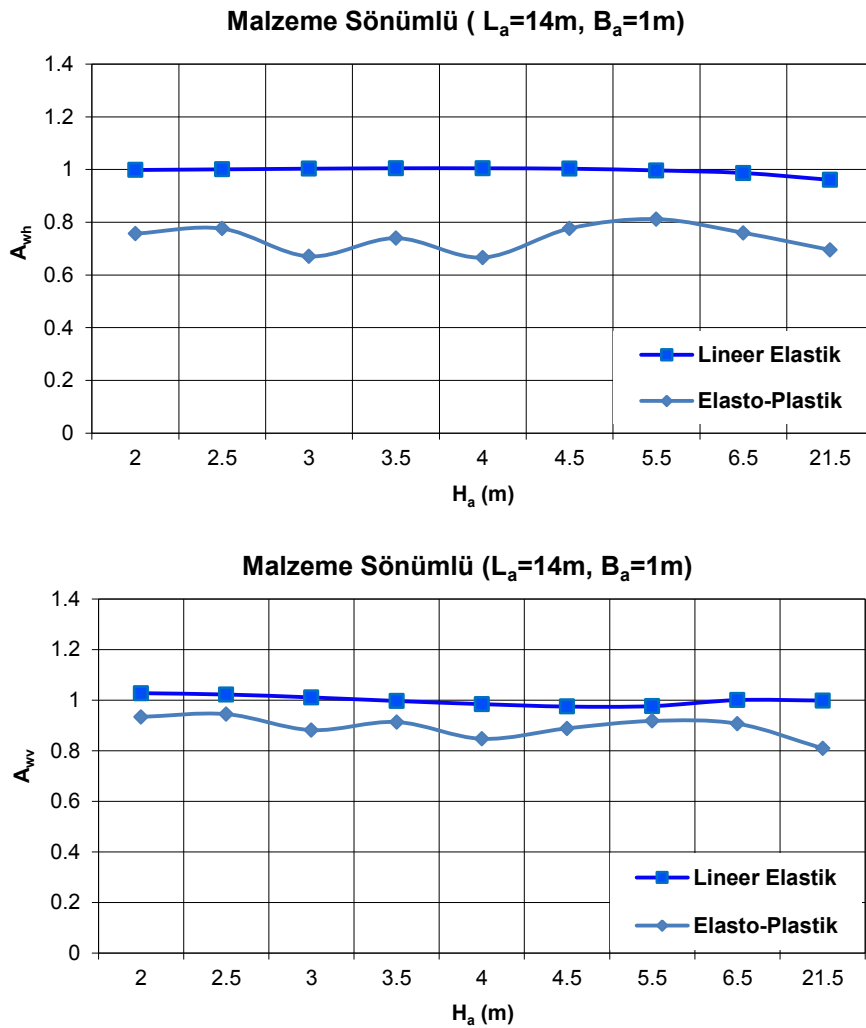


Şekil 4.15. Dalga engelleyici yapay kaya uzunluğuna bağlı olarak dalga perdeleme oranı (aktif yalıtım)

Özet olarak, dalga bariyerinin aktif yalıtım durumu için yapı olması durumunda en uygun model boyutları  $H_a=1.5m$ ,  $B_a=1m$  ve  $L_a=5m$  olarak seçilmiştir. Yüksek hızlı tren geçişlerinin demiryolu üst yapısından  $l=13m$  uzaklıktaki binada meydana gelen yatay ve düşey hız genliklerinin azaltılmasında, en uygun model boyutlarının yalıtımsız duruma göre %40 civarında yalıtım etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Burada dikkati çeken diğer bir husus, binalı durum ve serbest zemin titreşimleri için seçilen optimum bariyer boyutlarının farklı olduğudur. Bununla birlikte, yapay kayanın serbest zemin yüzeyinde göstermiş olduğu yalıtım etkisinden (Şekil 4.12) farklı olarak, binalı durum için elde edilen azaltma eğrisinin davranış biçimi, zemin ortamının lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modellerine göre değişik davranışlar göstermiştir. Bu aşamada yapı-zemin dinamik etkileşim problemi için

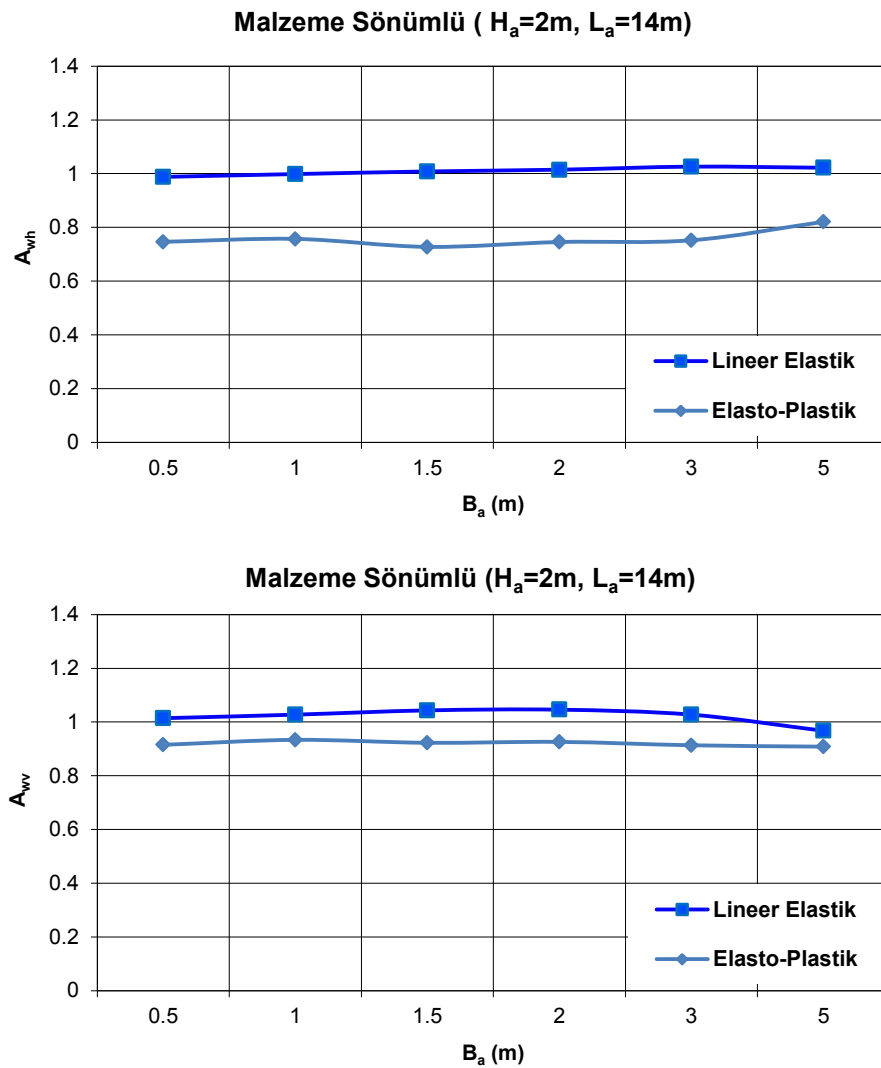
arazi koşullarını gerçeğe yakın temsil edecek doğrusal olmayan malzeme davranışının önemi ve bina olması durumunda dalga yayılım mekanizmasının değiştiği kaçınılmaz bir gerçektir.

Aktif yalıtım durumuna benzer olarak, yüksek frekanslı titreşimler içeren yüksek hızlı tren trafiğinin çevre binalarda oluşturduğu etkileri azaltmak amacıyla, yapay taban kaya bariyer modelinin pasif yalıtım durumuna göre kapsamlı analizler yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak, gözlem noktaları olarak seçilen binanın çatı katı düzeyinde (*A noktası*) oluşan yatay ve düşey hız genliklerinde elde edilen azaltma oranları Şekil 4.16'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Dalga engelleyici yapay kaya derinliğine bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım)

Sayısal analizler sonucu, lineer elastik zemin ortamında dalga bariyerinin çok fazla etkili olmadığı anlaşılmaktadır. Elasto-plastik zemin davranış modeline bağlı yatay hız genlikleri için  $H_a=2m$  ve  $H_a=3m$  yapay kaya derinliklerinde %25-30 civarı yalıtım etkisi tespit edilmiştir. Yapay kayanın pratik olarak inşası düşünüldüğünde en uygun uzunluğun  $H_a=2m$  olmasına karar verilmiştir (Şekil 4.16). Yapay kayanın optimum kalınlığını ( $B_a$ ) tespit etmek amacıyla malzeme sönümünün dikkate alındığı lineer elastik ve elasto-plastik zemin davranış modelleri için yapılan nümerik analizlerin sonucu Şekil 4.17’de verilmiştir.

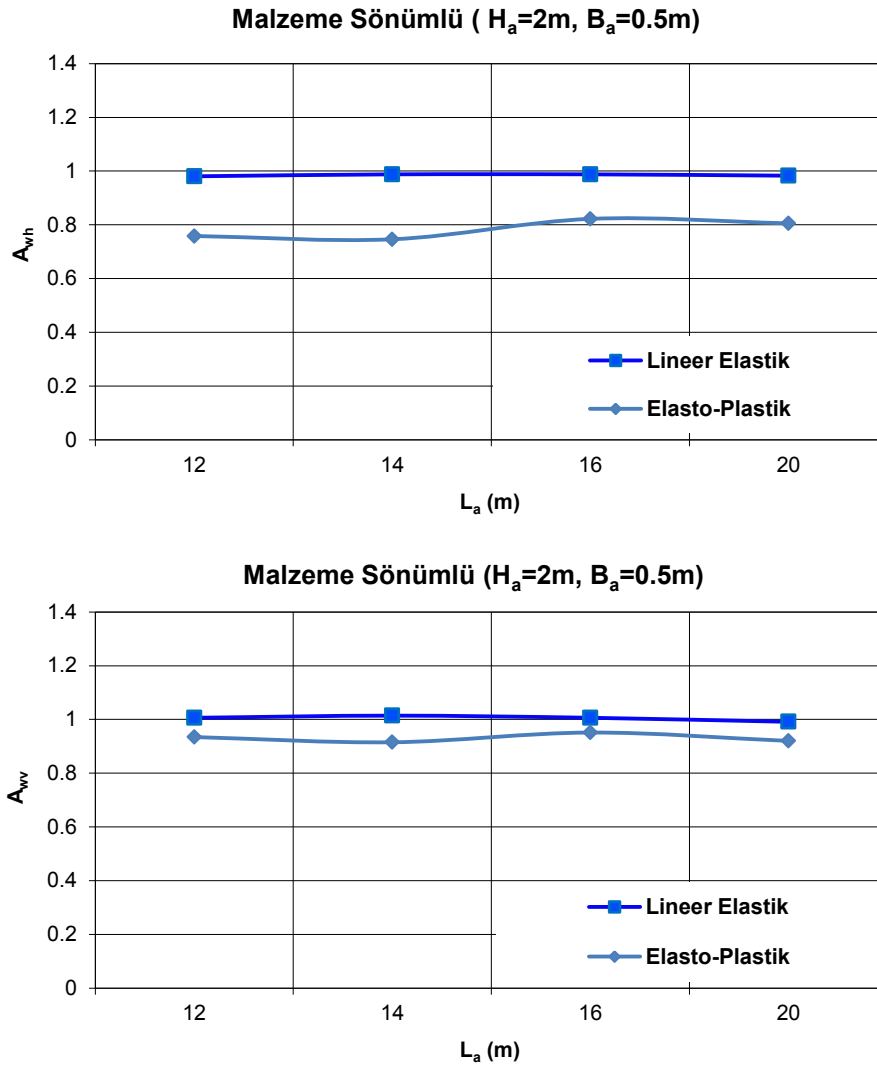


Şekil 4.17. Dalga engelleyici yapay kaya kalınlığına bağlı olarak dalga perdeleme oranı

(pasif yalıtım)



Verilen sonuç grafiklerinden, elasto-plastik malzeme davranışı için  $B_a=3m$  kalınlık ile  $B_a=1m$  kalınlık için elde edilen azaltma oranları karşılaştırıldığında, çok büyük bir fark olmadığı anlaşılmış olup yapay kaya kalınlığı  $B_a=1m$  olarak seçilmiştir. Pasif yalıtım durumu için, yapay kayanın konumlandırılacağı en uygun derinlik  $H_a=2m$  ve yapay kaya kalınlığı  $B_a=1m$  olarak seçildikten sonra, en uygun yapay kaya uzunluğunu ( $L_a$ ) belirlemek amacıyla sayısal analizler yapılarak sonuçları Şekil 4.18’de verilmiştir. Yapay kaya uzunluğunun farklı değerleri için yatay ve düşey hız genliklerinde elde edilen yalıtım oranlarının birbirine yakın olduğu grafiklerden görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak, yapay kaya uzunluğunun dalga perdelemesine çok fazla etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Önerilen çözümün ekonomik boyutu da düşünüldüğünde bariyer uzunluğu  $L_a=12m$  olarak seçilmiştir.



Şekil 4.18. Dalga engelleyici yapay kaya uzunluğuna bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım)

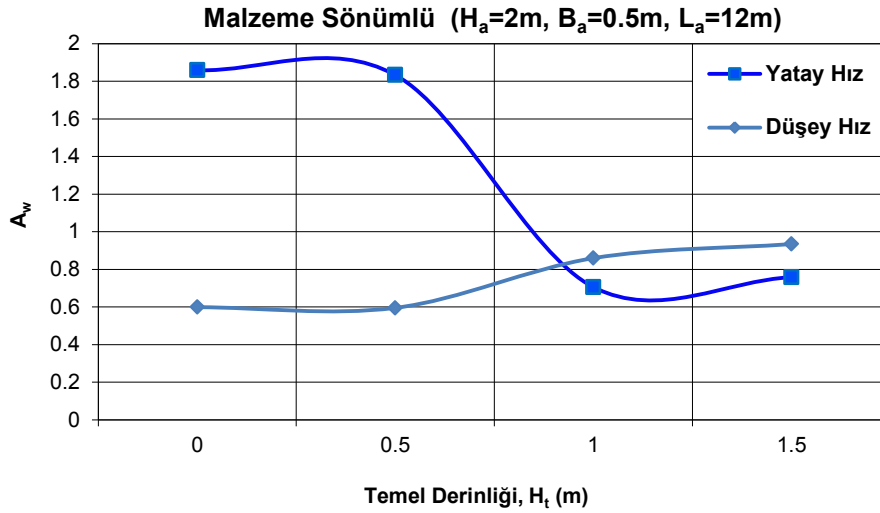
Gerçekleştirilen çözümler sonucunda, dalga bariyerinin pasif yalıtım durumu için demiryolu üstyapısından  $l=13m$  uzaklıktaki binaya ait en üst kattaki hız bileşenlerinin yatay ve düşey genliklerinde elde edilen azaltma oranları dikkate alındığında en uygun model boyutları  $H_a=2m$ ,  $B_a=0.5m$  ve  $L_a=12m$  olarak tespit edilmiştir. Optimum bariyer boyutlarının yalıtımsız duruma göre titreşim etkilerini %30 civarında azalttığı görülmüştür. Pasif yalıtım durumunda, dalga engelleyicinin kalınlığı ( $B_a$ ) ve uzunluğu ( $L_a$ ) gibi parametrelerinin dalga perdelemesine çok fazla etkisinin olmadığı gözlemlenmiş olup, yalıtımın daha çok yapay kaya derinliği ( $H_a$ ) ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır.

Anakaya özelliğini taşıyan yapay kaya ile oluşturulan tek tabakalı zemin ortamının temel titreşim frekansı değerinin altında kalan dış yükün frekans değerlerinde dalga yayılışlarının olmadığı daha önce ifade edilmiştir. Pasif yalıtım durumunda, yalıtım sağlanması düşünülen yapay kaya ile oluşturulan tek tabakalı zemin ortamı için akla gelebilecek bir soru “*bu bölgenin tam olarak neresi olduğudur*”.

Dalga yayılım mekanizmasının değiştirilmesi amacıyla konumlandırılan anakaya özelliğindeki yapay kayanın oluşturduğu tek tabakalı zemin ortamı için iki durum düşünülebilir. Birincisi, literatürdeki gösteriliş biçimi gibi serbest zemin yüzeyi ile dalga bariyeri arasındaki ( $H_a$ ) zemin tabakasıdır. Diğeri ise, bina temelinin alt kısmı ile yapay kaya arasında kalan ( $H_k$ ) zemin tabakasıdır (Şekil 3.14). Bu belirsizliğin önüne geçmek ve yalıtım etkisi gösteren zemin tabakasını belirlemek amacıyla, pasif yalıtım durumu için elde edilen optimum bariyer boyutları  $H_a=2m$ ,  $B_a=0.5m$  ve  $L_a=12m$  kullanılarak farklı temel derinliklerine ( $H_t$ ) göre yapılan sayısal analiz sonuçları Şekil 4.19’da verilmiştir.

İlk olarak, temel serbest zemin yüzeyine oturtulmuş ( $H_t=0$ ), sonrasında ise temel derinliğine farklı değerler ( $0 \leq H_t \leq 1.5$ ) verilerek üstyapıya ait yatay ve düşey hız genliklerinden elde edilen azaltma oranları karşılaştırılmıştır. Grafiklerden temelin yüzeyde olması ve değişik derinliklere yerleştirilmesi durumları için dalga bariyerinin göstermiş olduğu farklı performans yüzdelerinden, yalıtım etkisi gösteren zemin bölgesinin yapay kaya ile temel derinliği arasındaki alan ( $H_k$ ) olduğu anlaşılmıştır. Dalga yayılım mekanizmasının değiştirildiği tek tabakalı zemin

ortamının düşey dalga bariyeri ile serbest zemin yüzeyi arasındaki alan ( $H_a$ ) olması için elde edilen yalıtım performanslarının birbirine eşdeğer olması gerektiği kaçınılmaz bir gerçektir (Şekil 4.19). Bununla birlikte, yapay kayanın konumlandırıldığı yüksekliğin ( $H_a$ ) şekilsel gösterimi aktif ve pasif yalıtım durumları için literatürde serbest zemin yüzeyinden itibaren verilmektedir



Şekil 4.19. Dalga engelleyici yapay kayanın temel derinliğine bağlı olarak dalga perdeleme oranı (pasif yalıtım)

Çalışmanın bu kısmında yapay kayanın aktif ve pasif yalıtım durumları için dinamik yük kaynağının zeminlerde meydana getirdiği titreşim etkilerinin, yapı davranışına etkileri belirlenen temel parametrelere göre kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve sonuçlar grafikler halinde gösterilmiştir. Aktif ve pasif yalıtım durumlarına ait yukarıdaki grafiklerden, lineer elastik ve elasto-plastik zemin ortamlarında binasız durum için elde edilen dalga perdeleme davranışlarının çok fazla değişmediği tespit edilmiştir. Ancak, binalı durumun dikkate alındığı yapı-zemin dinamik etkileşim problemini doğrudan temsil eden nümerik simülasyon için, zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil eden malzeme modelinin önemi birkez daha anlaşılmıştır.

Bu durum, yüksek hızlı tren trafiğinin oluşturduğu büyük genlikteki titreşimleri azaltmak amacıyla geliştirilen sayısal model yardımıyla yapılan hesaplamalarda, zeminin öngörülen mekanik davranışı için tercih edilen elasto-plastik Mohr-Coulomb

malzeme modelinin önemini göstermektedir. Literatürde deprem yer hareketi dışında yüksek hızlı trenler gibi yüksek frekansa sahip insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu problemlerin sayısal analizlerinde, araştırmacıların genel olarak tercih ettiği lineer elastik zemin ortamından farklı olarak, yapılan bu çalışmada sonuçların tutarlılığı ve doğruluk düzeyi açısından, zeminin doğrusal olmayan davranışını gerçeğe en yakın biçimde temsil etmek için Mohr-Coulomb yenilme kriteri altındaki elasto-plastik malzeme davranışı kullanılmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümünde, zeminin Mohr-Coulomb akma kriteri altındaki elasto-plastik davranışının dikkate alındığı aktif ve pasif yalıtım durumlarında optimum dalga bariyer boyutları kullanılarak önerilen çözümün yalıtım etkisini artırmak için farklı yaklaşımlar geliştirilecektir.

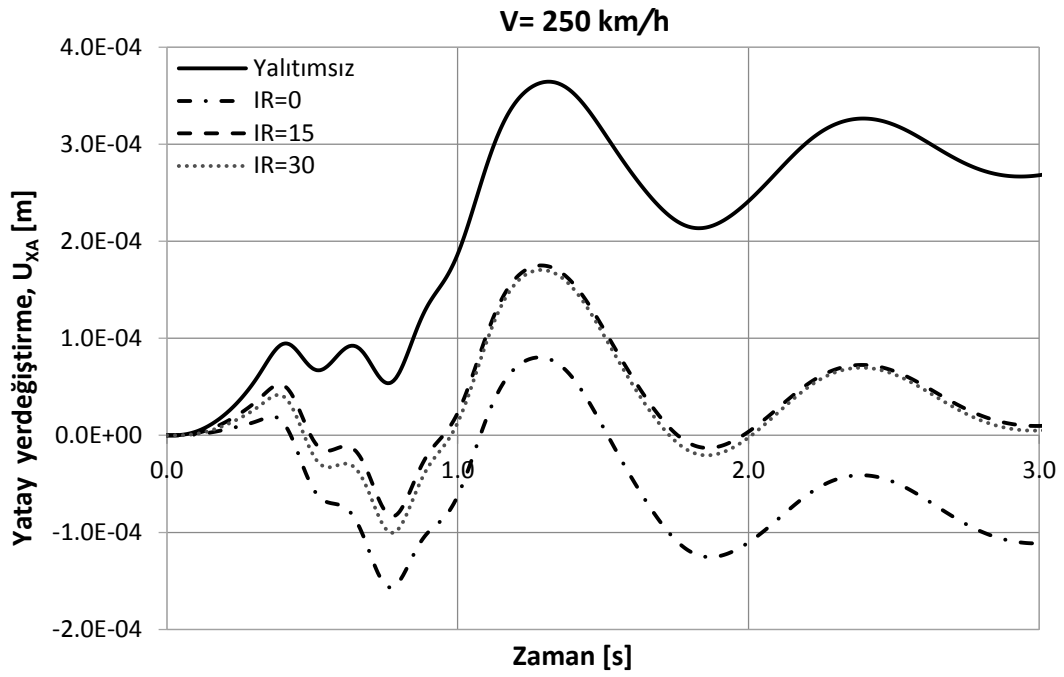
#### 4.1.3. Yapay taban empedans kontrastının yapısal davranışa etkisi

Yüksek frekanslı titreşimler içeren hızlı tren geçişlerinin oluşturduğu etkileri azaltmak için yapay taban kayanın tesis edileceği yerin belirlenmesinden sonra, bariyerin dalga yayılışına olan etkisi malzeme yoğunluk kontrastına ( $IR$ ) bağlı incelenmiştir:

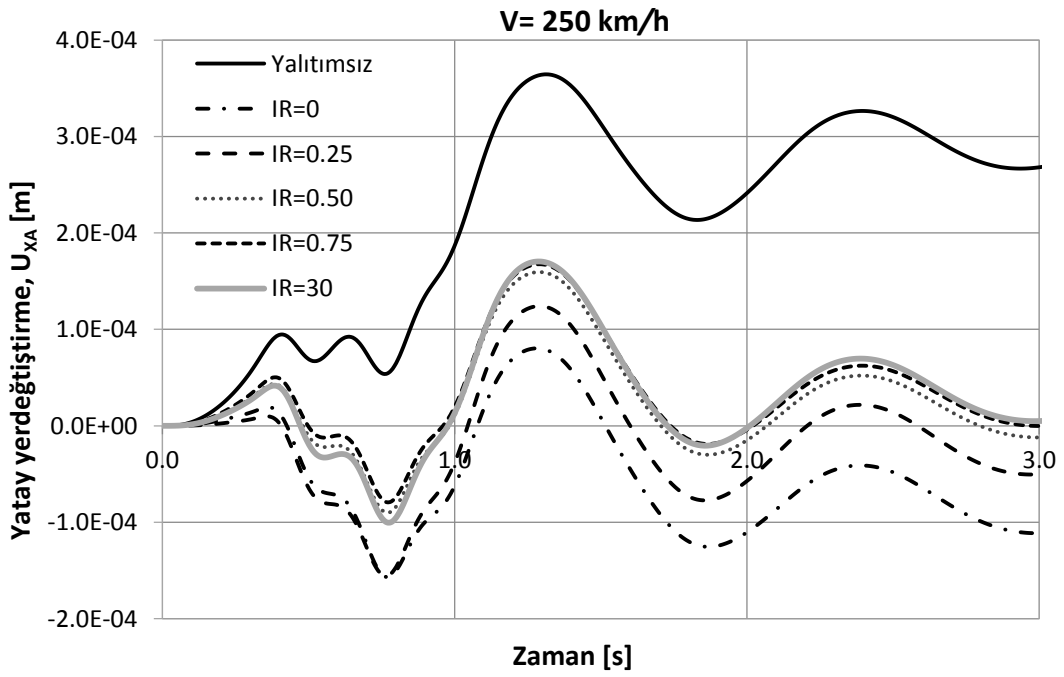
$$IR = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (4.3)$$

Burada verilen yoğunluk kontrastı ( $IR$ ) bariyerin empedans değerinin ( $\rho_b V_b$ ), zeminin empedans değerine ( $\rho_s V_s$ ) oranı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, bu boyutsuz parametre, dalga bariyerinin içine konulan malzemenin zemine göre dinamik rijitlik etkisini karşılaştırmaktadır.

Bina tepe noktası yatay deplasmanlarının farklı empedans oranlarına  $0 \leq IR \leq 30$  bağlı zaman geçmişleri, yapay taban kaya modelinin aktif ve pasif yalıtım durumları için hızlı trenin  $V=250 \text{ km/h}$  geçiş hızına göre elde edilmiş ve sonuç grafikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 4.20–4.21).



(a) IR=0, 15 ve 30



(b) IR=0, 0.25, 0.50, 0.75 ve 30

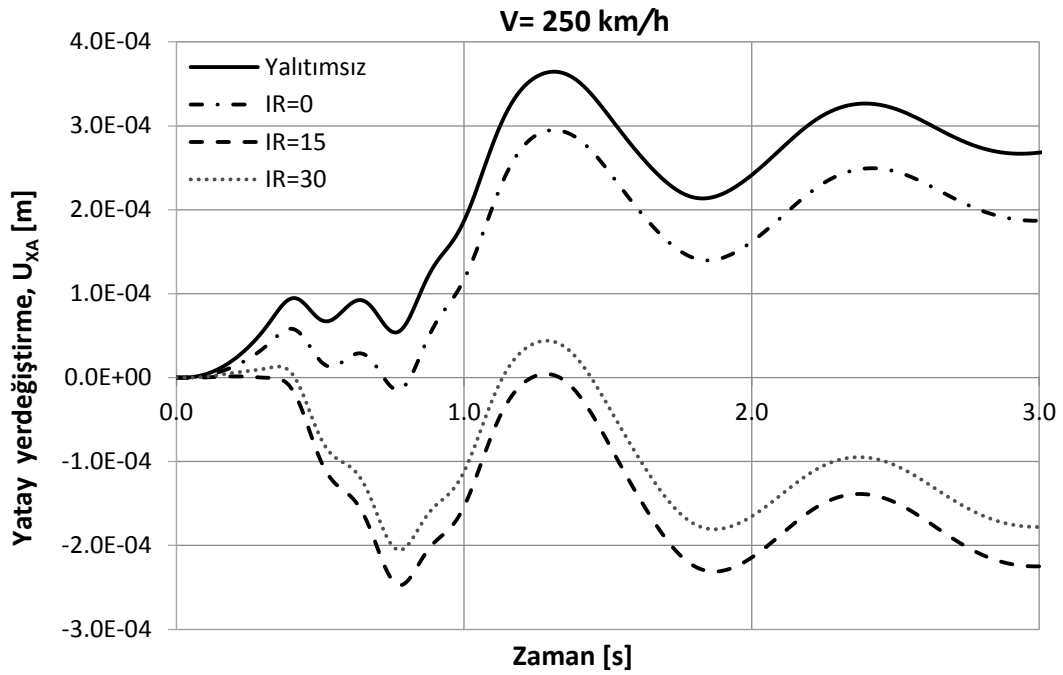
Şekil 4.20. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme sinin farklı empedans oranlarına bağı zaman geçmişi (aktif yalıtım)

İçi boş kutu kesitli yatay dalga bariyerinin ( $IR=0$ ) titreşimlere karşı duvar stabilitesini sağlamak için  $0.15m$  genişliğinde betonarme cidar düşünülmüştür.

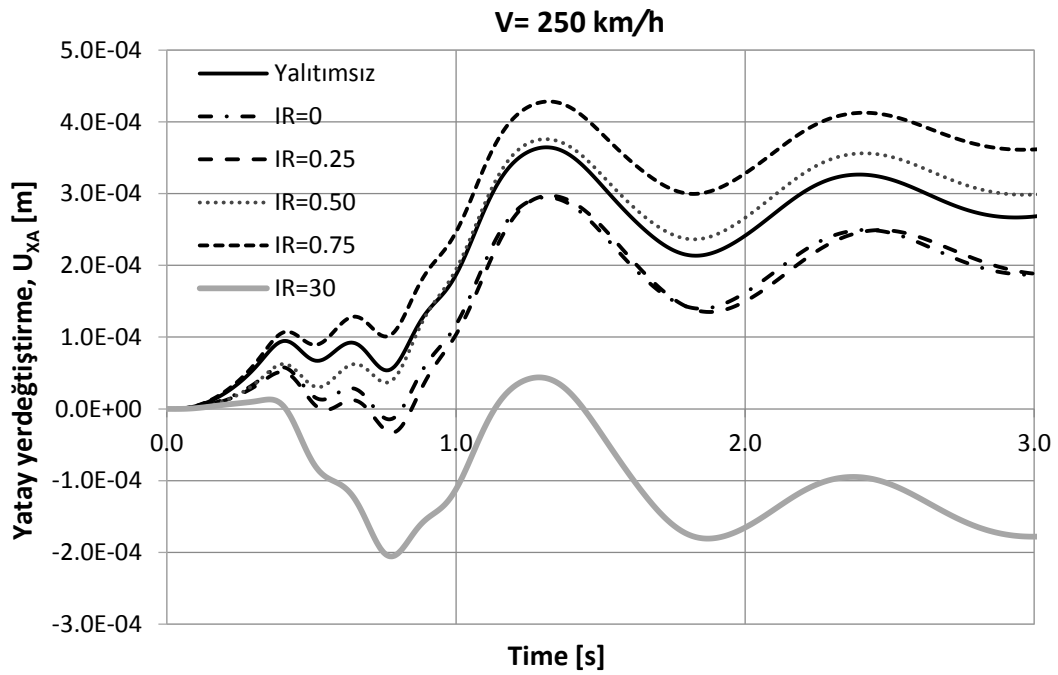
Aktif yalıtım durumunda göz önünde bulundurulan tüm dalga bariyer örnekleri ( $0 \leq IR \leq 30$ ) binanın yatay titreşim genliklerini önemli derecede azaltılmıştır. Trenin  $V=250 \text{ km/h}$  geçiş hızında içi boş bariyer modeli ( $IR=0$ ) yalıtımsız duruma göre %80 civarında bina titreşimlerini azaltırken, diğer yalıtım modellerinde bu değer beton bariyer ( $IR=30$ ) ve farklı yoğunluklar ( $IR=0.50$ ,  $IR=0.75$  ve  $IR=15$ ) için %55 civarında elde edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinde esnek bariyer olarak düşünülen ve empedans oranı 0 değerinden küçük olan ( $IR<0$ ) farklı yoğunluktaki bentonit malzemeleri içinde en iyi performans, düşük yoğunluktaki dalga engelleyici ( $IR=0.25$ ) için %70 oranında gözlemlenmiştir. Başka bir ifadeyle, dalga bariyerinin imal edildiği bentonit malzemenin yoğunluğu azaldıkça yalıtım etkisi artmaktadır. Gerçekleştirilen çözümler sonucunda, dış yükün yüksek frekans değerinde dalgaların daha sık ortamdan yayılımına devam ettikleri için bütün yalıtım malzemelerinde yaklaşık olarak birbirine benzer davranış şekli sergiledikleri anlaşılmıştır (Şekil 4.20).

Pasif yalıtım uygulamasında ise, hareketli yükün geçiş hızı  $V=250 \text{ km/h}$  için farklı malzeme yoğunluğuna sahip yapay taban kaya yalıtım modellerinin binanın yatay titreşim genliklerinin azaltılmasında önemli derecede etkili olduğu görülmektedir. Üstyapılarda maksimum yerdeğiştirmenin beklendiği bina çatı katı düzeyinde elde edilen yalıtım etkisi rijit beton bariyer ( $IR=30$ ) için %90 iken, bu değer yarı-rijit bariyer ( $IR=15$ ) için oldukça artmakta olup önemli oranda yalıtım performansı elde edilmiştir. Pasif yalıtım durumunda, içi boş betonarme kutu kesitli taban kaya uygulaması ( $IR=0$ ) ile düşük yoğunluktaki bentonitler ( $IR=0.25$ ) için performans etkileri düşmekte olup, dalga bariyerinin imal edildiği farklı yoğunluklardaki bentonit malzemeler ( $IR=0.50$  ve  $IR=0.75$ ) için yalıtım etkisi gözlenmemiştir (Şekil 4.21).



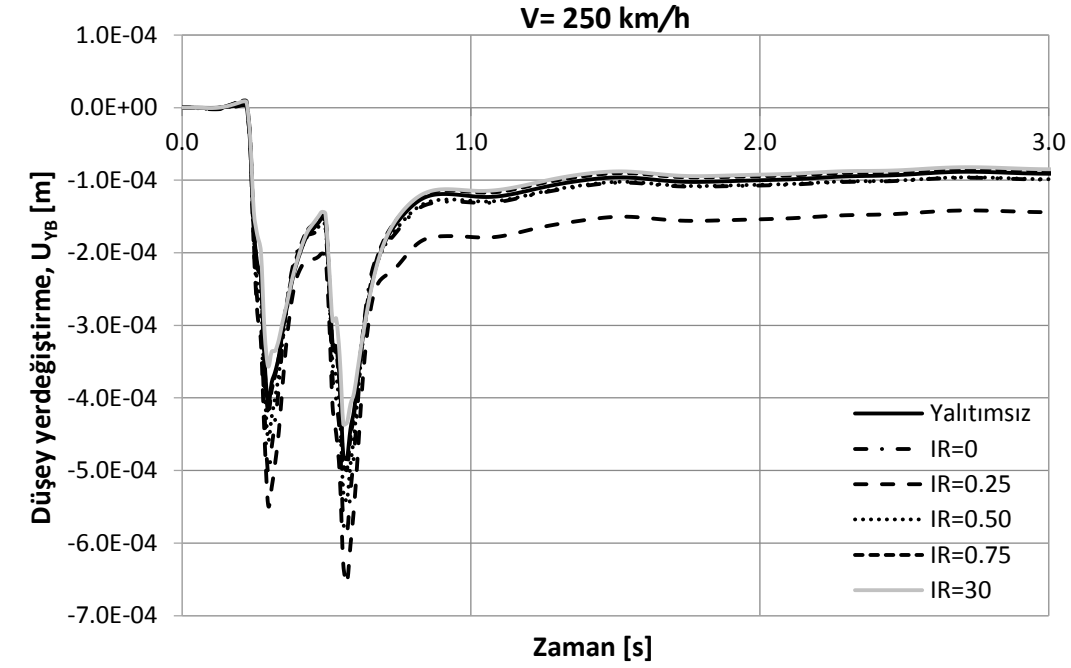
(a) IR=0, 15 ve 30



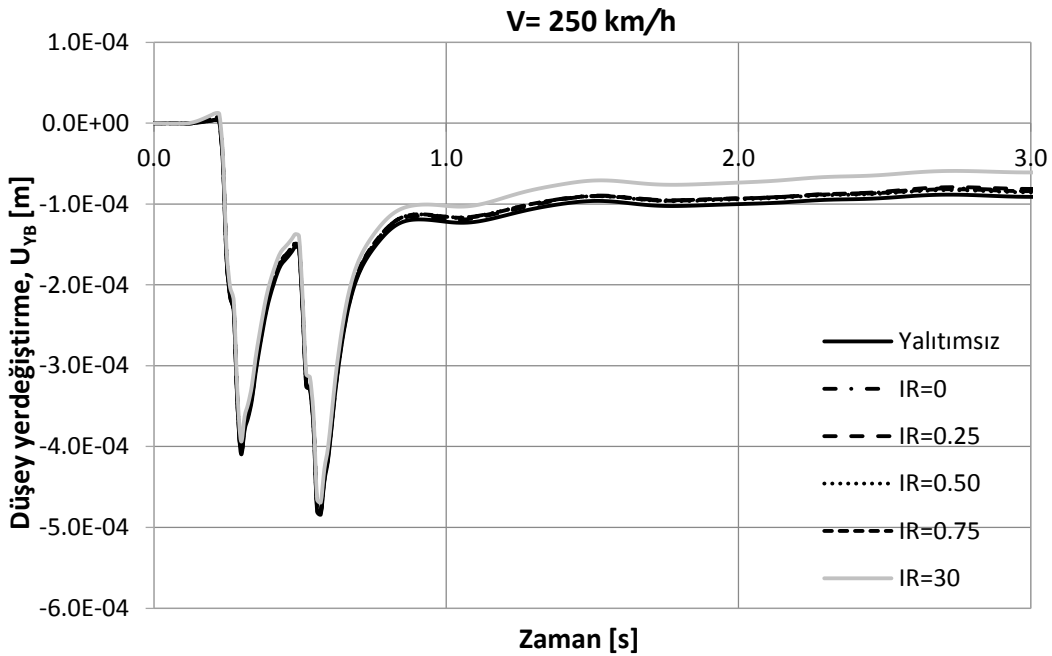
(b) IR=0, 0.25, 0.50, 0.75 ve 30

Şekil 4.21. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin farklı empedans oranlarına bağlı zaman geçmişi (pasif yalıtım)

Yüksek hızlı tren geçişlerinin demiryolu üst yapısında oluşturduğu düşey deplasmanların zamanla değişimleri, taban kayanın aktif ve pasif yalıtım durumları için karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.22’de verilmiştir.



(a) aktif yalıtım



(b) pasif yalıtım

Şekil 4.22. Demiryolu üst yapısının düşey yerdeğiştirmesinin farklı empedans oranlarına bağlı zaman geçişi



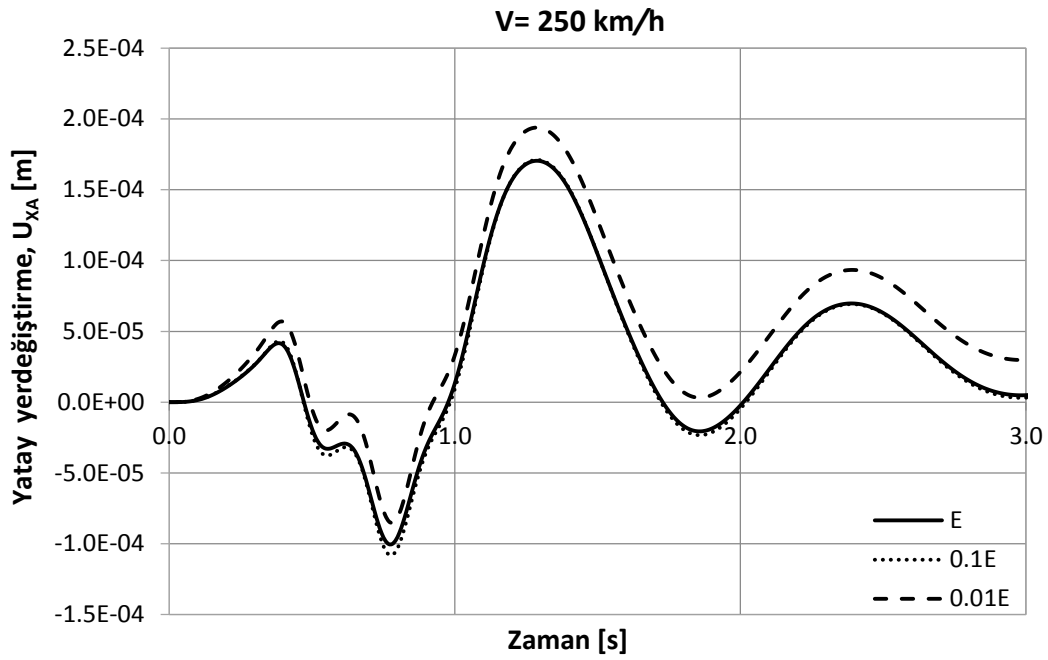
Genel olarak, aktif yalıtım için gerçekleştirilen tüm sayısal uygulamalar dalga bariyerlerinin varlığının demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede etkilemediğini göstermiş olup düşük yoğunluklu imal edilen bentonit bariyerler ( $IR=0.25$ ) için az oranda bir büyütme etkisi tespit edilmiştir (Şekil 4.22a).

Pasif yalıtım durumunda ise, beton taban kaya uygulaması ( $IR=30$ ) titreşimlerin genliklerinde yalıtımsız duruma göre az oranda küçültme etkisi meydana getirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, özellikle pasif yalıtım uygulamalarındaki demiryolu üstyapısında oluşan titreşim etkilerinin azaltılmasında dalga bariyerlerinin rijitliği artması ile yalıtım etkisinin arttığı söylenebilir (Şekil 4.22b).

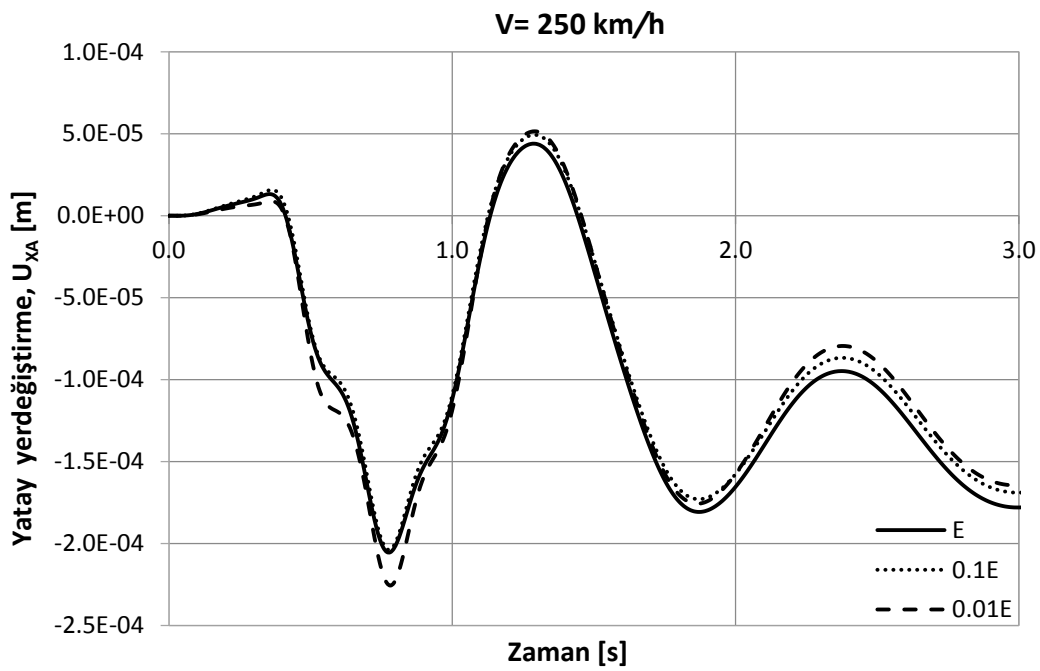
#### **4.1.4. Demiryolu üstyapı rijitliğinin yapısal davranışa etkisi**

Çalışmanın bu kısmında, yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan demiryolu üstyapısı yatak rijitliği göz önünde bulundurularak yol ve bina titreşimlerine olan etkisi araştırılmıştır. Düşey ve yatay deplasmanların farklı yatak rijitlik değerlerine göre zaman geçmişleri, aktif ve pasif yalıtım durumlar için elde edilerek karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. (Şekil 4.23-4.24).

Mevcut demiryolu yatağı farklı rijitliklerdeki yol platformlarıyla karşılaştırıldığında, binanın dinamik davranışına etkileri aktif yalıtım durumunda etkili olurken, pasif yalıtım durumu için önemli derecede etkili olmadığı anlaşılmıştır. Aktif yalıtım durumuna ait elde edilen grafiklerden, mevcut demiryolu yatağı rijitliğinin 100 kat azalması bina tepe noktasında oluşan yerdeğiştirmeleri %35 oranında büyütmiştir (Şekil 4.23).



(a) aktif yalıtım

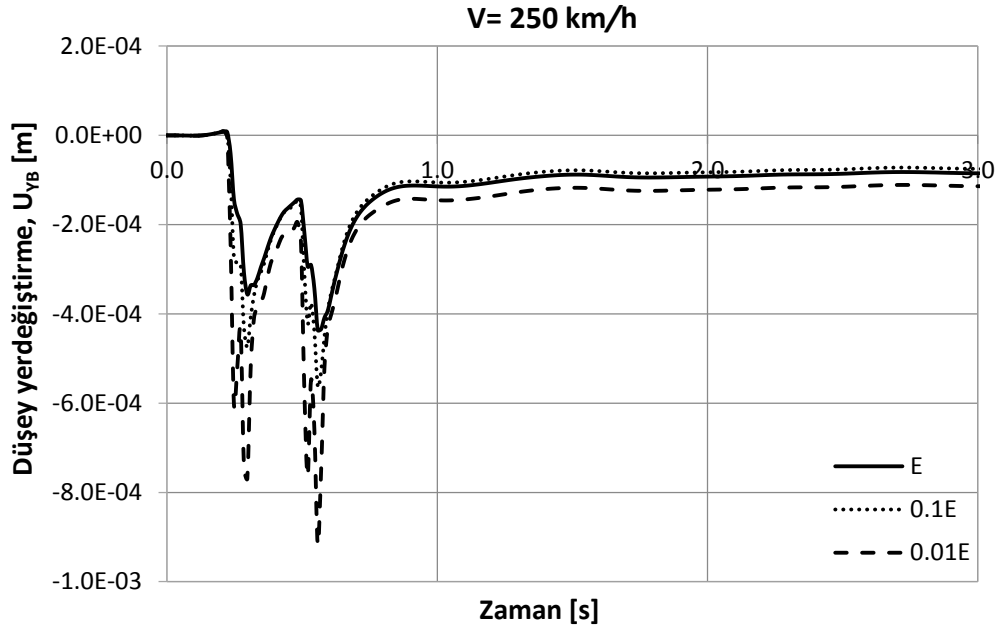


(b) pasif yalıtım

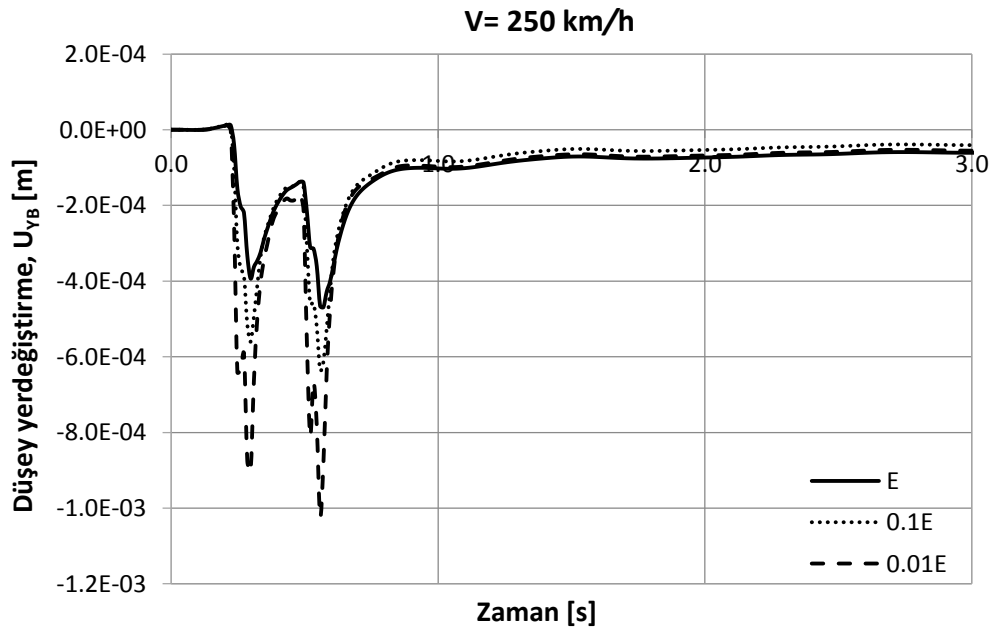
Şekil 4.23. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin demiryolu üstyapısının farklı rijitlik değerlerine bağlı zaman geçmişi

Demiryolu üstyapısında seçilen noktada elde edilen titreşimler değerlendirildiğinde, dinamik yükün altındaki düşey titreşimlerde tahmin edildiği gibi, platform rijitliğinin azaltılması ile önemli derecede büyütme etkisi gözlemlenmiştir. Sayısal analizlerde,

aktif ve pasif yalıtım durumları için mevcut demiryolu yatağı rijitliğinin 100 kat azalması ile demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmelerinde önemli oranda büyütme etkisi meydana gelmiştir (Şekil 4.24).



(a) aktif yalıtım



(b) pasif yalıtım

Şekil 4.24. Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin demiryolu üstyapısının farklı rijitlik değerlerine bağlı zaman geçmişi

Tez çalışmasının bu bölümünde, hızlı tren setlerinin tekrarlı geçişleri sırasında zeminlerde ürettikleri yüksek frekanslı titreşim etkilerinin azaltılması amacıyla,

çözüm önerisi olarak sunulan dalga engelleyici yapay kayanın aktif ve pasif yalıtım durumları için kapsamlı parametrik araştırmalar yapılmıştır.

Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucu, dalga bariyerinin aktif yalıtım durumu için en uygun model boyutları  $H_a=1.5m$ ,  $B_a=1m$  ve  $L_a=5m$  olarak tespit edilmiştir. Optimum boyutlar kullanılarak oluşturulan içi boş bariyer modelinin ( $IR=0$ ) yalıtımsız duruma göre binalarda meydana gelen titreşim etkilerini %80 civarında azalttığı görülmüştür.

Pasif yalıtım durumunda ise, en uygun bariyer boyutları  $H_a=2m$ ,  $B_a=0.5m$  ve  $L_a=12m$  ile imal edilen rijit dalga bariyeri ( $IR=30$ ) bina titreşim etkilerini %90 civarında azaltmıştır. Bununla birlikte, sözkonusu yalıtım performansının yarı-rijit bariyer modeli ( $IR=15$ ) için yükseltilebileceği gösterilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki aşamasında, maksimum deformasyonların beklendiği binanın en üst katı düzeyinde oluşabilecek titreşimleri azaltabilmek için kullanılacak bir düşey dalga bariyeri modeli araştırılacaktır.

#### **4.2. Düşey Dalga Bariyeri Uygulaması**

Yüksek hızlı tren geçişlerinin alüvyon zemin ortamında meydana getirdiği titreşim etkilerinden çevre binaları korumak için yalıtım potansiyeli yüksek içi boş ve içi doldurulmuş hendekler, dalga bariyerleri olarak inşaat mühendisliğinin pratik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde en uygun dalga sönümlenme şeklini belirlemek amacıyla içi boş ve doldurulmuş dalga bariyerleri birbirinden farklı üç tipte dikkate alınmıştır. İlk olarak demiryolu üstyapısı ile bina arasına yerleştirilen tek hendek (tek düşey dalga bariyeri) sonrasında yan yana konumlandırılmış iki hendek (ikili düşey dalga

bariyeri) ve üç hendek (üçlü düşey dalga bariyeri) şeklinde farklı formasyonlar geliştirilmiştir.

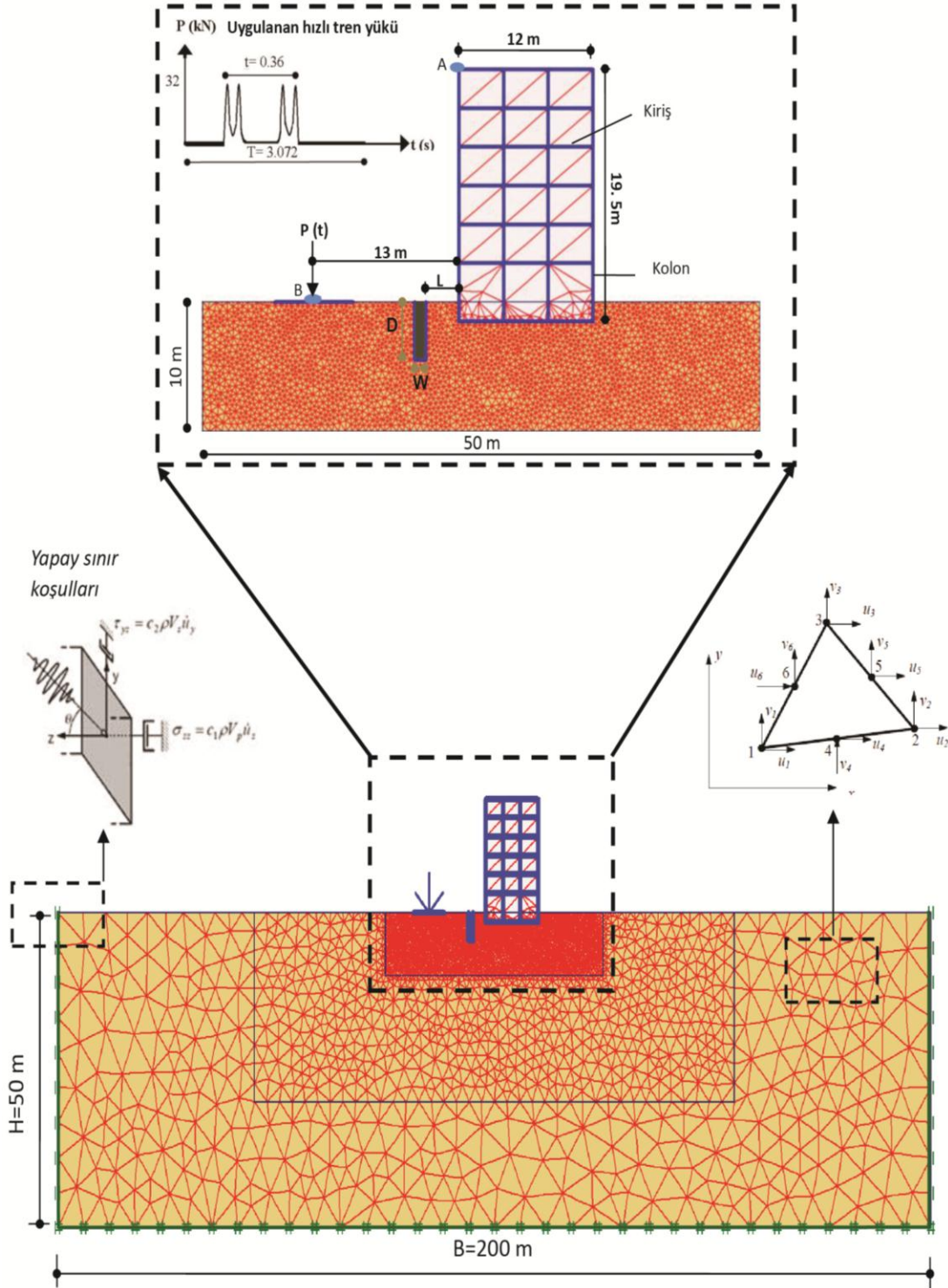
Dalga bariyerlerinin yalıtım performansı, tesis edileceği yere ve iç dolgu malzemesine göre kapsamlı parametrik çalışmalar yürütülerek araştırılmıştır. İçi dolu dalga bariyerleri için, beton gibi yerel zemin koşullarına göre daha rijit bir malzeme ve bentonit gibi yerel zemin koşullarına göre daha yumuşak malzemelerin yalıtım etkileri incelenmiştir.

Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar grafikler halinde karşılaştırmalı olarak verilerek yorumlanmıştır.

#### **4.2.1. Tek düşey dalga bariyeri**

Yapılan çalışmanın bu kısmında, tek düşey dalga bariyer modelinin içi boş ve farklı yoğunluktaki malzemelerle doldurulması gibi birçok değişkenin dalganın perdelenmesine etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.25’de tek düşey dalga bariyerini içeren yapı-zemin sonlu eleman ayrıklaştırılması gösterilmiştir. Burada  $D$  bariyer derinliğini,  $W$  bariyer genişliğini ve  $L$  ise bariyerin binadan uzaklığını ifade etmektedir.

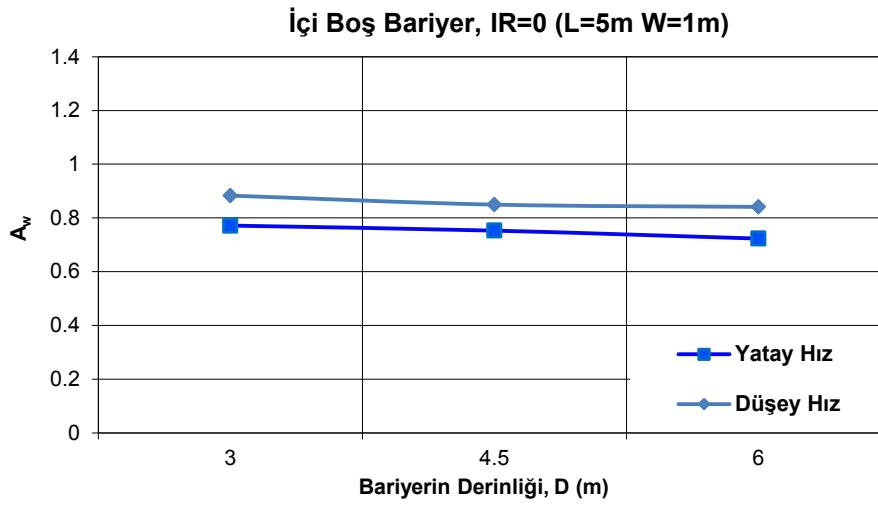
Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktası olarak yerdeğiştirmelerin maksimum düzeyde beklendiği demiryolu üstyapısının alt tabanı ( $B$  noktası) ve binanın çatı katı düzeyi ( $A$  noktası) seçilmiştir. Titreşim etkilerini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla bina demiryolu üstyapısından  $l=13m$  uzaklıkta olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 4.25).



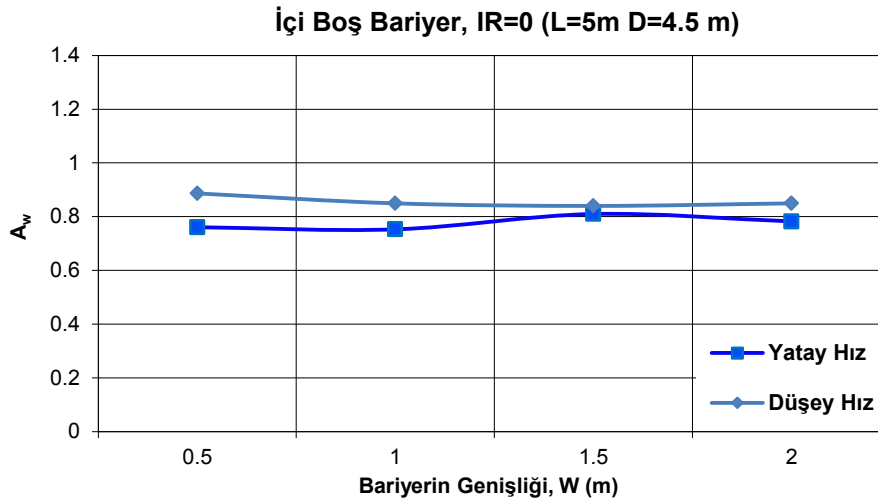
Şekil 4.25. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için düşey dalga bariyer modeli

#### 4.2.1.1. İçi boş durum

İlk olarak, yükün uygulandığı demiryolu üstyapısı ile korunacak yapı arasına yerleştirilen içi boş titreşim azaltıcı düşey dalga bariyerinin derinlik ( $D$ ) ve genişlik ( $W$ ) gibi optimum boyutlarının belirlenmesi amacıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafikler halinde verilmiştir (Şekil 4.26).



(a)



(b)

Şekil 4.26. Dalga engelleyici içi boş düşey bariyerin  
(a) derinlik ve (b) genişliğine bağlı dalga perdeleme oranı

Başlangıç durumu için konumlandırılan bariyerin genişlik boyutu literatür verilerine bağlı arazi sonuçlarından elde edilmiştir (Çelebi vd., 2009). Dinamik yük kaynağından  $l=13m$  uzaklıktaki üstyapıya ait yatay ve düşey hız genliklerine bağlı elde sayısal sonuçlara göre en iyi yalıtımın  $D=6m$  derinlik için olduğu tespit edilmiş fakat  $D=4.5m$  derinlik için elde edilen azaltma oranları ile karşılaştırıldığında çok büyük bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Dalga perdeleyici olarak önerilen çözümün geoteknik açıdan pratik anlamda inşası düşünüldüğünde en uygun derinliğin  $D=4.5m$  olmasına karar verilmiştir (Şekil 4.26a).

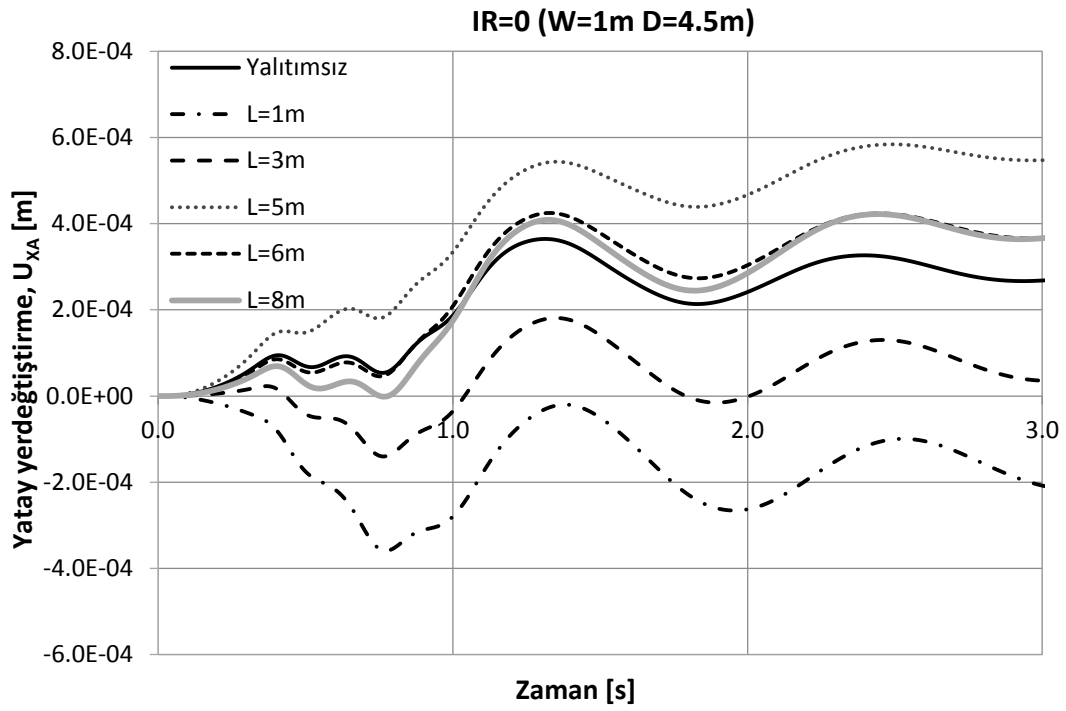
Bununla birlikte, yüksek hızlı tren trafiğinin binalarda oluşturduğu yüksek frekanslı titreşimlerin yalıtımında en iyi performans gösteren optimum genişlik  $W=1m$  olarak alınmıştır (Şekil 4.26b).

Çalışmanın bu aşamasında, dinamik yük kaynağının ürettiği titreşimlerin yayılmasını önlemek (aktif yalıtım) veya titreşim kaynağından gelen dalgaların korunacak yapıya ulaşmasına engel olmak (pasif yalıtım) için kullanılacak olan optimum dalga bariyerinin, tesis edileceği yeri belirlemek amacıyla kapsamlı nümerik analizler yapılmış ve sonuçları grafikler halinde verilmiştir. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçişine bağlı olarak elde edilen grafiklerden,  $L=3m$  için elde edilen yalıtım oranı %50-55 civarında iken, bu performans  $L=1m$  için %90-95'e kadar çıkmaktadır. Düşey dalga bariyeri korunacak yapıdan uzaklaştırıldıkça dalgayı perdeleme etkisinin olmadığı görülmüştür (Şekil 4.27a).

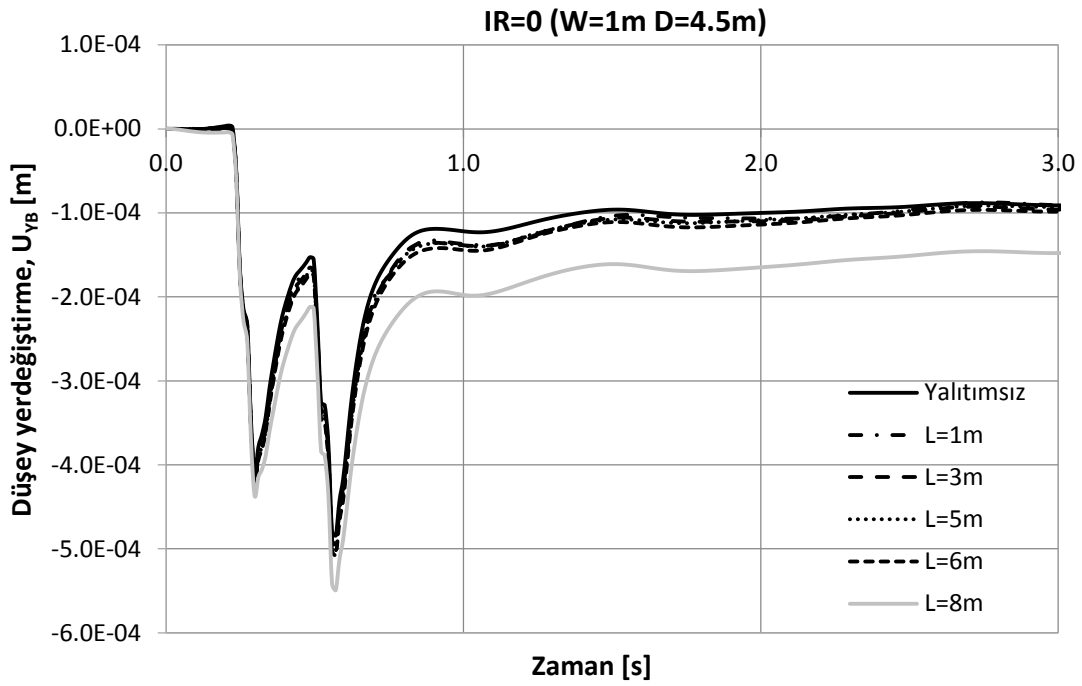
Gerçekleştirilen tüm sayısal uygulamalar dalga bariyerlerinin varlığının demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede etkilemediğini göstermiş olup, sadece aktif yalıtım durumunda ( $L=8m$ ) titreşim etkilerinin az bir oranda büyüttüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.27b).

Tez kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda, pasif yalıtım durumu ( $L=1m$ ) için düşey dalga bariyerin içinin boş olması ( $IR=0$ ) durumunda, titreşim kaynağından yayılan dalgaları kırarak veya yansıtarak etkili bir azaltma gösterdiği, yalıtımsız duruma göre üst yapı titreşim etkilerini %90-95 gibi önemli oranda azalttığı gözlemlenmiştir.





(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçişi



(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin zaman geçişi

Şekil 4.27. Dalga engelleyici düşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi  
(içi boş bariyer)

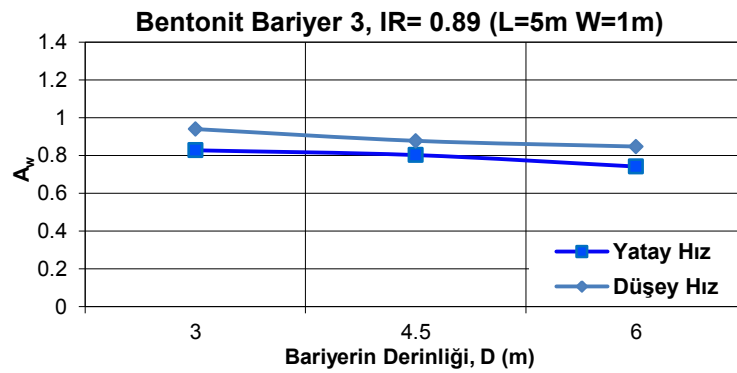
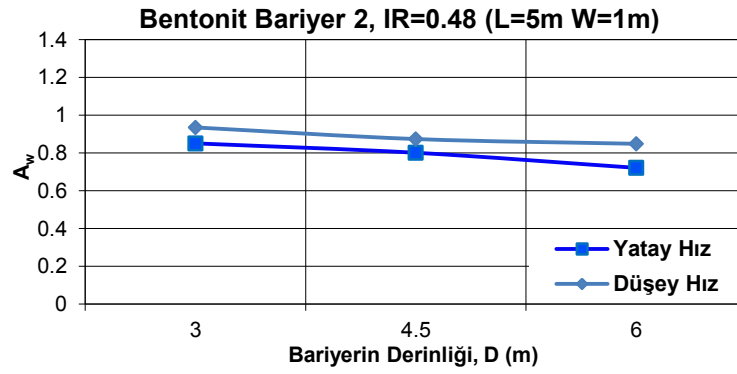
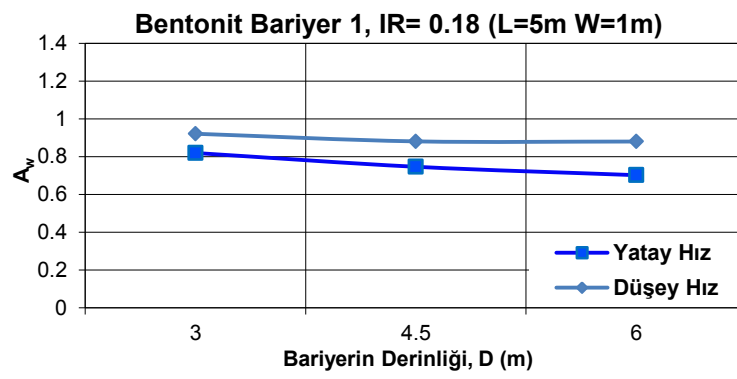
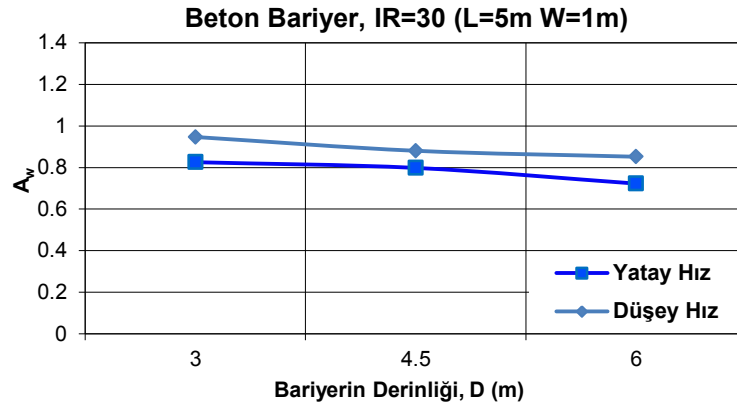
#### 4.2.1.2. İçi dolu durum

Titreşim azaltıcı düşey dalga bariyerinin içi beton (rijit bariyer) veya bentonit (esnek bariyer) ile doldurulması durumunda derinlik ( $D$ ) ve genişlik ( $W$ ) gibi optimum boyutlarının belirlenmesi amacıyla kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Titreşim genliklerinin azaltılmasında beton bariyer (Tablo 4.1) ve esnek bariyer olarak kullanılan bentonit malzemelerinin özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Bentonit malzemesi özellikleri (Adam ve Estorff, 2004)

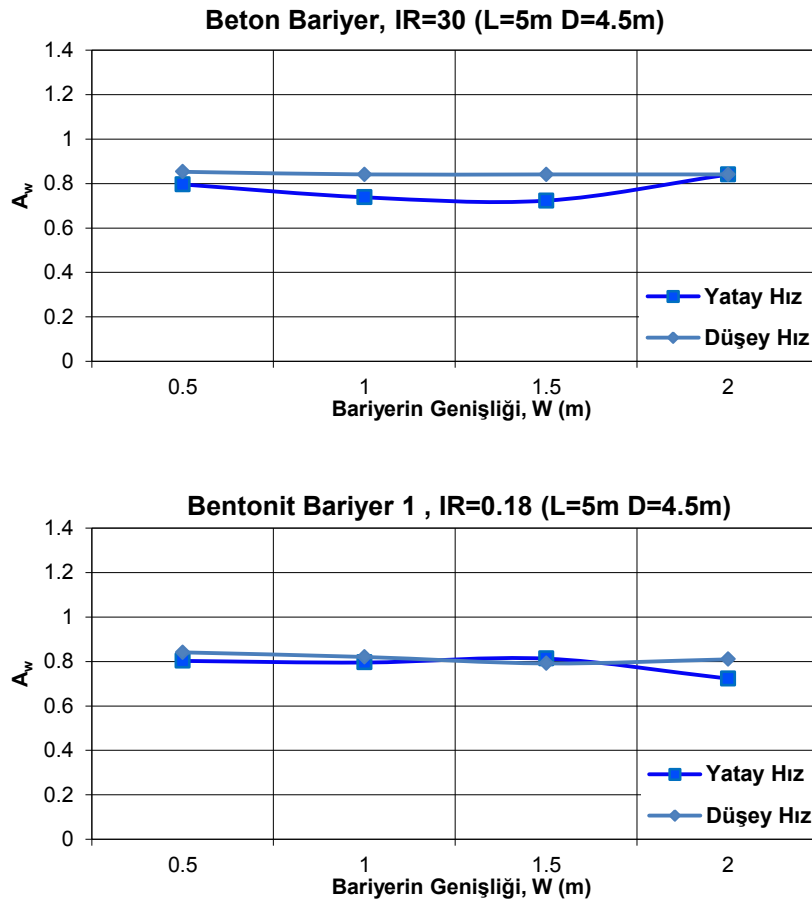
Karakteristik özellik	Sembol	Birim	Büyükük
Birim hacim ağırlık	$\gamma$	( $kN/m^3$ )	değişken (12, 16, 20)
Yoğunluk	$\rho$	( $Mg/m^3$ )	değişken (1.22, 1.63, 2.03)
Elastisite modülü	$E$	( $kPa$ )	değişken (2700, 15322, 46980)
Rayleigh sönüm katsayıları	$\alpha, \beta$	-	0.01
Poisson oranı	$\nu$	-	değişken (0.25, 0.33, 0.45)
Arayüz dayanım azaltma faktörü	$R_{inter}$	-	0.67

Farklı yoğunluklara sahip bentonit malzemelerinin zemine göre tanımlanan empedans oranları sırasıyla  $IR=0.18$  ( $\gamma = 12 kN/m^3$ ),  $IR=0.48$  ( $\gamma = 16 kN/m^3$ ) ve  $IR=0.89$  ( $\gamma = 20 kN/m^3$ ) olarak hesaplanmıştır. Üstyapı-zemin ortak sisteminin sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözümü sonucunda bina tepe noktasında meydana gelen yatay ve düşey hız genliklerinden elde edilen azaltma oranları Şekil 4.28-4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.28. Dalga engelleyici içi dolu düşey bariyerin derinliğine bağlı dalga perdeleme oranı

Şekil 4.28'deki grafiklerden, düşey bariyerin derinliği artırıldıkça, dinamik yüklemelere bağlı oluşan titreşim dalgalarının genliğini azaltıcı etki gösterdiği görülmüştür. Burada dikkati çeken önemli bir nokta, dalga bariyerlerinin perdeleme oranları için tüm malzemelerin birbirine benzer yapısal davranış gösterdiğidir. Bu nedenle, bariyerin en uygun genişliğini ( $W$ ) bulmak amacıyla yapılan sayısal analizler, sadece beton ve yoğunluğu  $IR=0.18$  olan bentonit malzemesiyle doldurulmuş hendek bariyerler için yapılmıştır. Bariyerin farklı genişliklerine bağlı olarak binada elde edilen yatay ve düşey hız azaltma oranlarından, hendek tipi bariyer genişliğinin dalga perdelemesine çok fazla etki etmediği gözlenmiştir (Şekil 4.29). Mühendislik olarak önerilen çözümün ekonomik boyutu ve yoğun yerleşim bölgelerinde pratik anlamda uygulama kolaylığı düşünüldüğünde, içi dolu rijit ve esnek bariyerler için optimum geometrik boyutlar bariyer derinliği  $D=4.5m$  ve genişliği de  $W=1m$  olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 4.29. Dalga engelleyici içi dolu düşey bariyerin genişliğine bağlı dalga perdeleme oranı

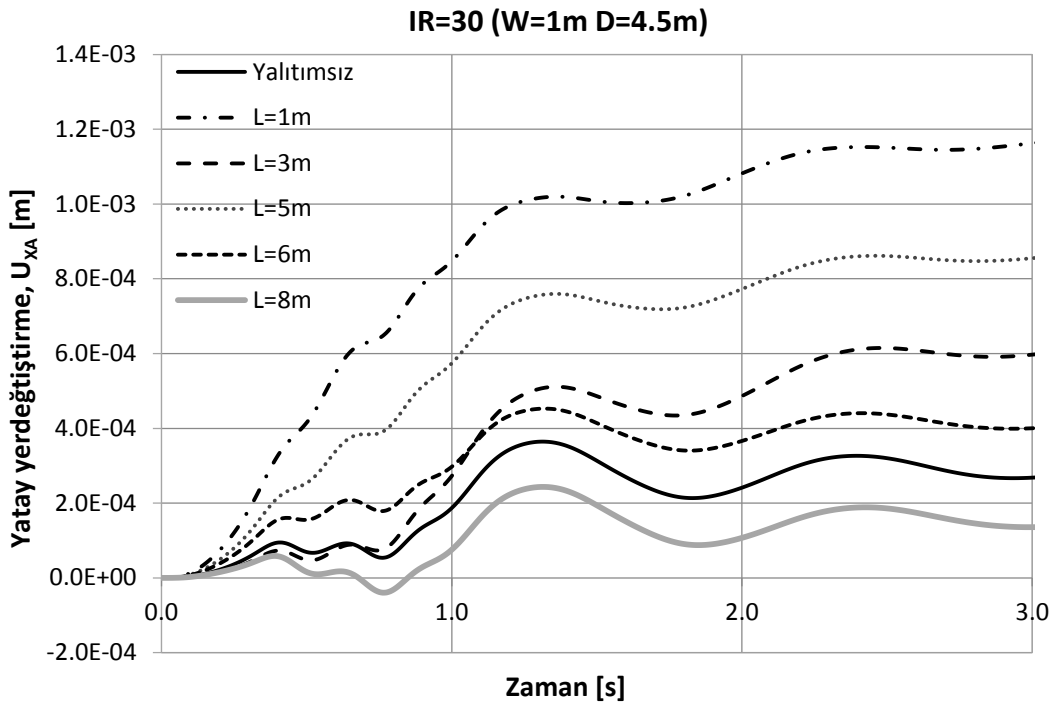
Yapı ile zeminin ortak davranışını doğrudan dikkate alan sonlu eleman modeli üzerinde, optimum boyutlar kullanılarak inşa edilen rijit ve esnek dalga bariyerlerinin titreşim kaynağının yakınına konulması (aktif yalıtım) veya korunacak yapının yakınında yer alması (pasif yalıtım) durumları için kapsamlı nümerik analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda seçilmiş ölçüm noktalarındaki titreşim düzeyleri çeşitli kontrol parametrelerine bağlı ayrı ayrı elde edilerek karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Şekil 4.30-4.33). Şekil 4.30-4.33'ün pratiğe dönük sonuçları ve önemli karakteristikleri aşağıda özetlenmiştir:

(1) Yük kaynağından zemine oradan da yapıya iletilen titreşimlerin dalga yayılım davranış biçimleri genel olarak yalıtımlı ve yalıtımsız zemin koşulları için benzerlik göstermektedir.

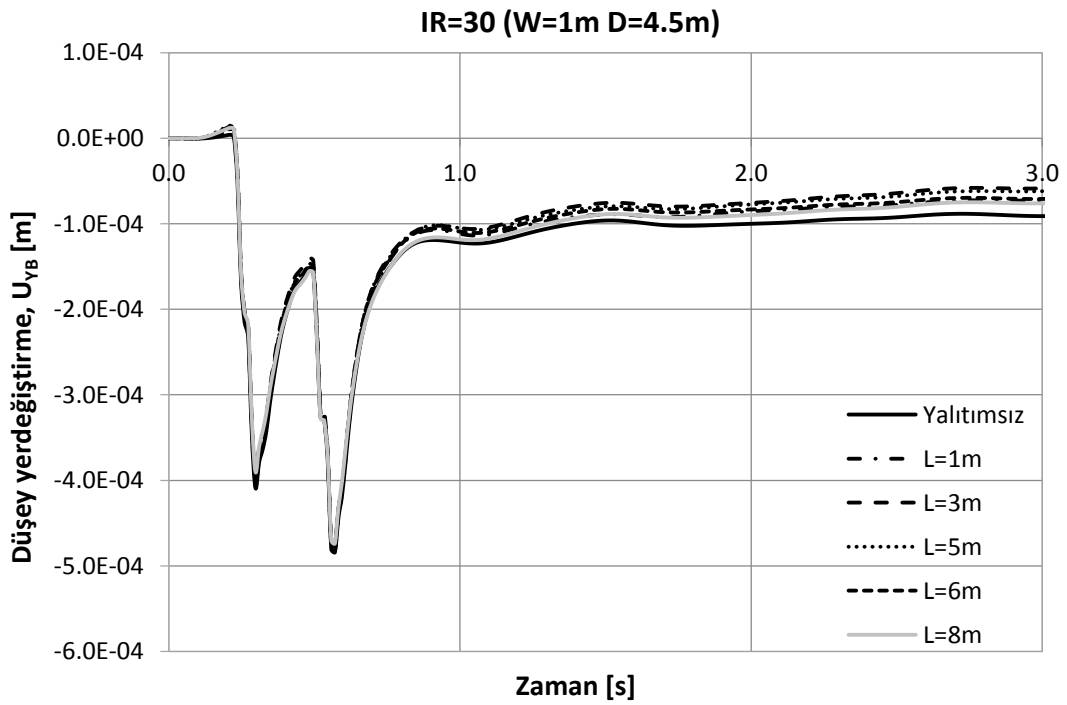
(2) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişine bağlı olarak elde edilen grafiklerden, içi dolu hendek tipi bariyerlerin tümünde yalıtım sadece aktif durum ( $L=8m$ ) için elde edilmiştir. Burada dalga yayılımının yüzeysel olması sebebiyle, yalıtım uygulanmış yapıdaki etkileri daha belirgin bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Düşey dalga bariyeri korunacak yapıya yakınlaştıkça dalgayı perdeleme etkisinin olmadığı görülmüştür.

(3) Sonuçlar yalıtım performansı açısından değerlendirildiğinde, en iyi yalıtımın düşük yoğunluklu bariyer ( $IR=0.18$ ) için %45 civarında olduğu tespit edilmiş olup, beton ( $IR=30$ ) ve daha yüksek yoğunluklu bariyerler ( $IR=0.48$  ve  $IR=0.89$ ) için bu oran %35 olarak bulunmuştur. Genel anlamda, dalga yayılma hızlarının birbirine eşdeğer olduğu ve sinüzoidal yapının tüm uygulamalar için bozulmadığı gözlemlenmiştir.

(4) Aktif ve Pasif yalıtım durumuna ait gerçekleştirilen tüm sayısal uygulamalar dalga bariyerlerinin varlığının demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede etkilemediğini göstermiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, aktif yalıtım durumu ( $L=8m$ ) için düşey dalga bariyerin rijit ve esnek olması durumunda, titreşim kaynağından yayılan dalgaları kırarak veya yansıtarak üst yapı titreşim etkilerini belli oranlarda azalttığı görülmüştür.

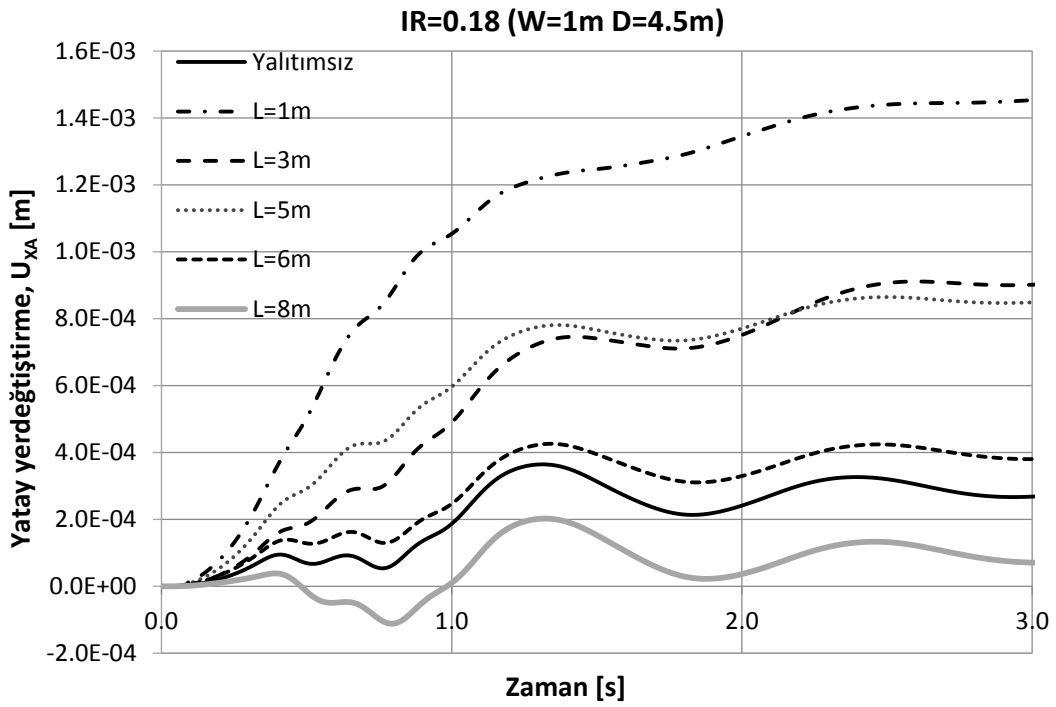


(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

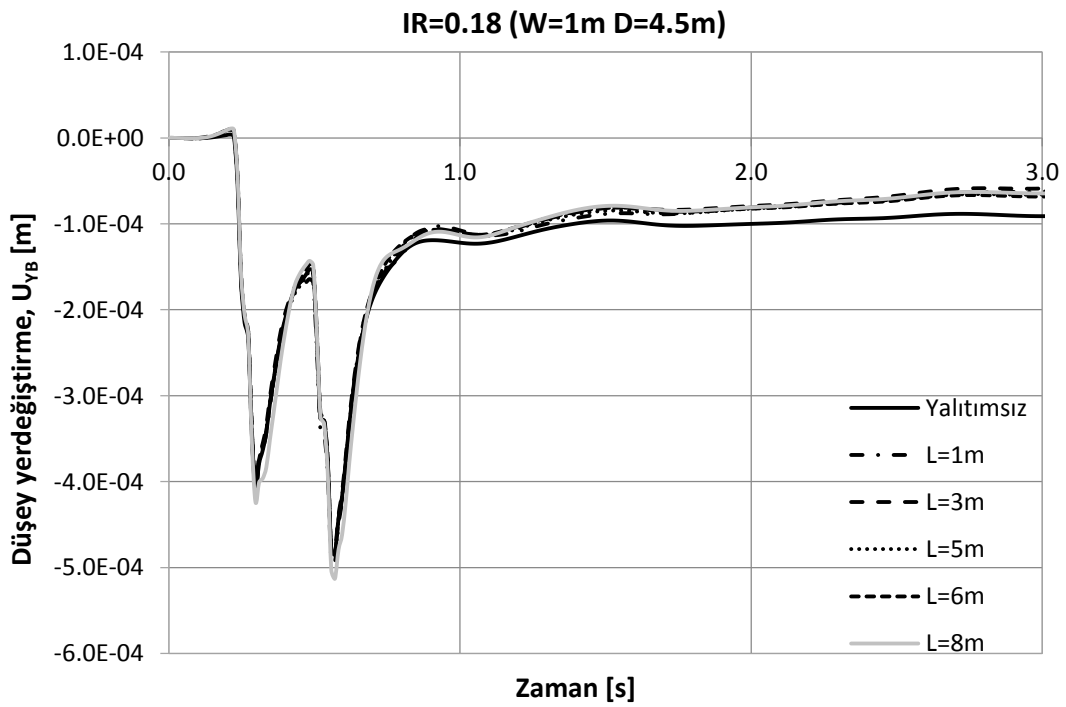


(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

Şekil 4.30. Dalga engelleyici düşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi (beton bariyer)

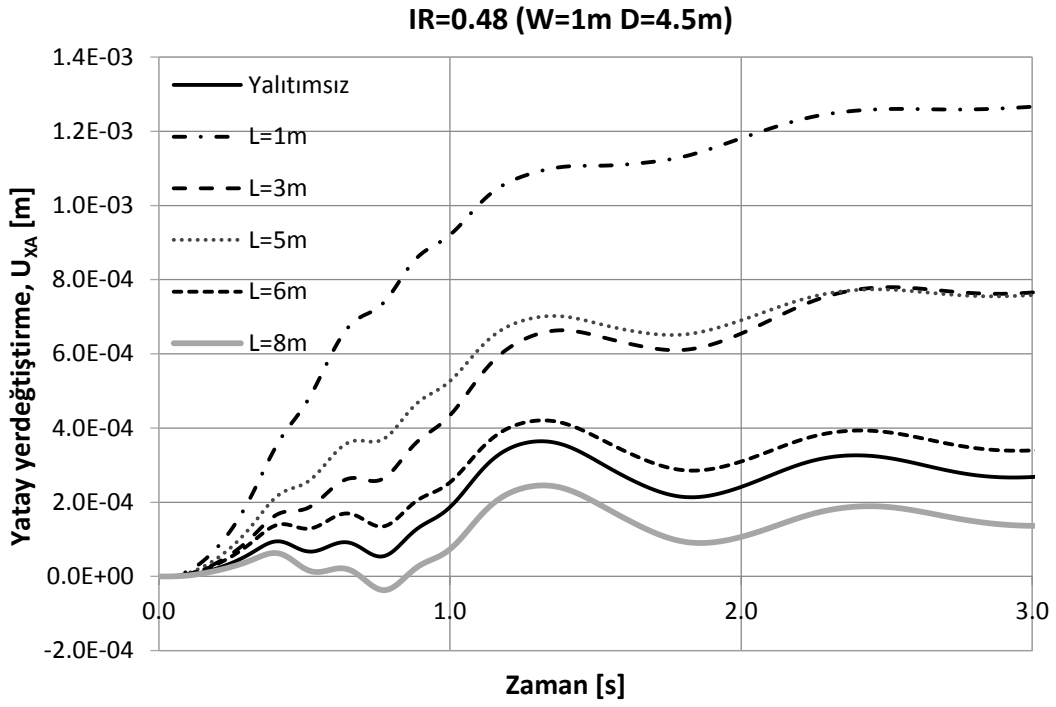


(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

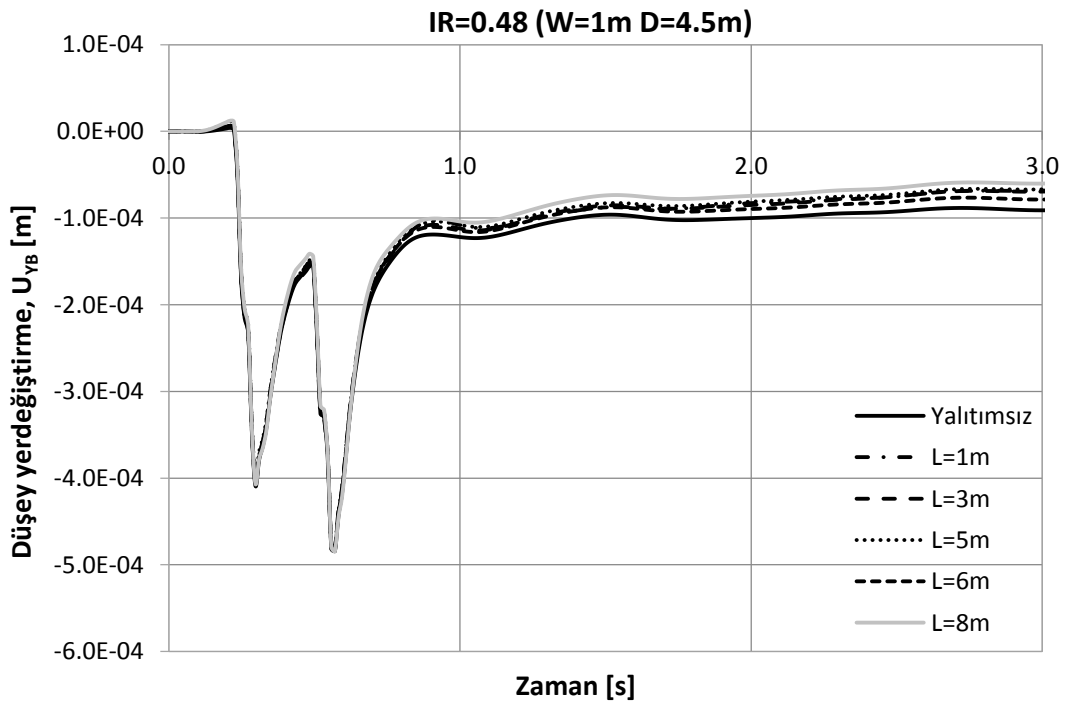


(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

Şekil 4.31. Dalga engelleyici düşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi  
(bentonit bariyer 1)



(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

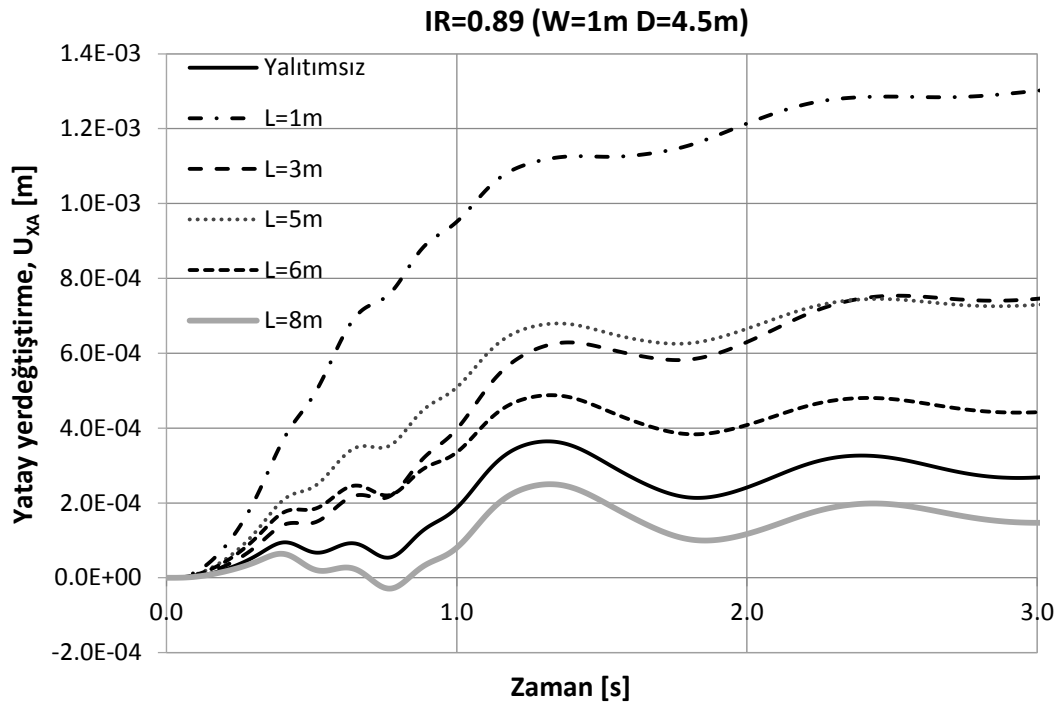


(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

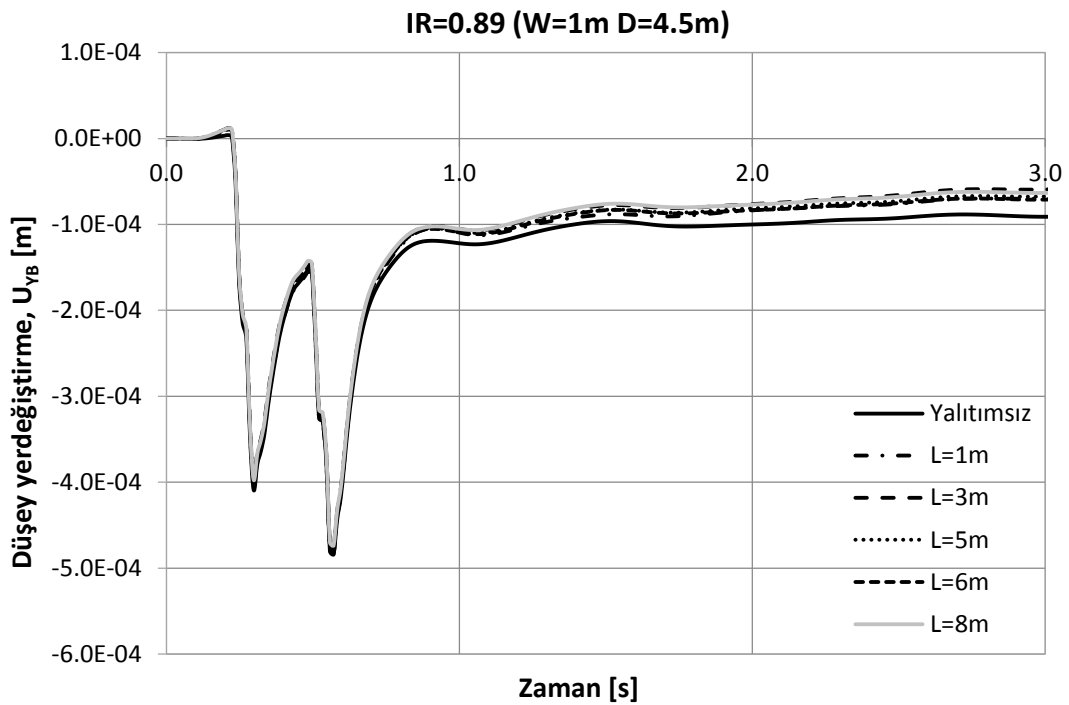
Şekil 4.32. Dalga engelleyici düşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi

(bentonit bariyer 2)





(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi



(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

şekil 4.33. Dalga engelleyici düşey bariyerin yapıdan olan uzaklığının yerdeğiştirme-zaman ilişkisi

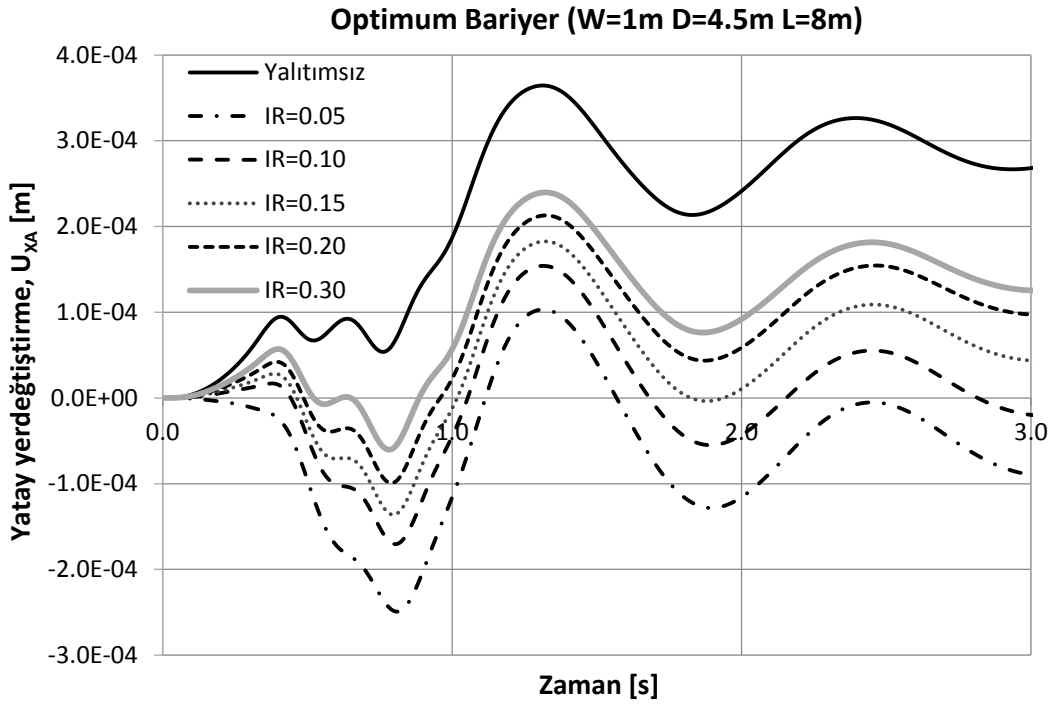
(bentonit bariyer 3)

Aktif yalıtım durumunda optimum dalga bariyer boyutları kullanılarak önerilen çözümün yalıtım etkisini artırmak için, malzeme yoğunluk kontrastının ( $IR$ ) dalga yayılışına etkileri incelenmiştir. Dinamik yük kaynağından  $l=13m$  uzaklıktaki bina tepe noktası yatay ve demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmelerin uygulanan farklı empedans oranlarına  $0.05 \leq IR \leq 0.30$  bağlı zaman geçmişleri Şekil 4.34’de verilmiştir.

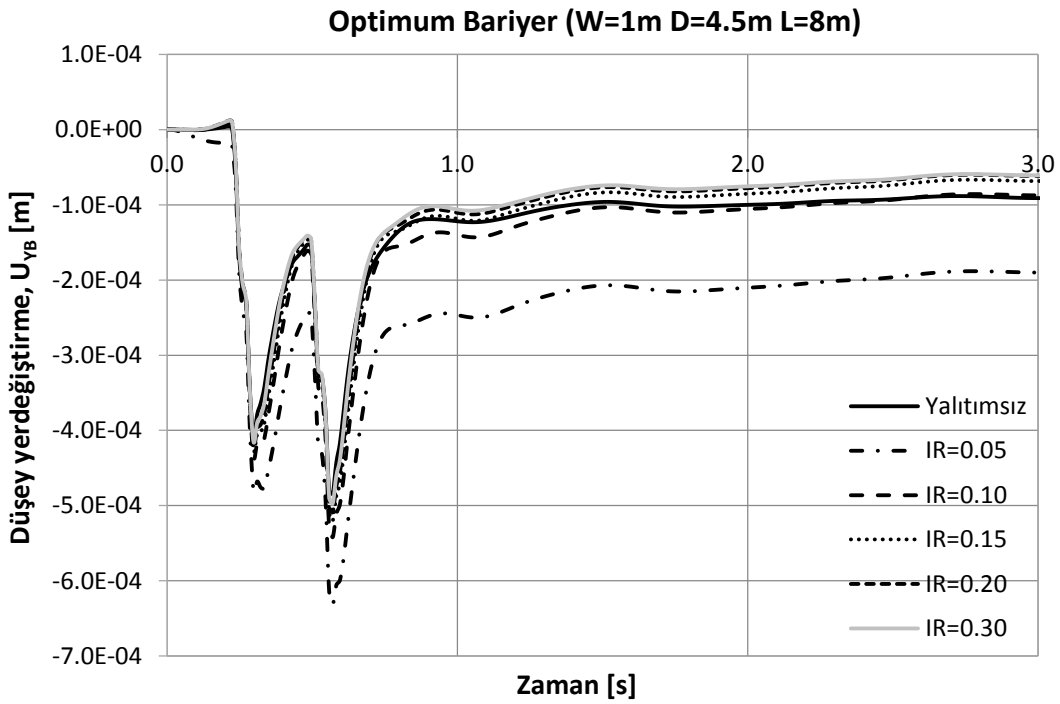
Grafiklerden, yalıtım aracında kullanılan malzemenin, bariyere çarpan dalgalarda farklı türlerde yansımalara, kırılmalara ve saçılmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Tüm bariyer uygulamaları için yalıtım etkisi gözlenmiş olup, en iyi performans  $IR=0.05$  için %70-75 civarındadır. Bariyerin içine doldurulan malzemenin titreşim enerjisini tkietme kapasitesi, malzemenin yoğunluk kontrastına bağlı olarak;  $IR=0.10$  için %60,  $IR=0.15$  için %50 oranlarında olduğu gözlemlenmiştir. Bunun bir sonucu olarak, hendek tipi bariyerlerde kullanılan malzemenin yoğunluğu azaldıkça bina titreşimlerinde elde edilen yalıtım performansının arttığı söylenebilir. Gerçekleştirilen tüm sayısal uygulamalar dalga bariyerlerinin varlığının demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede etkilemediğini göstermiş olup, sadece  $IR=0.05$  empedans yoğunluğu için titreşim etkilerinin az bir oranda büyüttüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.34).

Yapılan araştırmalar sonucunda, aktif yalıtım durumu ( $L=8m$ ) için düşey dalga bariyerin iinin farklı yoğunluk kontrastına sahip malzeme ile doldurulması durumunda, titreşim kaynağından yayılan dalgaları kırarak veya yansıtarak etkili bir azaltma gösterdiği, yalıtımsız duruma göre st yapı titreşim etkilerini önemli oranda azalttığı grlmştir.

Burada dikkati çeken diğer bir husus ise, ölüm noktasıyla dalga bariyeri arasındaki mesafenin dalga yayılımını önemli lde etkilediğidir. Zemin titreşimlerini makul düzeyde azaltabilmek için bu uzaklığın Rayleigh dalga boyunun en az iki katından fazla olması gerekmektedir olup, mesafenin yetersizliğinden dolayı bariyer ile korunacak yapı arasında kuvvetli dalga etkileşimleri, yıkıcı dalga girişimlerinden kaynaklanmaktadır.



(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğıştirmesinin zaman geçmişı



(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğıştirmesinin zaman geçmişı

Şekil 4.34. Dalga engelleyici düşey bariyerin farklı empedans oranlarına bağlı yerdeğıştirme-zaman ilişkisi

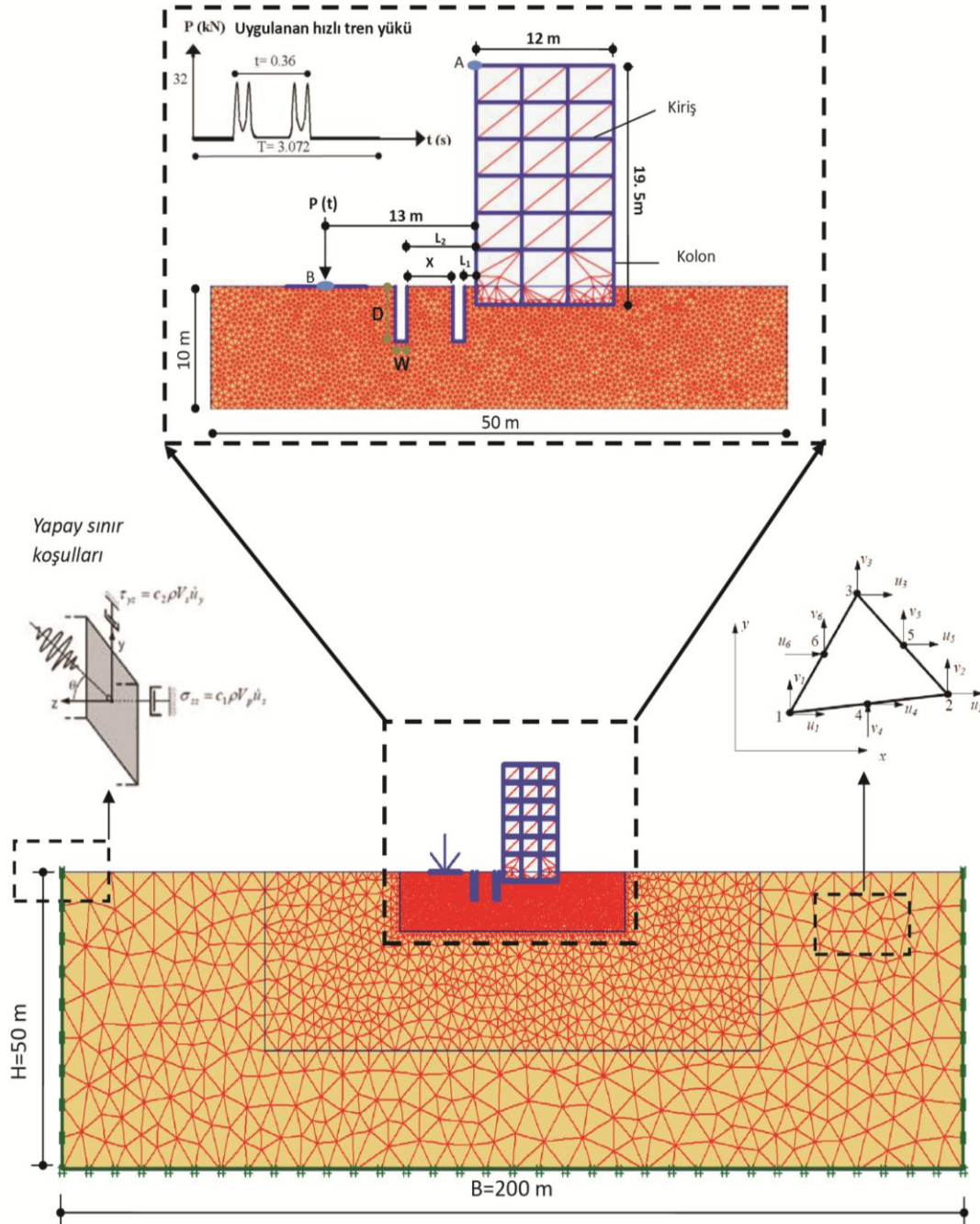
#### 4.2.2. Ardışık düşey dalga bariyer düzeneği

Çalışmanın bu bölümünde, ikili ve üçlü düşey dalga bariyer modelinin içi boş ve farklı yoğunluktaki malzemelerle doldurulması gibi birçok değişkenin dalganın perdelenmesine etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.35’de ikili düşey dalga bariyerini içeren yapı-zemin sonlu eleman ayrıklaştırılması gösterilmiştir. Burada, hendek tipi dalga engelleyicinin analizlerde öngörülen optimum geometrik boyutları, daha önce tespit edildiği üzere derinlik  $D=4.5m$  ve genişlik  $W=1m$  olacak şekilde alınmıştır. Birinci dalga bariyeri korunacak yapıdan ( $L_1$ ), ikinci dalga bariyeri ise ( $L_2$ ) uzaklığında olacak şekilde matematik model oluşturulmuştur. Hendek tipi düşey dalga bariyerleri arasındaki mesafe ( $X$ ), ikinci bariyerin konumlandırıldığı farklı mesafeler için  $1m \leq X \leq 6m$  arasında farklı değerler almaktadır. Daha önceki nümerik çalışmalara benzer olarak, sonlu eleman analizlerinde gözlem noktası olarak yerdeğiştirmelerin maksimum düzeyde beklendiği demiryolu üstyapısının alt tabanı ( $B$  noktası) ve binanın çatı katı düzeyi ( $A$  noktası) seçilmiştir. Titreşim etkilerini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla, bina demiryolu üstyapısından  $l=13m$  uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.35).

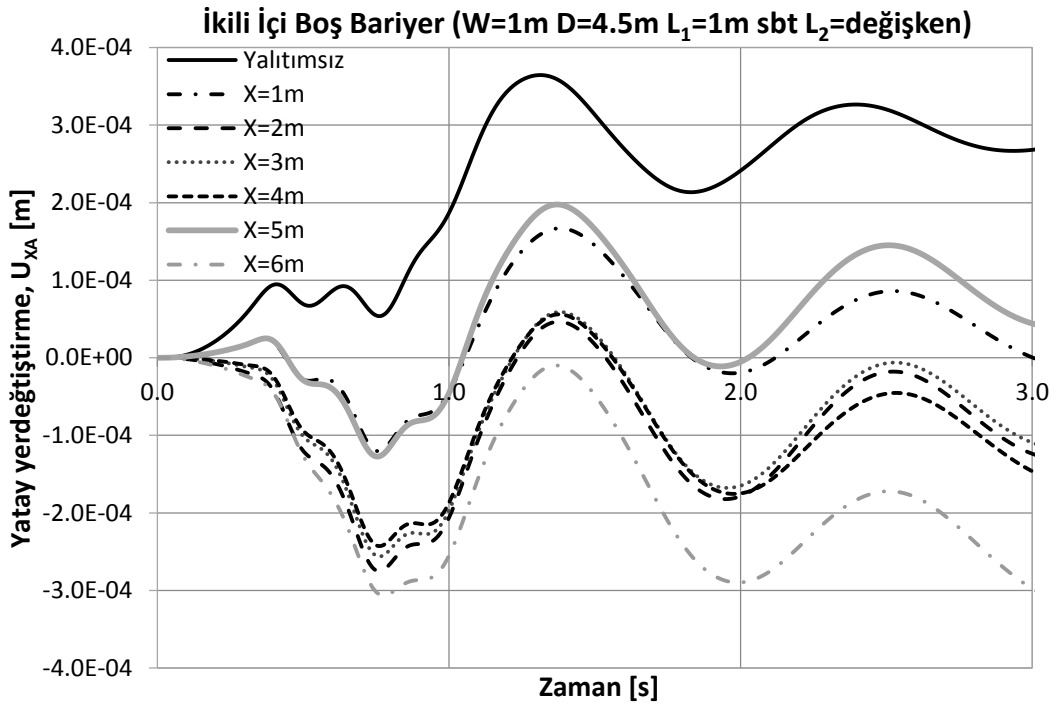
Sayısal uygulamalarda, birinci dalga bariyerinin korunacak yapıdan uzaklığı  $L_1=1m$  sabit alınarak, ikinci dalga bariyeri üstyapıdan farklı mesafelere  $3m \leq L_2 \leq 8m$  yerleştirilerek aktif ve pasif yalıtım durumları birlikte değerlendirilmiştir. Titreşim azaltıcı ardışık düşey dalga bariyer düzeneğinin içi boş olması ( $IR=0$ ) ve farklı yoğunluklardaki malzemelerle dolu olması  $0.05 \leq IR \leq 30$  için kapsamlı nümerik analizler yapılmıştır.

Gerçekleştirilen çözümler sonucunda, ikili hendek tipi bariyer uygulamalarının içinin dolu olması durumunda yalıtım etkisi gözlenmemiştir. Buna karşın, Şekil 4.36’de içi boş ikili dalga bariyerleri ( $IR=0$ ) için verilen grafiklerden, binalarda oluşan titreşim etkilerinin önemli oranda azaltıldığı görülmektedir. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişine bağlı olarak elde edilen veriler neticesinde,  $L_2=3m$ ,  $L_2=5m$  ve  $L_2=6m$  için elde edilen yalıtım oranı %90 civarında iken, bu performans  $L_2=8m$  için %96’ya kadar çıkmaktadır. Bununla birlikte, dalga bariyerlerinin varlığı demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede

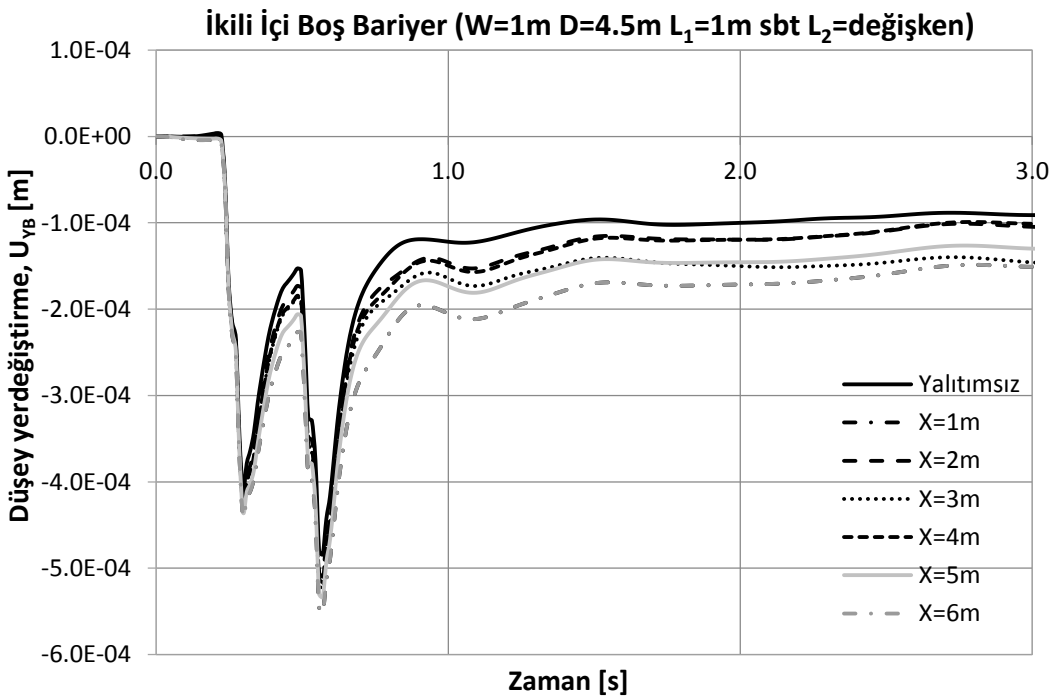
etkilememektedir (Şekil 4.36). Yapılan araştırmalar, içi boş hendeklerin aktif ve pasif yalıtım durumları ( $L_1=1m$  ve  $L_2=8m$ ) birlikte uygulandığında, bina titreşim etkilerini yalıtımsız duruma göre önemli oranda azalttığını göstermektedir.



Şekil 4.35. Üstyapı titreşimlerinin yalıtımı için ikili düşey dalga bariyer modeli



(a) Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi



(b) Demiryolu üstyapısı düşey yerdeğiştirmesinin zaman geçmişi

Şekil 4.36. Dalga engelleyici ikili düşey bariyerin farklı formasyonları için yerdeğiştirme-zaman ilişkisi

Geliştirilen sonlu elemanlar matematik modeli üzerinde ikili hendek bariyer uygulamaları için yalıtım performansının en iyi olduğu aktif ve pasif yalıtım

durumlarına ( $L_1=1m$  ve  $L_2=8m$ ) ilave olarak, üçüncü bir dalga bariyeri korunacak yapıdan farklı mesafelere ( $L_3=3m$ ,  $L_3=5m$  ve  $L_3=6m$ ) yerleştirilerek bina ve demiryolu üstyapısı titreşimleri incelenmiştir. Burada her üç bariyerin içi boş ve farklı rijitliklerde malzeme ile dolu olması durumları için kapsamlı nümerik analizler yapılmıştır. İçi dolu bariyerler için uygulanan tüm çözümler sonucunda yalıtım etkisine rastlanmamıştır. Ancak, her üç bariyerin içi boş olması durumunda ( $IR=0$ ) farklı oranlarda yalıtım performansları elde edilmiştir. En iyi yalıtım, dalga bariyerlerinin  $L_1=1m$ ,  $L_2=8m$  ve  $L_3=5m$  olacak şekilde yerleştirilmesi ile %85 civarında oluşmaktadır.

Burada dikkati çeken önemli bir nokta, rijit olarak inşa edilen ikili ve üçlü bariyerlerin daha düşük yoğunluktaki esnek bariyerlere oranla %20 daha fazla büyütme etkisi göstermiş olduğudur. Bunun sebebi, titreşim kaynağından yayılan dalgaların yansıma mekanizmalarının yalıtım araçlarının dolgu malzemelerine göre farklılık göstermesi ve beton tipi rijit bariyerlere çarpan sismik dalgalarda daha güçlü bir şekilde yansıma, kırılma ve saçılma oluşmasıdır.

Gerçekleştirilen nümerik analizler sonucu, açık hendek uygulamasının gösterdiği performansa yakın sonuçlar veren ikili hendek tipi dalga engelleyicilerin yoğun yerleşim bölgelerinde pratik anlamda inşası düşünüldüğünde, mühendislik olarak önerilen çözüm, içi boş düşey dalga bariyer modelidir.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek-hızlı demiryolu ağlarının yoğun yerleşim bölgelerinden geçirilmesinden dolayı meydana gelen kuvvetli yüzey dalga yayılımının incelenmesi, çevre yapılarında hasar yapıcı ve insanlarda rahatsızlık verici titreşim etkilerinin azaltılması günümüzde inşaat mühendisliği açısından bu çalışmanın önemini ve gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Ülkemizde tren setlerinin yüksek seyahat hızlarıyla tekrarlı geçişleri sırasında zeminlerde ürettikleri yüksek frekanslı titreşimlerin çevre binalardaki dinamik etkilerinin araştırılması ve azaltılması konusunda yapı, geoteknik ve ulaştırma mühendisliği disiplinlerinin planladığı detaylı bir ortak çalışma henüz yapılmamıştır. Bu alanda kapsamlı ve yoğun araştırmaların gerekliliği özellikle ülkemizin taşıma gücü zayıf, alüvyon zemin ortamlarından geçirilen yüksek hızlı modern demiryolu hatları (Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesi) için güncelliğini korumaktadır. Bu çalışmanın en önemli özelliği ülkemizde ilk olarak yapılıyor olmasıdır. Mevcut araştırmaların sadece demiryolu üstyapı titreşimlerinin azaltılmasına yoğunlaşmış olması problemin geniş açıdan ve derinlemesine bakılmasına engel olmaktadır.

Doktora tezi olarak yapılan bu çalışma ile, titreşim problemlerini yerinde araştırmak üzere pahalı saha incelemelerine ve zaman alıcı arazi deney düzeneklerine gerek kalmadan, yapı-zemin dinamik etkileşim problemini temsil eden ve yüksek hız treninin geçişinden dolayı demiryolu üstyapısı ve altındaki zeminde oluşan dalga yayılımına karşılık gelen matematik model kullanılarak etkili çözümler sunulmuştur. Dinamik yük kaynağı olarak, Türkiye'nin yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılan lokomotiflerin  $V=250 \text{ km/h}$  geçiş hızına ait yük fonksiyonu kullanılmıştır.



Dalga yalıtım bariyerinin performansını değerlendirebilmek için geliştirilen sonlu eleman modeli, düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınmıştır. Sonlu eleman metodunun seçilmesinin başlıca nedeni, zeminin doğrusal olmayan davranışının kolay tanımlanabilmesidir. Literatürde deprem yer hareketi dışında hızlı trenler gibi yüksek frekansa sahip insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu problemler için yapılan sayısal analizlerde, araştırmacıların genel olarak tercih ettiği lineer elastik zemin ortamından farklı olarak, sonuçların tutarlılığı ve doğruluk düzeyi açısından zeminin doğrusal olmayan davranışını gerçeğe en yakın biçimde temsil etmek için Mohr-Coulomb yenilme kriteri altındaki elasto-plastik malzeme davranışı dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, problemin arazi koşullarını gerçeğe yakın biçimde temsil etmek amacıyla ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin sonsuzluğunu ifade eden geometrik sönümün ve malzeme sönümünün hesaba katıldığı nümerik çözüm tekniklerinin kullanımına imkan veren PLAXIS 2D dinamik modülü sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır.

Yüksek hızlı trenlerin  $V=250 \text{ km/h}$  seyahat hızı ile geçişi sırasında oluşturduğu büyük genlikli dalgaların yapılarda meydana getirdiği titreşim etkilerini azaltabilmek amacıyla, farklı tipteki yapay anakaya ve içi boş/dolu hendek tipi düşey dalga bariyer modelleri için kapsamlı parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar doğrultusunda elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a) Dalga engelleyici yapay taban kayanın aktif yalıtım durumu için en uygun model boyutları  $H_a=1.5m$ ,  $B_a=1m$  ve  $L_a=5m$  olarak tespit edilmiştir. Elde edilen optimum boyutlar kullanılarak oluşturulan içi boş bariyer modelinin ( $IR=0$ ) yalıtımsız duruma göre binalarda meydana gelen titreşim etkilerini %80 civarında azalttığı görülmüştür.
- b) Yapay taban kaya modelinin pasif yalıtım durumunda ise, en uygun bariyer boyutları  $H_a=2m$ ,  $B_a=0.5m$  ve  $L_a=12m$  ile imal edilen rijit dalga bariyeri ( $IR=30$ ) binanın en üst katı düzeyinde oluşabilecek titreşim etkilerini %90 civarında azaltmıştır. Söz konusu yalıtım performansı yarı-rijit bariyer modeli ( $IR=15$ ) için daha da artmakta olup, binalarda oluşan titreşim etkileri önemli derecede azalmıştır.

- c) Yapay anakaya uygulamasının aktif ve pasif yalıtım durumlarında mevcut demiryolu yatağı rijitliğinin önemli derecede azaltılmasıyla, yüksek hızlı tren yükünün demiryolu üstyapısında meydana getirdiği düşey titreşimlerde büyütme etkisi meydana gelmiştir. Bununla birlikte, demiryolu üstyapısı farklı rijitlik değerlerinin binanın dinamik davranışına olan etkileri değerlendirildiğinde, aktif yalıtım uygulamasının pasif yalıtıma oranla daha etkili olduğu anlaşılmıştır.
- d) Yüksek hızlı trenlerin çevre binalarda meydana getirdiği titreşim etkilerinin azaltılması konusunda, hendek tipi düşey dalga bariyerleri için gerçekleştirilen tüm sayısal çözümler, içi boş bariyer (açık hendek) uygulamalarının rijit, yarı-rijit veya farklı yoğunluk kontrastına sahip esnek dalga bariyer modellerine oranla daha etkili olduğunu göstermektedir. Pasif yalıtım durumunda ( $L=1m$ ) içi boş düşey dalga bariyeri ( $IR=0$ ) yalıtımsız duruma göre üst yapı titreşim etkilerini %90-95 gibi önemli oranda azaltmaktadır. Açık hendek uygulamasının gösterdiği performansa yakın sonuçlar veren ardışık düşey dalga bariyer düzeneğinin yoğun yerleşim bölgelerinde pratik anlamda inşası düşünüldüğünde, mühendislik olarak önerilen çözüm, içi boş düşey dalga bariyer modelidir.
- e) İçi dolu hendek tipi bariyerlerin tümünde, sadece aktif durum ( $L=8m$ ) için titreşim genlikleri azaltılarak, yalıtım uygulanmış yapıdaki etkileri daha belirgin bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi, dinamik yük kaynağına bağlı oluşan kuvvetli dalga yayılımının yüzeysel olmasıdır. Düşey dalga bariyeri korunacak yapıya yakınlaştıkça dalgayı perdeleme etkisinin olmadığı görülmüştür. Çünkü dalga engelleyicilerine çarpan sismik dalgaların zemin ortamında meydana getirdiği yansımalar ikincil etkileri oluşturmuş ve bariyer etkili olamamıştır.
- f) Dolgu malzemesi açısından rijit ve esnek olarak imal edilen içi dolu hendeklerin sergilediği yalıtım performansları açısından, bariyer yoğunluğunun önemli olduğu ve düşük empedans kontrastına sahip dalga engelleyicilerinin daha etkili olduğu görülmüştür.

- g) Yapay anakaya ve düşey dalga bariyer modelleri ile gerçekleştirilen aktif ve pasif yalıtım tedbirleri, demiryolu üstyapı titreşimlerini önemli derecede değiştirmemiştir.

Yüksek hız trenlerinin yerleşim bölgelerinden geçişi esnasında rahatsızlık verici titreşimlerin azaltılmasıyla ilgili uygun çözümlerin üretilmesi ve geliştirilen sayısal modellerin sunulması, bu özgün araştırmanın ulusal düzeyde uygulamaya dönük sonuçlarının katma değerini artıracaktır.

Bu araştırma kapsamında geliştirilen yapı-zemin-dalga bariyer sisteminin simülasyon modeli kullanılarak, dinamik yük kaynağının binalarda meydana getirdiği titreşim etkilerini azaltmak amacıyla farklı arazi koşullarına göre özel çözümler sunulabilir. Yüksek hızda hareket eden tren yüklerinin zeminlerde neden olduğu kuvvetli dalga yayılımı ve yapı-zemin dinamik etkileşim problemi için daha sonraki çalışmalarda 3D boyutlu modeller geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan zemin davranışı ve geometrik sönümünün hesaba katıldığı matematik model üzerinde yapılacak olan dinamik çözümlerle tabakalı zemin durumu ve yer altı suyunun dalga yayılımına etkileri araştırılabilir. Yapılan bu çalışma, gelecekte karşılaşılabilecek muhtemel olan titreşim problemleri için yapılması gerekenler hakkında ön bilgilendirme niteliğinde olup, yoğun yerleşim bölgelerinde alınacak efektif tedbirlerin tartışılmasına öncülük edecektir.

## **KAYNAKLAR**

ABOUDI, J., Elastic waves in half-Space with this Barrier, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 99 (1), 69–83, 1973.

ADAM, M., CHOUW, N. , Reduction of footing response to man-made excitations by using a wave impeding barrier, Journal of Applied Mech., 4, 423-431, 2001.

ADAM, M., PFLANZ, G., SCHMID, G., Two- and three-dimensional modelling of half-space and train-track embankment under dynamic loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19 (8), 559–573, 2000a.

ADAM, M., SCHMID, G., CHOUW, N., Investigation of ground motions and structural responses in near field due to incident waves, Proc. of 12th World Conference on Earthq. Eng., Auckland, New Zealand, pp.1313, 2000b.

ADAM, M., VON ESTORFF O., Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches, Computers and Structures, 83, 11–24. 2005.

AHMAD, S., AL-HUSSAINI, T.M., Simplified design for vibration screening by open and infilled trenches, Journal of Geotechnical Engineering, 117 (1), 67-88, 1991.

AHMAD, S., AL-HUSSAINI, T.M., FISHMAN, K.L., An investigation on active isolation of machine foundations by open trenches, Journal of Geotechnical Engineering, 122(6), 454-461, 1996.

AL-HUSSAINI, T.M., Vibration isolation by wave barriers, Ph. D. Dissertation, State University of New York at Buffalo, USA, 1992.

AL-HUSSAINI, T.M., AHMAD, S., BAKER L.M., Numerical and experimental studies on vibration screening by open and in-filled trench barriers, Wave2000, pp. 241-250, Chouw&Schmid, Balkema, Rotterdam, 2000.

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

AMICK, H., GENDREAU, M., Construction vibrations and their impact on vibration sensitive facilities, ASCE Construction Congress 6, Orlando, Florida USA, 2000.

ANDERSEN, L., NIELSEN, S.R.K., Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 701–716, 2005.

ARSLAN, G., Yalnız çekme donatılı betonarme kirişte sonlu eleman boyutunun yük taşıma kapasitesi tahminine etkisinin Drucker-Prager ve çatlak modelleri ile karşılaştırılması, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 2004/3, 34-42, 2004.

AUERSCH, L., The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks, *Journal of Sound and Vibration*, 310, 587-607, 2008.

AYDINOĞLU, M.N., Zayıf zeminlerde yapılan binalarda dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi için uygulamaya yönelik bir hesap yöntemi, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Rapor No:2011/1, Mayıs 2011.

BAKER, J. M., An experimental study on vibration screening by in-filled trench barriers., M. S. Thesis, State University of New York at Buffalo, USA, 1994.

BARBER, J.R., Surface Displacements due to a Steadily Moving Point Force, *J. Appl. Mech.*, 63, 245–251, 1996.

BARKAM, D.D., Dynamics of Bases and Foundations, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1962.

BESKOS, D.E., DASGUPTA, G., VARDOULAKIS, I.G., Vibration isolation using open or filled trenches part 1: 2-D homogeneous soil, *Comput. Mech.*, 1(1), 43–63, 1986.

BODE, C., HIRSCHAUER, R., SAVADIS, S.A., Soil–structure interaction in the time domain using half-space green's functions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (4), 283–295, 2002.

BORESI, A.P., SCHMIDT, R.J., SIDEBOTTOM, O.M., Advanced mechanics of materials, 5th edition, John Wiley&Sons, New York, NY, 1993.

BORJA, I.R., CHAO, Y.H., MONTA, J.F., LIN, H.C., SSI effects on ground motion at lotung LSST site, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, 760-770, 1999.

BORMANN, P., ENGDAHL, B., KIND, R., Seismic wave propagation and earth models, In P. Bormann (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum (GFZ), 2009.

BRIEN, J.O., RIZOS., D.C., A 3D BEM-FEM methodology for simulation of high speed train induced vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 289-301, 2005.

BRINGREVE, R. B. J., AL-KHOURY, R., BAKKER, K. J., BONNIER, P.G., BRAND, P.J.W., BROERE, W., BURD, H.J., SOLTYS, G., VERMEER, P. A., HAAG, D. D. Plaxis finite element code for soil and rock analyses, Published and distributed by A.A. Balkema Publisher, The Netherlands, 2002.

BUONSANTI, M., CIRIANNI, F., LEONARDI, G., SANTINI, A., SCOPELLITI, F., Mitigation of railway traffic induced vibrations: the influence of barriers in elastic half space, Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Acoustics and Vibration*, 2009.

CALAYIR, Y., KARATON, M., Kemer barajların Drucker-Prager yaklaşımı kullanılarak lineer olmayan dinamik analizi, *İMO Teknik Dergi*, 3085-3103, Yazı 207, 2004.

CHEN, W.F., HAN, D.J., *Plasticity for structural engineers*, Springer-Verlag New York Inc. 1988.

CHOUW, N., PFLANZ, G., Impediment of wave propagation from a moving source via the subsoil into the building, *Wave 2003*, Chouw&Schmid, Balkema, pp. 101-111, Rotterdam, 2003.

CHOUW, N., LE, R., SCHMID, G., Propagation of vibrations in a homogeneous soil-analysis in the frequency domain using the boundary element method, *Bauingenieur*, 65, pp. 399-406, 1990.

CHOUW, N., Wave propagation from the source via the subsoil into the building, *Proceedings of the 1st. International Workshop Wave'94 and Reduction of Vibrations*, Berg-Verlag GmbH, Bochum, pp. 33-46, 1994.

CHOUW, N., LE, R., SCHMID, G., Propagation of vibration in a soil layer over bedrock, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 8(3), 125-131, 1991.

CHOUW, N., SCHMID, G., Numerical and experimental investigation on wave impediment in soil, *Proceedings of the Fourth European Conference on Structural Dynamics EURO-DYN'99*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 977-982, 1999.

COOK, R.D., YOUNG, W.C., *Advanced mechanics of materials*, 1st edition, Macmillan, New York, NY, 1985.

COURANT, R., FRIEDRICHS, K., LEWY, H., On the partial difference equations of mathematical physics, *IBM Journal*, 11, 215-234, 1967.

ÇELEBİ E., Hareket eden katar yüklerinin meydana getirdiği kuvvetli zemin titreşimlerinin ince tabaka/esnek hacim yöntemiyle araştırılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, Trabzon, Türkiye, pp. 667-675, 2006a.

ÇELEBİ, E., Three-dimensional modelling of train-track and sub-soil analysis for surface vibrations due to moving loads, *Applied Mathematics and Computation*, 179, 209-230. 2006b.

ÇELEBİ, E., (Proje Yöneticisi), ARMAN, H., FIRAT, S., SARIBIYIK, M., ÇANKAYA, İ., BEYHAN, G., KIRTEL, O., VURAL, İ., (Araştırmacılar), Yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinde temel titreşimlerinin azaltılması için yeni tekniklerin geliştirilmesi, T.C. Sakarya Üniversitesi İleri Araştırma Projesi (DPT) Sonuç Raporu, DPT Proje No: 2003K120970, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2008.

ÇELEBİ, E., FIRAT, S., BEYHAN, G., ÇANKAYA, İ., VURAL, İ., KIRTEL, O., Field experiments on wave propagations and vibration isolation by using wave barriers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 824-833, 2009.

ÇELEBİ, E., FIRAT, S., ÇANKAYA, İ., Dikdörtgen rijit temellerin dinamik empedans fonksiyonları, *İMO Teknik Dergi*, 3827-3849, Yazı 252, 2006a.

ÇELEBİ, E., GÖKTEPE, F., Non-linear 2-D FE analysis for the assessment of isolation performance of wave impeding barrier in reduction of railway-induced surface waves, *Construction and Building Materials*, Vol. 36 (2012), 1-13, 2012.

ÇELEBİ E., GÖKTEPE, F., KARAHAN, N., Non-linear finite element analysis for prediction of seismic response of buildings considering soil-structure interaction, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12 (11), 3495-3505, 2012.

ÇELEBİ, E., GÖKTEPE, F., KIRTEL, O., Vibration isolation measures for reductions of structural responses due to passage of high-speed trains, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011*, G. De Roeck, G. Degrande, G. Lombaert, G. Müller (eds.), ISBN 978-90-760-1931-4, Leuven, Belgium, pp. 859-864, 4-6 July 2011.

ÇELEBİ, E., KIRTEL, O., Non\_Linear 2-D FE modelling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations, *Construction and Building Materials*, Vol. 42 (2013), 122-131, 2013.

ÇELEBİ, E., KIRTEL, O., GÜLER, H., Balastsız üstyapı düzleminden geçen yüksek hız trenlerine ait tekerlek yüklerinin elastik zemin ortamında simülasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, pp. 640-650, 2006b.

ÇELEBİ, E., SCHMID, G., Investigation of ground vibrations induced by moving loads, *Engineering Structures*, 27(24), 1981-1998, 2005.

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

DEMIREZER, T., Türkiyede hızlı tren projeleri ve proje yapıları, TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/1475.pdf>, Erişim Tarihi: 22.10.2011.

DENVER, H., KELLEZI, L., Analytical and FE modelling of ground vibration transmission, *Danish Geotechnical Institute (GEO)*, 2007.

DOLLING, H.J., Die Abschirmung von Erschütterungen durch Bodenschlitze, Bautechnik, 6, 193–204, 1970.

EL NAGGAR, M.H., CHEHAB, A.G., Vibration barriers for shock-producing equipment, Can. Geotech. J., 42, 297–306, 2005.

FIALA, P., DEGRANDE, G., AUGUSZTINOVICZ, F., Numerical modeling of ground borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic, Journal of Sound and Vibration, 301, 718-738. 2007.

FORCHAP, E., VERBIC, B., Wave propagation and reduction of foundation vibrations, Berg-Verlag GmbH, Bochum, 165-178, 1994.

FUYUKI, M., MATSUMOTO, Y., Finite difference analysis of rayleigh wave scattering at a trench, Bulletin of Seismological Society of America, 70 (6), 2051–69, 1980.

GAZETAS, G., Foundation engineering handbook: Foundation vibrations, 2nd Edition, 1991.

GENİŞ, M., GERÇEK, H., Yer altı açıklıklarının dinamik tasarımı, V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Isparta, Türkiye, pp. 65-72, 2000.

GOUASMIA, A., DJEGHABA, K., Non-Linear dynamic soil-structure interaction analysis of buildings, Technological and Economic Development of Economy, 13(4), 266–271, 2007.

GÖKTEPE, F., ÇELEBİ, E., Yapay anakaya modeli kullanılarak hızlı trenlerin yapılarda oluşturduğu titreşim etkilerinin azaltılması, International Science and Technology Conference (ISTEC), Dubai, United Arab Emirates (UAE), pp. 1352-1367, December 13-15, 2012.

GÖKTEPE, F., KIRTEL, O., ÇELEBİ E., Wave impeding block for mitigation of structural responses to train induced vibrations, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2010), Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 27-30 September 2010.

GÖKTEPE, F., KARAHAN N., ÇELEBİ, E., Doğrusal olmayan zemin koşullarının üstyapı davranışına etkilerinin doğrudan çözüm yaklaşımıyla incelenmesi, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 30 Mayıs-3 Haziran 2011 (Poster sunum).

GÖKTEPE, F., KÜYÜK, H.S., ÇELEBİ, E., Effect of wave impeding barrier depth on buried pipeline, International Science and Technology Conference (ISTEC), Dubai, United Arab Emirates (UAE), pp.428-434, December 13-15, 2012.

GÜLER, H., Demiryolu üstyapısı hesaplarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.



HAO, H., Effects of spatial variation of ground motions on large multiply-supported structures, Report no: UCB/EERC-89/06, University of California Berkeley, pp. 100-108, 1989.

HAUPT, W.A., Surface waves in non-homogeneous half-space, In Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, 1978.

HAUPT, W.A., Model tests on screening of surface waves, In: Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Vol. 3, pp. 215–222, 1981.

HETENYI, M., Beams on elastic foundation, The University Of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA, 1955.

HILDEBRAND, R., Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 411–424, 2004.

HOWARD, I.L., WARREN, K.A., Finite-element modeling of instrumented flexible pavements under stationary transient loading, Journal of Transportation Engineering, 135(2), 53-61, 2009.

HUAT, B.B.K., MOHAMMED, T.A., Finite element study using FE code (PLAXIS) on the geotechnical behavior of shell footings, Journal of Computer Science, 2 (1), 104-108, 2006.

HUBER, G., Erschütterungsausbreitung beim Rad/Schiene-system, Veröffentlichungen 115, Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1988.

HUBER, G., PRANGE, B., TRIANTAFYLLIDIS, T., Dynamische Wechselwirkung von Untergrund und Oberbau, VDI-Berichte, Nr. 510, 1984.

HUNG, H.H., YANG, Y.B., A review of researches on ground-borne vibrations with emphasis on those induced by trains, Proceedings of the National Science Council, Republic of China, 2001.

JOHNSON, R.G., EPSTEIN, I.H., CHRISTIANO, P., Some comparisons of dynamic soil-structure analysis, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, Vol. 1, pp. 199-214, Missouri, USA, 1976.

JOHNSON, K., LEMCKE, P., KARUNASENA, W., SIVAKUGAN, N., Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading, Environmental Modelling and Software, 21, 1375-1380, 2006.

JONES C.J.C., BLOCK, J.R., Prediction of ground vibration from freight trains, J. Sound Vibration, 193 (1), 205–213, 1996.

JU, S.H., Finite element analysis of structure-borne vibration from high-speed train, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 259-273, 2007.

JU, S.H., LIN, H.T., Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 993–1002, 2004.

JU, S.H., LIN, H.T., Experimentally investigating finite element accuracy for ground vibration induced by high-speed trains, *Engineering Structures*, 30, 733-746. 2008.

KAÇIN, S., YERLİ, H.R., Üç boyutlu yapı-zemin etkileşimi problemlerinin kuadratik sonlu elemanlar ve sonsuz elemanlar kullanılarak çözümü, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, pp. 377-385, 14 Ekim 2002.

KARLSTRÖM, A., BOSTRÖM, A., Efficiency of trenches along railways for trains moving at sub- or supersonic speeds, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 (7), 625–641, 2007.

KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T., RAJAGOPAL, K., Numerical investigation of the effect of vertical load on the lateral response of piles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 512-521. 2007.

KATTIS S.E., POLYZOS, D., BESKOS, D.E., Vibration isolation by a row of piles using a 3-D frequency domain BEM, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 46, 713-728, 1999.

KAUSEL, E., Thin-Layer method: formulation in the time domain, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 37, 927–941, 1994.

KIM, D-S., LEE, J-S., Source and attenuation characteristics of various ground vibrations, *Geotech. Earthq. Eng., Soil Dyn. III.*, Geotechnical Special Publication ASCE, 75(2), 1507-1517, 1998.

KIRTEL, O., Doğrusal olmayan zemin ortamında rijit şerit temeller için dinamik empedans fonksiyonları, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Haziran 2013.

KIRTEL, O., GÖKTEPE, F., ÇELEBİ E., Mitigation of structural responses to train induced vibrations by using open and in-filled trenches, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2010), Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 27-30 September 2010.

KLEIN, R., ANTEST, H., HONEDECT, D.L., Efficient 3D modeling of vibration isolation by open trenches, *Computers and Structures*, Vol. 64 (1-4), 809-817, 1997.

KRAMER, S.L., Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, NJ, USA. 1996.

KRYLOV, V.V., Vibration impact of high-speed trains effects of track Dynamics, *J. Acous. Soc. Am*, 100 (5), 3121–3133, 1996.

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

LAMB, H.. On the Propagation of Tremors Over the Surface of an Elastic Solid. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Ser. A*, 203(1-42), 1904.

LEUNG, K.L., BESKOS, D.E., VARDOULAKIS, I.G., Vibration isolation using open or filled trenches, Part 3: 2-D non-homogeneous soil, *Computational Mechanics*, 7, 137-48. 1990.

LEUNG, K.L., VARDOULAKIS, I.G., BESKOS, D.E., Vibration isolation of structures from surface waves in homogeneous and nonhomogeneous soils, *Soil structure interaction, 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, A. S. Cakmak, ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 155-169, 1987.

LEUNG, K.L., VARDOULAKIS, I.G., BESKOS, D.E., TASSOULAS, J.L., Vibration isolation by trenches in continuously non-homogenous soil by the BEM, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 10(3), 172-179, 1991.

LYNN, P.P., HADID, H.A., Infinite elements with  $1/R_n$  type decay, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17 (3), 347-355, 1981.

LYSMER, J., KUHLEMEYER, R.L., Finite dynamic model for infinite media, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95, 859-875, 1969.

LYSEMER, J., OSTADAN, F., TABATABAIE, M., VAHDANI, S., TAJIRIAN, F., SASSI-A system for analysis of soil-structure interaction, *Theoretical manual*. 1988a.

LYSEMER, J., OSTADAN, F., TABATABAIE, M., VAHDANI, S., TAJIRIAN, F., SASSI-A system for analysis of soil-structure interaction, *User's manual*, 1988b.

LYSEMER, J., UKADA, T., TSAI, C.F., SEED, H.B., FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No: EERC 75/30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.

MADHESWARAN, C.K., NATARAJAN, K., SUNDARAVADIVELU, R., BOOMINATHAN, A., Effect of open or concrete-infilled trenches on screening of ground vibration during pile driving, *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 33(2), 43-51, 2009.

MASSARSCH, K.R., Passive ground vibration isolation measures, *Proceedings of the 1st. International Workshop Wave'94 and Reduction of Vibrations*, pp. 21-32, 1994.

MASSARSCH, K.R., Settlements and damage caused by construction-induced vibration, In: Proceedings of International Workshop Wave 2000, Chouw and Schmid (eds), Bochum, Rotterdam: Balkema, pp. 299-315, 13-15 December 2000.

ÖZTÜRK, Z., ARLI V., Demiryolu mühendisliği, ATM, İstanbul, 2009.

PAKBAZ, M.S., MEHDIZADEH, R., VAFAEIAN, M., BAGHERINIA, K., Numerical prediction of subway induced vibrations: case study in Iran-Ahwaz city, Journal of Applied Sciences, 9(11), 2001-2015, 2009.

PAO, Y.H., MOW, C.C., Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacles, J. Appl. Phys., 34, 493–9, 1963.

PETYT, M., JONES, C.J.C., Modelling of ground-borne vibration from railways, Structural Dynamics, Proceedings of the Fourth European Conference on Structural Dynamics, EURO DYN'99, Prague, Czech Republic, 1999.

PFLANZ, G., HASHIMOTO, K., CHOUW, N., Reduction of structural vibrations induced by a moving load, J. Appl. Mech., 5, 555–563, 2002.

RAYLEIGH, L., On waves propagated along the plane surface of an elastic solid, London Mathematical Society Proceedings, Vol. 17, pp. 4-11, 1885.

RICHART, F.E., HALL, J.R., WOODS, R.D., Vibrations of solids and foundations, Prentice-Hall, 1970.

ROSSET, J.M., KAUSEL, E., Dynamic soil-structure interaction, Proc. 2nd International Conference on Numerical Methods In Geomechanics, Blacksburg, Virginia, 1976.

SCHMID, G., CHOUW, N., Soil vibration reduction due to local soil modification, the 10th earthquake engineering symposium, Vol. 3, pp. 2647-2651, 1998.

SCHMID, G., VERBIC, B., Modellierung der Erschütterung aus dem Schienenverkehr mit der Randelementmethode. Erdbebensicherung bestehender Bauwerke und aktuelle Fragen der Baudynamik Tagungsband D-A-CH'97, SIA, Dokumentation, DO:145, 1997.

SCHMID, G., WILLIAMS, G., HUH, Y., GIBHARDT, M., SSI 2D/3D–Soil-Structure Interaction, Ein Programmsystem zur Berechnung von Bauwerk-Boden-Wechselwirkungsproblemen mit der Randelementmethode, SFB 151-Report No:12, Ruhr Universität, Bochum, 1988.

SEGOL, G., LEE, P.C.Y., ABEL, J.R., Amplitude reduction of surface waves by trenches, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 104 (3), 621–641, 1978.

SELVADURAI, A.P.S., Elastic analysis of soil foundation interaction, Developments in Geotechnical Engineering, 17, 95-108, 1979.

SICACIK, E.A., SOYLUK, K., Deprem hareketinin değişim bileşenlerine bağlı olarak belirlenen yer hareketleri için kablolu köprülerin yapı-zemin etkileşim analizi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 11-14 Ekim 2011.

SMITH, I.M., GRIFFITH, D.V., Programming the finite element method, 2nd edition, John Wiley&Sons, Chisester, U.K., 1982.

TAKEMIYA, H., Lineside ground vibrations induced by high-speed train passage, Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment, Dept. Civil Eng., Nat. Cheng Kung Univ., Tainan, Taiwan, R.O.C., pp. 43-49, 1998a.

TAKEMIYA, H., Paraseismic behavior of wave impeding block measured for ground vibration reduction, Workshop on Effect of High-Speed Vibration on Structures and Equipment, Dept. Civil Eng., Nat. Cheng Kung Univ., Tainan, Taiwan, R.O.C., pp. 51-56, 1998b.

TERZAGHI, K., The shear resistance of saturated soils, Proceedings for the 1st. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, MA, Vol. 1, pp. 54-56, 1936.

THAU, S.A., PAO, Y.H., Diffraction of horizontal hear waves by a parabolic cylinder and dynamic stress concentrations, J. Appl. Mech., ASME, 785-92, 1966.

TOSECKY, A., Nümerische Untersuchung der Erschütterungsausbreitung infolge bewegter Lasten auf einem Feste Fahrbahn-System mittels der Methode der dünnen Schichten/Methode der flexiblen Volumen, Diploma thesis, Ruhr Universität, Bochum, 2001.

VALLIAPPAN, S., HAKAM, A., Finite element analysis for optimal design of foundations due to dynamic loading, International Journal For Numerical Methods In Engineering, 52, 605-614, 2001.

VERBIC, B., Über die rechnerische Untersuchung des Spannungs und Verformungszustandes im Oberbau und Unterbau der festen Fahrbahn infolge einer realen bewegter Last., Bericht, Ruhr Universität Bochum, 1996.

VERBIC, B., SCHMID, G., KÖPPER, H.D., Investigating the dynamic behaviour of rigid track, Railway Gazette International, pp. 583-586, 1997.

WAAS, G., Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layered media, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 1972.

WHITE, W., VALLIAPPAN, S., LEE, I.K., Unified boundary finite dynamic models, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 103, 949-964, 1977.

WOLF, J.P., Foundation vibration analysis using simple physical models, Prentice-Hall, Englewood, 1994.

WOLF, J.P., SONG, C.H, Dynamic stiffness matrix of unbounded soil by finite element multi-cell cloning, *Earthquake Engineering&Structural Dynamics*, 23, 233-250, 1994.

WOLF, J.P., SONG, C.H, Some cornerstone of dynamic soil-structure interaction, *Engineering Structures*, 24, 13-28, 2002.

WOODS, R.D., Screening of surface waves in soils, *J. Soil Mech. Found. Eng. Div. ASCE*, 94 (4), 951–979, 1968.

YANG, Y., HUNG, H., A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40, 3729-3747, 1997.

YANG, B.Y., HUNG, H.H., A 2.5D finite/infinite element approach for modelling visco-elastic bodies subjected to moving loads, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 240, 1317–1336, 2001.

YANG, Z., JEREMIC, B., Numerical study of group effects for pile groups in sands, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 27, 1255-1276, 2003.

YILDIRAR, Y., Beklenen büyük marmara depremi, *Sınır Ötesi Yayınları*, s. 54-64, Kasım, 2000.

YOSHIOKA, O., Reduction measures in track for shinkansen-induced ground vibrations, *Proceedings of the Third International Workshop on Wave Propagation, Moving Load and Vibration Reduction*, Okayama University, Japan, 2002.

ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR, R.L., *The finite element method*, Vol.2, 4th edition, McGraw-Hill, London, 1991.

ZHANG, Y., YANG, Z., BIELAK, J., CONTE, J.P., ELGAMAL, A., Treatment of seismic input and boundary conditions in nonlinear seismic analysis of a bridge ground system, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle, Washington, 16-18 July 2003.

## ÖZGEÇMİŞ

Fatih GÖKTEPE, 28.12.1983 Karabük doğumludur. İlk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamlamıştır. 1997–2001 yılları arasında Karabük Demir Çelik Süper Lisesi'nde eğitim aldıktan sonra, 2001 yılında kayıt yaptırdığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2005 yılında mezun olmuştur. Aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü (FBE) İnşaat Mühendisliği EABD Geoteknik EBD'nda, Eylül 2005 - Mayıs 2008 tarihleri arasında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak İnşaat Yüksek Mühendisi unvanını almıştır. Eylül 2008 tarihinden itibaren Sakarya Üniversitesi FBE İnşaat Mühendisliği EABD Geoteknik EBD'nda doktora çalışmasını sürdürmektedir. Aralık 2005 tarihinde Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup, halen aynı görevi sürdürmektedir.