

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUSAL OLMAYAN ZEMİN ORTAMINDA RİJİT
ŞERİT TEMELLER İÇİN DİNAMİK EMPEDANS
FONKSİYONLARI**

DOKTORA TEZİ

OSMAN KIRTEL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Prof. Dr. ERKAN ÇELEBİ

Haziran 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

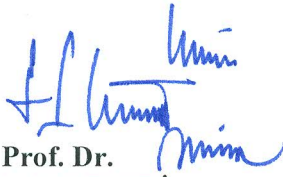
DOĞRUSAL OLMAYAN ZEMİN ORTAMINDA RİJİT
ŞERİT TEMELLER İÇİN DİNAMİK EMPEDANS
FONKSİYONLARI

DOKTORA TEZİ

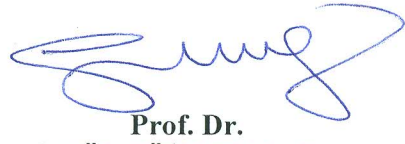
İnş. Y. Müh. OSMAN KIRTEL

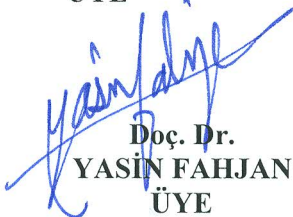
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

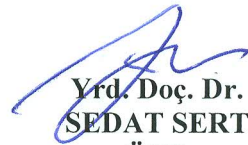
Bu tez 11/06/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
ERKAN ÇELEBİ
ÜYE


Prof. Dr.
SEYHAN FIRAT
JÜRİ BAŞKANI


Prof. Dr.
GÜLGÜN YILMAZ
ÜYE


Doç. Dr.
YASİN FAHJAN
ÜYE


Yrd. Doç. Dr.
SEDAT SERT
ÜYE

TEŞEKKÜR

Tez alıŐma sűresinin her aŐamasında destek ve teŐviklerini aynı zamanda ilgi ve değerli yardımlarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ' ye Őukranlarımı sunarım.

Ayrıca çalıŐmalarım sırasında bilgi ve tecrűbeleriyle bana yűn veren sayın Doç. Dr. Yasin FAHJAN, sayın Yrd. Doç. Dr. Sedat SERT ve sayın Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŐ' a burada teŐekkűrlerimi sunmayı bir borç bilirim.

TŪBİTAK-BİDEB yurt içi lisansűstű burs programı doktora çalıŐmam sűresince burs saęlamıŐtır. TŪBİTAK' a yapmıŐ olduęu destekten dolayı teŐekkűrlerimi sunarım. Ayrıca bu tez alıŐması Sakarya Ŭniversitesi Bilimsel Projeler Koordinatűrlűęű tarafından "2012-05-04-012" ve "2009-50-02-025" numaralı projeler ile desteklenmiŐtir.

Eęitim-űęretim hayatım boyunca her tűrlű maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli anne ve babama sonsuz minnet borçluyum. Tez çalıŐmamın en yoęun zamanında hep yanımda olan deęerli eŐime gűsterdięi sabırdan ve anlayıŐtan űtűrű teŐekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. İlgili Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amacı	12

BÖLÜM 2.

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM PROBLEMİNDE EMPEDANS FONKSİYONLARI VE MALZEME DAVRANIŞI.....	16
2.1. Altsistem Yaklaşımı.....	20
2.1.1. Empedans analizi	23
2.1.2. Düzlem-şekildeğiştirme problemi için empedans analizi.....	28
2.2. Malzeme Davranış Modeli	30
2.2.1. Doğrusal olmayan malzeme davranışı.....	31
2.2.2. Lineer elastik mükemmel plastik malzeme modeli	35

BÖLÜM 3.

SONLU ELEMAN ANALİZLERİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER VE MODELİN DOĞRULANMASI	38
3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Yapı-Zemin Etkileşim Problemine Etki Eden Faktörler.....	38
3.1.1. Boyut etkisi ve sönüm	41
3.1.1.1. Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin geometrisi	42
3.1.1.2. Sınır şartları ve geometrik sönüm	46
3.1.1.3. Malzeme sönümü	51
3.1.2. Sonlu eleman ağının etkisi ve çözüm sürecinde sayısal doğruluk ve stabilite	56
3.2. Modelin Statik Rijitliklerle Doğrulanması	61

BÖLÜM 4.

DİNAMİK EMPEDANS FOKSİYONLARININ ELDE EDİLMESİ VE SAYISAL UYGULAMA	66
4.1. Şerit Temel Plağı İçin Dinamik Rijitlik.....	69
4.1.1. Elastik ortamlar için dinamik rijitlik.....	70
4.1.2. Doğrusal olmayan ortamlar için dinamik rijitlik	72
4.1.2.1. Düşey doğrultu için limit deplasman ve doğrusal olmayan davranış katsayısı	76
4.1.2.2. Yatay doğrultu için limit deplasman ve doğrusal olmayan davranış katsayısı	79
4.2. Vaka Analizi	89

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR	100
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

δ	: Doğrusal olmayan davranış göstergesi
α	: Rayleigh malzeme sönümü için kütle matrisi katılım katsayısı
β	: Rayleigh malzeme sönümü için rijitlik matrisi katılım katsayısı
ω	: Dış yükün açısal frekansı
ν	: Poisson oranı
φ	: Kayma direnci açısı
ψ	: Şişme açısı
τ	: Kayma gerilmesi
Δ	: Zemin-yapı elemanı sürtünme açısı
γ	: Birim hacim ağırlık
ρ	: Malzemenin yoğunluğu
ξ	: Malzeme sönüm katsayısı
λ	: Zemin ortamında yayılan dalga boyu
σ_1	: Maksimum asal gerilme
σ_3	: Minimum asal gerilme
Δh	: Sonlu eleman boyutu
δ_h	: Yatay doğrultu için doğrusal olmayan davranış göstergesi
Δt	: Hareket denkleminin çözümünde zaman adım aralığı
δ_v	: Düşey doğrultu için doğrusal olmayan davranış göstergesi
$[C]$: Malzeme sönüm matrisi
$[C_b]$: Sınır integral matrisi
$[M]$: Kütle matrisi
A	: Şerit temel orta noktası
a_0	: Boyutsuz frekans parametresi
B	: Zemin yüzey sınır noktası

B_t	: Şerit temel plağının yarı genişliği
c	: Malzemenin kohezyon değeri
c_1	: Viskoz sınırlar için basınç gerilmesine karşı gelen soğurma katsayısı
c_2	: Viskoz sınırlar için kayma gerilmesine karşı gelen soğurma katsayısı
c_p	: Basınç dalgası hızı
c_s	: Kayma dalgası hızı
d_c	: Köprü ayağı kolon çapı
E	: Elastisite modülü
f_n	: Zemin ortamı için hakim frekans değeri
G	: Kayma modülü
H	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin yüksekliği
h	: Şerit temel plağının kalınlığı
H_c	: Köprü ayağı yüksekliği
K_h	: Elastik ortamlar için frekansa bağlı yatay dinamik rijitlik
k_h	: Elastik zemine oturan temeller için yatay dinamik rijitlik katsayısı
K_{h0}	: Elastik zemine oturan temeller için statik yatay rijitlik
$K_{NLZ,h}$: Doğrusal olmayan zemin davranışı için temel plağına ait frekansa bağlı eşdeğer yatay dinamik rijitlik
$K_{NLZ,v}$: Doğrusal olmayan zemin davranışı için temel plağına ait frekansa bağlı eşdeğer düşey dinamik rijitlik
K_v	: Elastik ortamlar için frekansa bağlı düşey dinamik rijitlik
k_v	: Elastik zemine oturan temeller için düşey dinamik rijitlik katsayısı
K_{v0}	: Elastik zemine oturan temeller için statik düşey rijitlik
L	: Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin genişliği
LEZ	: Lineer elastik zemin davranışı
NLZ	: Nonlineer zemin davranışı
$P_h(t)$: Yatay doğrultuda uygulanan harmonik kuvvet
P_{h0}	: Yatay doğrultuda uygulanan harmonik yükün genliği
$P_v(t)$: Düşey doğrultuda uygulanan harmonik kuvvet
P_{v0}	: Düşey doğrultuda uygulanan harmonik yükün genliği
R_{inter}	: Temel-zemin arayüzeyi dayanım azaltma katsayısı
RZ	: Rijit zemin davranışı

T	: Doğal titreşim periyodu
U_0	: Tepe noktası rölatif yerdeğiştirme
$U_h(t)$: Temel-zemin arakesitindeki zamana bağlı yatay yerdeğiştirme
$U_v(t)$: Temel-zemin arakesitindeki zamana bağlı düşey yerdeğiştirme
V_{maks}	: Maksimum taban kesme kuvveti
W_{LEZ}	: Lineer zemin davranışı halinde dış yük altında tüketilen enerji
W_{NLZ}	: Nonlineer zemin davranışı halinde dış yük altında tüketilen enerji

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Empedans fonksiyonları için zemin ve temel özellikleri (Gazetas, 1991)	10
Şekil 1.2. Matematik modelin idealleştirilmesi.....	14
Şekil 2.1. Makro eleman yaklaşımı.....	19
Şekil 2.2. Basit fiziksel modeller	19
Şekil 2.3. Yapı-zemin etkileşimi probleminde altsistem yaklaşımı	22
Şekil 2.4. Altsistem yaklaşımında empedans ve komplekans.....	23
Şekil 2.5. Empedans analizinde zemin ortamının modellenmesi.....	24
Şekil 2.6. Düşey doğrultuda titreşen temel bloğu için dinamik etkileşim	25
Şekil 2.7. Üç boyutlu zemin-temel sisteminin düzlem sisteme indirgenmesi.....	29
Şekil 2.8. Tresca ve von Mises akma kriterleri	33
Şekil 2.9. Mohr-Coulomb teorisinde yenilme (Budynas, 1999)	34
Şekil 2.10. Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager yenilme kriterleri	34
Şekil 2.11. Elastik-mükemmel plastik davranış	35
Şekil 3.1. Sonlu eleman modelinin (SEM) kurulması.....	39
Şekil 3.2. 15 düğüm noktalı üçgen eleman	40
Şekil 3.3. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin A noktasındaki davranışa etkisi	43
Şekil 3.4. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin B noktasındaki davranışa etkisi.....	43
Şekil 3.5. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi genişliğinin A noktasındaki davranışa etkisi	45
Şekil 3.6. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi genişliğinin B noktasındaki davranışa etkisi	45
Şekil 3.7. Sınırlarda yerdeğiştirmelerin sıfırlanması.....	47
Şekil 3.8. Viskoz sönümleyici yutucu sınırlar (absorbing boundaries).....	48

Şekil 3.9. c_2 katsayısının A noktasındaki davranışa etkisi	49
Şekil 3.10. c_2 katsayısının B noktasındaki davranışa etkisi	50
Şekil 3.11. α katsayısının A noktasındaki davranışa etkisi.....	53
Şekil 3.12. α katsayısının B noktasındaki davranışa etkisi.....	53
Şekil 3.13. β katsayısının A noktasındaki davranışa etkisi	55
Şekil 3.14. β katsayısının B noktasındaki davranışa etkisi	55
Şekil 3.15. Sonlu eleman ağ yapısının A noktasındaki davranışa etkisi.....	58
Şekil 3.16. Sonlu eleman ağ yapısının B noktasındaki davranışa etkisi	59
Şekil 3.17. Zemin özellikleri için deney yapılan noktalar	62
Şekil 3.18. Zemin türüne göre statik düşey rijitliğin değişimi	63
Şekil 3.19. Düşey doğrultu için SEM doğruluk düzeyinin analitik çözümlerle karşılaştırılması	64
Şekil 3.20. Zemin türüne göre statik yatay rijitliğin değişimi.....	65
Şekil 3.21. Yatay doğrultu için SEM doğruluk düzeyinin analitik çözümlerle karşılaştırılması	65
Şekil 4.1. Statik yük etkisi altında malzeme davranışının yerdeğiştirmeye etkisi	68
Şekil 4.2. Doğrusal malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	71
Şekil 4.3. Adapazarı bölgesi zeminine ait doğrusal malzeme davranışı için düşey dinamik rijitlik katsayısının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi	71
Şekil 4.4. Adapazarı bölgesi zeminine ait doğrusal malzeme davranışı için yatay dinamik rijitlik katsayısının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi	72
Şekil 4.5. Düşey yük etkisi altında doğrusal olmayan malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	73
Şekil 4.6. Yatay yük etkisi altında doğrusal olmayan malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi.....	74
Şekil 4.7. Zemin ortamının farklı malzeme davranışları için kuvvet- yerdeğiştirme ilişkisinde enerji.....	75
Şekil 4.8. Farklı zemin davranış modellerinde düşey doğrultu sınır değeri için yük-yerdeğiştirme ilişkisi	78

Şekil 4.9. Düşey doğrultu için doğrusal olmayan davranış göstergesinin boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi	79
Şekil 4.10. Deprem tehlike durumları için Adapazarı bölgesine ait spektrum eğrileri	81
Şekil 4.11. PEER, spektrum kaydının sisteme yüklenmesi	82
Şekil 4.12. PEER, ölçeklenmiş ivme kayıtlarının elde edilmesi	83
Şekil 4.13. Maksimum yatay yerdeğiştirmelerin elde edilmesi	84
Şekil 4.14. Farklı zemin davranış modellerinde D1 deprem sınırı için yük-deplasman ilişkisi	85
Şekil 4.15. Farklı zemin davranış modellerinde D2 deprem sınırı için yük-deplasman ilişkisi	86
Şekil 4.16. Farklı zemin davranış modellerinde D3 deprem sınırı için yük-deplasman ilişkisi	87
Şekil 4.17. Yatay doğrultu için deprem tehlike durumlarına bağlı olarak doğrusal olmayan davranış göstergesinin boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi	89
Şekil 4. 18. Vaka analizi için üstyapı ve özellikleri	90
Şekil 4.19. Eğilme rijitliğinin yapının deprem davranışına etkisi	95
Şekil 4.20. Yerdeğiştirmenin farklı zemin davranışları için üstyapı periyoduna bağlı değişimi	96
Şekil 4.21. Yerdeğiştirmenin farklı zemin davranışları için yer hareketine bağlı değişimi	98

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Doğrudan çözüm yaklaşımı ve altsistem yaklaşımının karşılaştırılması	16
Tablo 2.2. Elastik zemine oturan şerit temeller için statik empedans değerleri....	29
Tablo 2.3. Malzeme akma dayanım kriterleri ve özellikleri	35
Tablo 3.1. Malzemelerin mekanik özellikleri	40
Tablo 3.2. Adapazarı merkez saha deneyleri zemin özellikleri (Youd ve diğ.; Bray ve diğ., 2000).	62
Tablo 4.1. Adapazarı bölgesi için genelleştirilmiş zemin özellikleri.....	66
Tablo 4.2. Genelleştirilmiş zemin özelliklerine ait statik rijitlikleri	67
Tablo 4.3. İzin verilebilir toplam oturmalar için kılavuz (cm) (Önalp ve Sert, 2010)	77
Tablo 4.4. Adapazarı bölgesi referans zemin durumu için spektral ivme değerleri	80
Tablo 4.5. Adapazarı bölgesi spektrum eğrileri için zemin düzeltme katsayıları.	80
Tablo 4.6. Sınır deprem seviye durumları için limit yatay yerdeğiştirmeler	84
Tablo 4.7. Elastik malzeme davranışı için statik rijitlikler	91
Tablo 4.8. Kullanılacak modeller için empedans değerleri.....	91
Tablo 4.9. İlgili modellerin deprem etkisi altındaki dinamik davranış karakteristikleri	92
Tablo 4.10. Farklı zemin davranışları için üstyapının dinamik parametrelerinin yer hareketine bağlı değişimi	99

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yapı-zemin dinamik etkileşimi, empedans fonksiyonları, doğrusal olmayan malzeme davranışı, sonlu elemanlar yöntemi, yutucu sınırlar

Bu çalışmada, Adapazarı bölgesi için üstyapının deprem etkisindeki dinamik davranışına yerel zemin koşullarının katkısını daha iyi tanımlayabilmek amacıyla temel-zemin arakesitindeki frekansa bağlı dinamik empedans fonksiyonlarının zemin ortamının doğrusal olmayan davranışı altında geliştirilmesi incelenmiştir.

Yarısonsuz zemin ortamına oturan şerit temel plağına ait dinamik empedans fonksiyonlarının elde edilmesi için iki boyutlu düzlem şekil değiştirme problemi olarak kurulan temel-zemin ortak sisteminin çözümü, zaman tanım alanında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çözüm yönteminde sayısal modelin doğruluğunu ve zaman tanım alanında sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak dinamik analizlerde uygunluğunu sağlamak için yapı-zemin etkileşim probleminde dalga yayılımına ve problemin çözümüne etki eden tüm parametreler araştırılmıştır.

Yüzeysel şerit temel plağı için, düşey ve yatay doğrultularda yer hareketinin etkin frekans içeriği dikkate alınarak, orta noktasından uygulanan harmonik karakterdeki yük altında zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan mekanik özelliklerine ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Sınır değerler için tüketilen enerjiler hesaplanarak doğrusal olmayan davranış göstergeleri elde edilmiş böylece nonlinear zemin davranışı altında dinamik rijitlikler frekansa bağlı olarak ortaya konulmuştur.

Geliştirilen yöntemin etkinliğini ve zeminin şekil değiştirebilme özelliğinin üstyapının dinamik davranışına katkısını gösterebilmek amacıyla sayısal bir uygulamaya yer verilmiştir. Seçilen köprü ayağı örneğinin dinamik parametreleri, rijit zemin, lineer elastik zemin ve nonlinear zemin davranışları için farklı frekans içeriklerine sahip gerçek deprem kayıtları kullanılarak incelenmiştir.

DYNAMIC IMPEDANCE FUNCTIONS FOR RIGID STRIP FOUNDATION ON NONLINEAR SOIL MEDIUM

SUMMARY

Keywords: Dynamic soil-structure interaction, impedance functions, nonlinear material behavior, finite element method, absorbing boundaries

In this study, in order to define better the effect of the local soil conditions on the dynamic behavior of the superstructure under the effect of an earthquake, improvement of the frequency dependent impedance functions at the interface of foundation-soil under nonlinear ground behavior is investigated for Adapazari region.

The solution of the foundation-soil system, which is modeled as a two-dimensional plane-strain problem to obtain the dynamic impedance functions belonging to strip foundation standing on a semi-infinite soil medium is found by using finite element method in time domain. In this solution technique, to satisfy the correctness of the numerical model and the compatibility of the dynamic analysis, which will be carried out with finite element method in the time domain, all the parameters effecting the wave propagation and the effects on the problem solution for the soil-structure interactions are investigated.

For the surface strip foundation, by considering for the fundamental frequency component of the earthquake in both vertical and horizontal directions, load-displacement relations belonging to linear and nonlinear mechanical properties of the soil medium are obtained by employing a harmonic load applied at the midpoint. Nonlinearity indicators are obtained by calculating the dissipated energies at the limit displacements and frequency dependent dynamic rigidities under nonlinear ground behavior.

To demonstrate the effectiveness of the developed technique and the contribution of the deformability of the soil on the dynamic behavior of the superstructure, a numerical application is included. The dynamic parameters of an exemplary selected bridge are investigated for the rigid, linear elastic and nonlinear soil behaviors using the real earthquake records having different frequency contents.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Dinamik yükler altında yapının zeminle ortak davranışını daha iyi değerlendirebilmek ve tam güvenliğini sağlayabilmek için nümerik ve deneysel çözüm yöntemlerinin yaygın olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen simülasyon uygulamaları günümüzde gittikçe önem kazanmaktadır. Araştırılan problemin saha veya laboratuvar deney çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının, nümerik çözüm teknikleriyle geliştirilen mekanik modelin analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması, bilgisayar modelinin öngörülen doğruluk düzeyi hakkında fikir vermekte yardımcı olmaktadır. 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 gelişen çözüm teknikleri ve teknoloji ile birlikte daha kolay olmaktadır.

Modern kent topluluklarının yoğun yerleşim bölgelerinde farklı titreşim kaynaklarının (ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik yükleri, yoğun inşaat faaliyetleri, patlamalar vb.) neden olduğu kuvvetli yer hareketinin yumuşak zemin ortamında yayılışı ve yapı temelleriyle etkileşimi hassas aletlerde işlevsel bozukluklara, insanlarda rahatsızlık verici durumlara ve binalarda hasarlara neden olabilmektedir. Bu durum son zamanlarda bilim dünyasında yapı ve geoteknik mühendisliği alanlarına ilgi uyandırmaya başlamıştır.

Artan nüfus ve yapılaşma ile birlikte; nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, viyadükler ve barajlar gibi dinamik yükler etkisi altında davranışlarının önemli

olduğu bilinen yapı sistemleri, günümüzde coğrafyasının büyük bir bölümü aktif fay bölgesinde olan ülkemizde zorunlu olarak büyük depremler üreten bu faylara yakın yapılmaktadır. Bu tür yapıların gerekli bazı durumlarda, çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmakta ve inşa edilen yapıların ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin sisteminin dinamik özelliklerinin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Türkiye’de son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremler (1999 Kocaeli, 1999 Düzce, 2011 Van) sonrasında yapılan kapsamlı incelemelerde, yıkılan ve hasar gören binaların davranışında zemin etkisinin önemli bir rol aldığı gözlenmiştir. İvme kayıtları incelendiğinde deprem kaynak faktörlerinin (fay tipi, fay derinliği, atılım doğrultusu vb.) yanı sıra ilgili bölgelerdeki zemin tabakalaşması, yeraltı su seviyesi, zemin tabakalarının özellikleri gibi geoteknik zemin özellikleri ana kayada oluşan kuvvetli yer hareketini değiştirerek yapıya farklı bir şekilde ulaştırmaktadır. Buda yapının periyot ve mod şekli gibi dinamik özelliklerinde değişiklere sebep olması gibi olumsuz, zeminin esnekliği ve sonsuzluğundan dolayı yapı titreşiminde sönüme sebep olması gibi olumlu etkilere neden olabilmektedir.

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını tanımlayabilmek için zemin özelliklerinin şekil değiştirmeyle olan ilişkisinin doğru bir biçimde tanımlanması gerekmektedir. Zeminler şiddetli yer hareketine maruz kaldıklarında doğrusal olmayan davranış gösterirler. Doğrusal olmayan davranışın etkisi yer hareketi şiddeti arttıkça büyütme (amplifikasyon) miktarının azalması şeklindedir. Bu durum şekil değiştirmelerdeki birikimle beraber zeminin histeretik sönümündeki artış ve zeminde mukavemet azalması dolayısıyla yumuşama olmasından kaynaklanmaktadır (Tönük ve Ansal, 2007). Düşük birim şekil değiştirme seviyelerinde, gerilme birim şekil değiştirme ilişkisinin elastik olduğu kabul edilebilir. Geoteknik mühendisliği alanında, laboratuvar (Dobry, 1991, Seed and Idriss, 1970) ve arazi (Kurtuluş ve Stokoe, 2007) deneyleriyle, zeminlerin gerilme–birim şekil değiştirme ilişkilerinin, özellikle yüksek birim şekil değiştirme seviyelerinde doğrusal olmadığı saptanmıştır. 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinden sonra doğrusal olmayan zemin

davranışı arazide de yaygın olarak gözlemlenmiştir. Buna rağmen sismolojik gözlemlerde ancak son yıllarda artan sayıdaki iyi kalite kuvvetli yer hareketi kaydı sayesinde doğrusal olmayan zemin davranışının kanıtları gözlenmektedir.

Ülkemizde, mühendislik analizlerinde üstyapı tasarımı yapılırken zemin etkileri yönetmeliklerin belirlediği parametrelerle tanımlanmakta ve tasarım buna göre yapılmaktadır. Anakaya üzerindeki zemin tabakalarının; yer hareketi sonucu oluşan deprem dalgalarını yukarıya değiştirerek iletmesi ve malzeme özelliği olarak da doğrusal olmayan davranış sergilemesi mevcut yönetmeliklerde tam olarak yansıtılmamaktadır. Bilinmelidir ki barajlar, nükleer santraller, köprüler vb. çok önemli yapılar dışında kalan ancak üstyapı stokunun büyük bir bölümünü oluşturan konut tipi yapılar mevcut yönetmeliklere göre yapılmakta ve zeminin bu önemli etkisi dikkate alınmamaktadır. Doğrusal olmayan yapı-zemin davranışını tasarımcı üstyapı mühendislerinin anlayabileceği ve sayısal analizlerinde kolayca uygulayabileceği bir şekilde tanımlayabilmek önemli sayıda olan konut tipi yapıların da böyle önemli bir parametreye göre tasarımını sağlayacaktır.

Yapılan bu çalışmada amaç, dinamik analizde üstyapının, zemine rijit bir şekilde mesnetlendiği kabulü veya FEMA 356 (Amerika) ve DGGT (2002, Almanya) gibi şartnamelerdeki statik empedanslar ile analiz edilmesi yerine, yapı-zemin sisteminin doğrusal olmayan davranışını ifade edecek frekansa bağlı temel empedans fonksiyonlarını geliştirmek ve doğrusal olmayan dinamik empedansları kullanarak üstyapının tasarımını yapmaktır. Adapazarı bölgesi için doğrusal olmayan malzeme davranışı altında elde edilen dinamik empedansların yapı-zemin dinamik etkileşiminin hesaba katıldığı problemlerin deprem analizinde etkin olarak kullanıma sunulmasının geoteknik deprem mühendisliği alanında bu tip problemlerin değerlendirilmesinde büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

1.2. İlgili Çalışmalar

Zeminlerin üstyapı davranışlarına etkisi başlangıçta ağır makine temel titreşimlerini doğru bir şekilde hesaplamak için geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Gazetas, 1983).

Depremlerin yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen binalarda gösterdikleri önemli dinamik etkilerden dolayı sismik hesaplar için de, uzun zamandan beri araştırmalar yapılmaktadır. En iyi yöntemin belirlenmesi için literatürde birçok sayısal çözüm yaklaşımları, analitik çözüm yolları ve deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Yapı-zemin sistemi, zemin bölgesinin yarı sonsuz uzay olarak kabul edilmesinden dolayı sonsuz zemin bölgesinden sonlu bir zemin alınarak modellenmektedir.

Yapı-zemin etkileşiminde zemin bölgesinin idealleştirilmesi için kullanılan iki temel yaklaşım, “Doğrudan Çözüm Yaklaşımı (Direkt Metot)” ile “Altsistem Yaklaşımı”dır. Aydınöglu (1994), Doğrudan Çözüm Yaklaşımında, zemin ortamının da üstyapı taşıyıcı sistemi gibi Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile ayrıklaştırılmasını ve oluşturulan ortak sistemin, tanımlanan statik veya dinamik dış etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Altsistem Yaklaşımında ise, yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak düşünülür ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan denge denklemleri, daha sonra yapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Bu durumda zemin ortamı sadece üstyapı ile zemin bölgesi arakesitinde, sınırlı sayıdaki ayrık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilir. Altsistem yaklaşımının en önemli çözüm aşaması, temel-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen yapı temellerinin davranışının incelenmesinde de etkin olarak kullanılan temel empedans fonksiyonlarının belirlenmesidir. Temellerin rijitliklerini de gösteren bu dinamik büyüklükleri hesaplayabilmek için günümüzde mevcut analitik ve yarı analitik çözüm yöntemlerinin yanında sınır elemanlar ve sonlu elemanlar gibi nümerik çözüm yöntemleriyle bunların her ikisini de kapsayan karma (melez) çözüm teknikleri kullanılmaktadır.

Temel-zemin arakesiti için geliştirilen fonksiyonların hesaplanması ile ilgili yapılan çalışmalarda görülmüştür ki dinamik rijitlikler bir çok parametreye bağlıdır. Bunların başında zemin mekanik özellikleri, temel ve zemin geometrisi, dış yükün frekansı gelmektedir. Temel plağının; boyutları, gömülme derinliği, gömülü temel durumu için yanıl duvarların sürtünme yüzeyi özellikleri dinamik rijitliklerin hesaplanmasına etki etmektedir. Empedans fonksiyonlarına etki eden zemin parametreleri ise; tabaka

kalınlığı, tabakanın eğimi, malzeme mekanik özellikleri ve sönüm başlıkları altında sıralanmaktadır (Sieffert, 1996). Belirtilen parametrelere bağlı olarak temel-zemin arakesitindeki etkileşim fonksiyonları sınırlı sayıda frekans değeri için ve en önemlisi de elastik zemin davranışı altında elde edilmiştir.

Veletsos ve Verbic (1973), doğrusal visko-elastik yarı sonsuz zemin ortamında kütsüz rijit dairesel temelin kararlı davranışı için basit yaklaşık bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Harmonik yük uygulayarak temelin yatay, düşey ve eğilme rijitliklerini elde etmişlerdir. Daha sonra temelin bu üç titreşim modu için elde ettikleri sonuçlarla kütleli temel durumu için kapsamlı nümerik analizler yapmış ve temelin visko-elastik zemin davranışında gösterdiği tepkiyi karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Malzeme sönümünün, temelin sönüm kapasitesini arttırdığı ve doğal titreşim frekansını ise azalttığı görülmüştür.

Luco (1974), homojen ve tabakalı zemin ortamında rijit dairesel temeller için analitik çözümler yapmış, harmonik olarak uygulanan yatay, düşey ve eğilme yükleri altında elastik zemine oturan temelin rijitlik ve sönüm değerlerini frekansa bağlı elde etmiştir. Sınır değer problemi olarak çözülen sistemde geniş bir frekans aralığı için yük-deplasman ilişkisi tabakalı ve homojen yarı sonsuz ortam için farklı parametrelerin etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalarda zemin ortamı elastik kabul edilerek modellenmiş ve ayrıca bu çalışmaların çoğundan elde edilen sonuçlar sınırlı frekans aralığı ve belirli Poisson değerleri için kullanılmıştır.

Dinamik rijitliklerin titreşim kaynağının frekansına bağlı olması ortak sistemin hareket denklemlerinin çözümünü karmaşık hale getirdiğinden frekanstan bağımsız temel empedans değerleri de önerilmiştir (Tsai ve diğ., 1974). Nükleer güç santralleri için sabit parametrelere bağlı olarak oluşturulan frekanstan bağımsız temel empedans fonksiyonları yaklaşımının geçerliliği değerlendirilmiştir. Farklı kayma dalga hızlarına sahip elastik yarı sonsuz zemin ortamı için frekans, sönüm ve yapının

davranış spektrum eğrilerinin değişimi karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda frekanstan bağımsız temel empedans fonksiyonlarının derin ve üniform zemin ortamları için uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.

Dominguez ve Roesset (1978), yarı sonsuz elastik zemin bölgesine oturan yüzeysel ve gömülü dikdörtgen temellerin dinamik empedans fonksiyonlarını frekans tanım aralığında sınır elemanlar yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Ayrıca yüzeysel kare temel için eleman ağı ve sınır şartlarının etkisi de araştırılmıştır. Statik rijitlikler ve frekansa bağlı rijitlik katsayıları dikdörtgen temellerin boyutlarına bağlı olarak elde edilmiştir. Gömülü temeller içinde sonuçlar gömülme derinliğine bağlı olarak sunulmuştur.

Gazetas ve Tassoulas (1987a; 1987b), farklı geometrik şekillere sahip gömülü temellerin yanal titreşimlerinde rijitlik ve sönüm parametreleri için formülasyonlar geliştirmişlerdir. Literatürde yapılmış olan ve sınır eleman yöntemi ile elde edilmiş nümerik sonuçları kullanarak basit cebirsel formüller ve boyutsuz frekansa bağlı grafikler elde etmişlerdir. Analizlerinde elastik yarısonsuz zemine oturan düzensiz geometrik şekillere sahip gömülü temel kullanmışlardır. Tanımlanan koşullar altında yatay doğrultu için statik ve dinamik rijitlikler elde edilmiştir. Pratik uygulama açısından iki farklı yapı örneği için elde ettikleri formülleri kullanarak temel-zemin ara kesitindeki rijitlik ve sönüm değerlerini sayısal olarak hesaplamışlardır.

Dobry ve Gazetas (1986), düzensiz geometrik şekillere sahip rijit yüzeysel temeller için etkili rijitlik ve sönüm değerlerini homojen ve derin zemin yatağı durumu için hesaplamışlardır. Çalışmalarında kapsamlı bir şekilde analitik çözümleri derlemişlerdir. İlave olarak nümerik analiz ve basit fiziksel modellerle de yöntemlerini desteklemişlerdir. Geniş bir frekans aralığı için temel plağının tüm titreşim moduna ait rijitlik ve sönüm değerleri boyutsuz frekans parametresine bağlı olarak sunulmuştur. Tüm sonuçlar zemin ortamının doygun ve doygun olmaması durumları için ayrı ayrı verilmiştir. Rijitlik ve sönüm değerlerine ait karşılaştırmalar eşdeğer daire yaklaşımı kullanılarak ele alınmıştır.

Dobry ve diğ. (1986), daha önceki çalışmalarında düzensiz geometriye sahip temeller için homojen zemin durumu için elde etmiş oldukları empedans değerlerinin geçerliliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında dairesel, kare ve dikdörtgen geometriye sahip temeller için çok sayıda serbest titreşim test verisini kullanarak elde etmiş oldukları yatay, düşey, eğilme ve burulma modları için dinamik rijitliklerin doğruluğunu kontrol etmişlerdir. Deneylerin sonucunda bütün titreşim modları için kabul edilebilir hata oranlarında çok iyi değerler hesaplamışlardır.

Apsel ve Luco (1987), tabakalı zeminlerdeki yüzeysel ve gömülü dairesel temellerin titreşimleri için integral çözüm teknikleri geliştirmişlerdir. Dış yük olarak kuvvet ve moment etkisi altında yapılan analizlerde zemin ortamı vizkoelastik malzeme davranışı dikkate alınarak idealize edilmiştir. Geliştirilen yöntemin geçerliliği, dairesel temeller için daha önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak farklı gömülme oranları için karşılaştırılarak sağlanmıştır.

Farklı gömülme derinliklerine göre Mita ve Luco (1989), kare temellerin öteleme-dönme titreşimleri için çalışmalar yapmışlardır. Elastik yarı sonsuz zemin ortamında rijit gömülü kare temellerin dinamik davranışını incelemek için sınır elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemlerinin beraber uygulandığı hibrit yaklaşım kullanmışlardır. Sonuçların geçerliliği diğer çözüm yöntemleri ve farklı geometrilerle karşılaştırılarak sağlanmıştır. Çalışmanın sonunda, gömülü kare temellerin dinamik davranışının eşdeğer daire yaklaşımı ile ele alınan dairesel temeller gibi düşünülebileceği görülmüştür.

Karabalis ve Beskos (1986), sınır elemanlar yöntemini kullanarak elastik ortamda iki ve üç boyutlu sistemler için temel-zemin arakesitindeki dinamik rijitlikleri araştırmışlardır. Çalışmada üç boyutlu düzensiz geometriye sahip rijit gömülü temeller için sınır elemanlar yöntemi ile zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Temel-zemin sisteminin hem uygulanan dış yük etkisi altında hem de sismik etki altındaki dinamik davranışı homojen, izotropik ve lineer elastik zemin ortamı için elde edilmiştir.

Viskoelastik ortamda gömülü veya yüzeysel dairesel temel (Chapel, 1987) için sınır elemanlar yöntemi kullanılarak empedanslar hesaplanmıştır. Analizlerde zemin heterojen yarı sonsuz ortam olarak ele alınmıştır. Heterojenlik zeminin yatayda farklı mekanik özelliklere sahip tabakaların düşünülmesi ile sağlanmıştır.

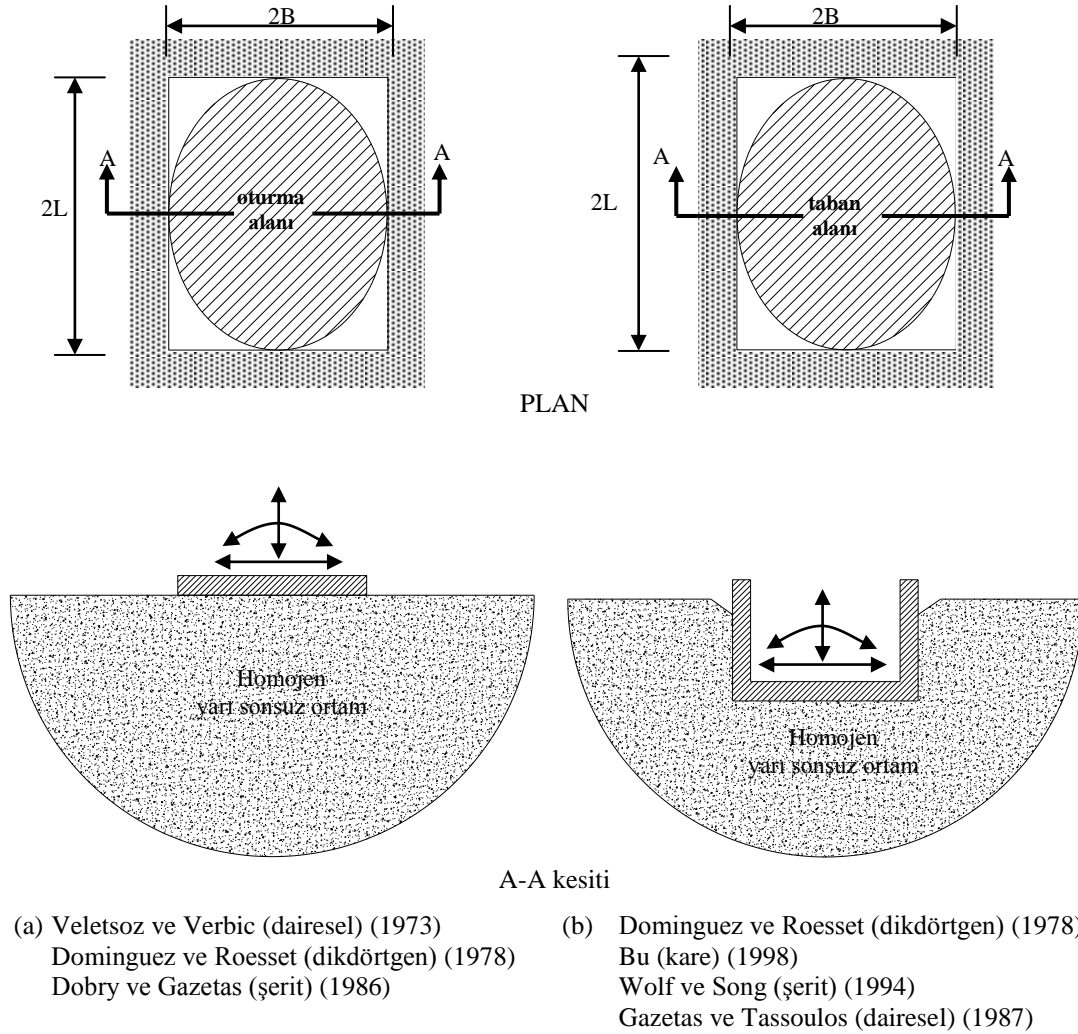
Ahmad ve Bharadwaj (1991), tabakalı viskoelastik zemin ortamında gömülü şerit temellerin yatay empedans fonksiyonlarını hesaplamışlardır. Detaylı bir şekilde mekanik ve geometrik (gömme derinliği, zemin tabaka kalınlığı, temel kenar duvarı sürtünme yüksekliği) parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Sınır elemanlar yöntemi kullanılarak model kurulmuştur. Zemin tabakasının kayma dalga hızının yatay empedans'a etkisi de incelenmiş ve boyutsuz frekansa bağlı olarak kayma dalga hızı oranının kompleyans değerlerine etkisi grafiklerle gösterilmiştir. Analizler zemin malzemesinin tek bir Poisson oranı için yapılmıştır. İlave olarak Bharadwaj ve Ahmad (1992), aynı parametreler ve çözüm yöntemini kullanarak gömülü şerit temellerin eğilme etkisi altındaki dinamik davranışını da incelemişler ve dinamik rijitlik ve sönüm değerlerini elde etmişlerdir.

Bu (1998), sıkıştırılmaz yarı sonsuz zemin ortamında gömülü kare temeller için dinamik empedans fonksiyonlarını hesaplamıştır. Zemin özelliği olarak doygun kil kullandığı çalışmada sabit bir Poisson oranı için analizleri sınır elemanlar yöntemini kullanarak yapmıştır. Temelin düşey, yatay ve eğilme modları için boyutsuz frekansa bağlı dinamik rijitlik ve sönüm katsayılarını farklı gömme derinliklerine bağlı olarak elde etmiştir.

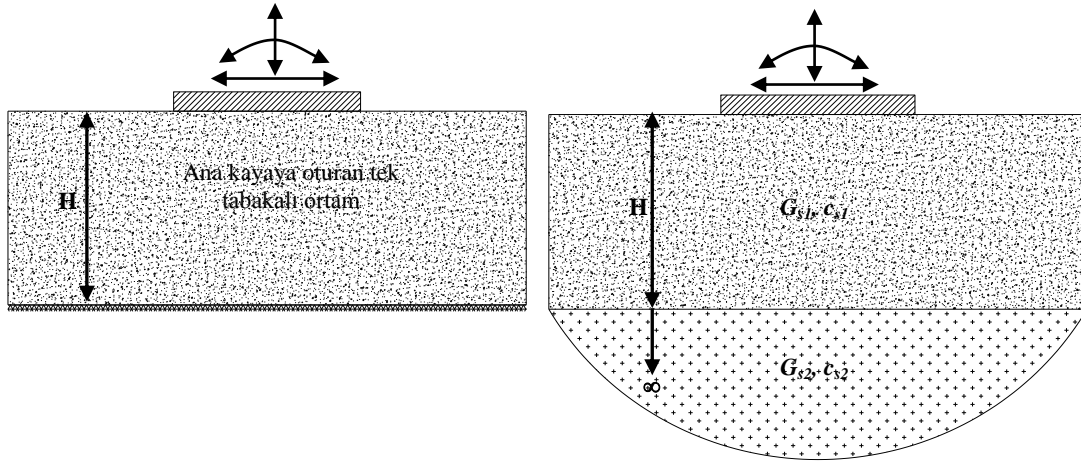
Bu ve Lin (1999), yüksek dereceli elemanlar ve sonsuz sınır elemanlar içeren hassas bir sınır eleman metodu algoritması kullanmışlardır. Analizler yüksek frekanslara sahip dış yük etkisi altında gömülü kare temeller için yapılmıştır. Bağlaşık yatay ve eğilme empedans fonksiyonları geniş bir frekans aralığı için elde edilmiştir.

Wolf ve Song (1997), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gömülü şerit temellerin farklı titreşim modları için dinamik rijitliklerini hesaplamışlardır. Yakın bölge sonlu

elemanlarla modellenmiştir. Zeminin sonsuzluğunu ifade edebilmek için sonsuz küçük sonlu eleman hücre yöntemi kullanılmıştır. Bu şekilde kurulan modelin doğruluğu sınır eleman yöntemi ile test edilmiştir. Sonuç olarak yarı sonsuz zemin ortamında gömülü şerit temellerin düşey ve yatay dinamik rijitlikleri boyutsuz frekans parametresine bağlı olarak hesaplanmıştır.



Şekil. 1.1. Empedans fonksiyonları için zemin ve temel özellikleri (Gazetas, 1991)



A-A kesiti

(c) Gazetas (dairesel, dikdörtgen, şerit) (1991) (d) Ahmed ve Bharadwaj (şerit) (1991)
Luco (dairesel) (1976)

Şekil 1.1. Empedans fonksiyonları için zemin ve temel özellikleri (Gazetas, 1991) (devamı)

Yapılan bu çalışmalarda dinamik rijitlikler belirli frekans değerleri için hesaplandığından ve doğrulukları da sınırlı sayıda test edildiğinden dolayı uygulamaya dönük çalışan mühendisler, bu konuyla ilgili olarak sadece bir kaç özel durum için verilmiş empedans değerlerini kullanabilmişlerdir.

Spyrakos ve Chaojin (2004), çalışmalarında sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemlerini içeren hibrit çözüm tekniğini kullanmışlardır. Tabakalı zemin ortamında gömülü şerit temellerin dinamik davranışı incelenmiştir. Temel plağı sonlu eleman formülasyonu ile, sonsuza uzanan zemin bölgesi ise sınır eleman formülasyonu ile ele alınmıştır. İki farklı yöntem ile modellenen temel ve zemin ortamı ara yüzeyde uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilmiştir. Bu çalışmada temel plağı esnek ve kütleli olarak dikkate alınmıştır. Mevcut parametreler etkisi altında düşey ve yatay dinamik kompleyanlar boyutsuz frekans parametresine bağlı olarak elde edilmiştir.

Çelebi ve diğ. (2006), yüzeysel ve gömülü temellerin dinamik empedans değerlerini geniş bir frekans aralığı için sınır elemanlar yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin ortamı lineer elastik, homojen ve

izotropik olarak tanımlanmıştır. Dikdörtgen rijit temelin tüm titreşim modları için (yatay, düşey, eğilme, burulma) boyutsuz frekansa bağlı dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları literatür sonuçları ile karşılaştırılarak kurulan modelin doğruluğu kontrol edilmiştir.

Şafak (2006), çalışmasında frekansa bağlı empedans fonksiyonlarının zaman tanım alanına adapte edilmesi için basit bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde temele uygulanan kuvvet ve oluşan deplasman arasındaki ilişki basit sonlu farklar denklemleri kullanılarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak empedanslar bir takım katsayılara bağlı iki polinomun oranı olarak hesaplanmıştır. Zaman bölgesinde, dairesel ve dikdörtgen temellerin yüzeysel veya gömülü olması durumunda frekanstan bağımsız temel empedans fonksiyonlarını elde etmiştir. Sunulan yaklaşımlar yapı-zemin etkileşim probleminin zaman tanım alanındaki çözümlerinde yapıların sismik davranışı için empedans fonksiyonlarının kullanılmasını daha kolay hale getirmiştir.

Dinamik empedans bileşenlerinin belirlenmesinde, yapı-zemin ortamının analitik olarak çözümünde oluşan zorluklardan dolayı, geçmiş çalışmalarda genellikle harmonik yük etkisi altında rijit kütesiz temeller kullanılarak basit ve düzenli geometriye sahip izotropik ortamlar ele alınmıştır.

Deneme (2007) tez çalışmasında, iki boyutlu elastostatik ve elastodinamik yapı-zemin etkileşimi problemlerinin çözümü için sınır elemanlar formülasyonu geliştirmiştir. Yapılan formülasyon statik ve dinamik halde literatürde verilen problemlere uygulanmıştır. Yöntemin doğruluğu için bazı düzlemsel problemler hazırlanan denklemler ile çözülmüş ve mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak oluşturulan sınır eleman formülasyonunun geçerliliği sağlanmıştır. Farklı temel geometrileri için yatay ve düşey kompleyans değerlerini statik ve dinamik durum için geliştirdiği sınır eleman algoritması ile elde etmiştir.

Mylonakis ve diğ. (2006), çalışmalarında temelin tüm titreşim modları için (ötelenme, dönme, eğilme, burulma) rijitlik ve sönüm parametrelerini vermişlerdir. Bu değerler farklı zemin durumları için (tabakalı, yarı sonsuz, tek tabaka vb.) ayrı ayrı sunulmuştur. Dikdörtgen, şerit, dairesel ve elips geometriye sahip temeller için dinamik rijitlik katsayıları boyutsuz frekansa bağlı olarak grafiklerle gösterilmiştir. Fakat bu katsayılar belirli Poisson oranları için verilmiştir. Ayrıca zeminin doğrusal olmayan davranışı ve homojen olmaması durumlarını da tartışmışlardır.

1.3. Çalışmanın Amacı

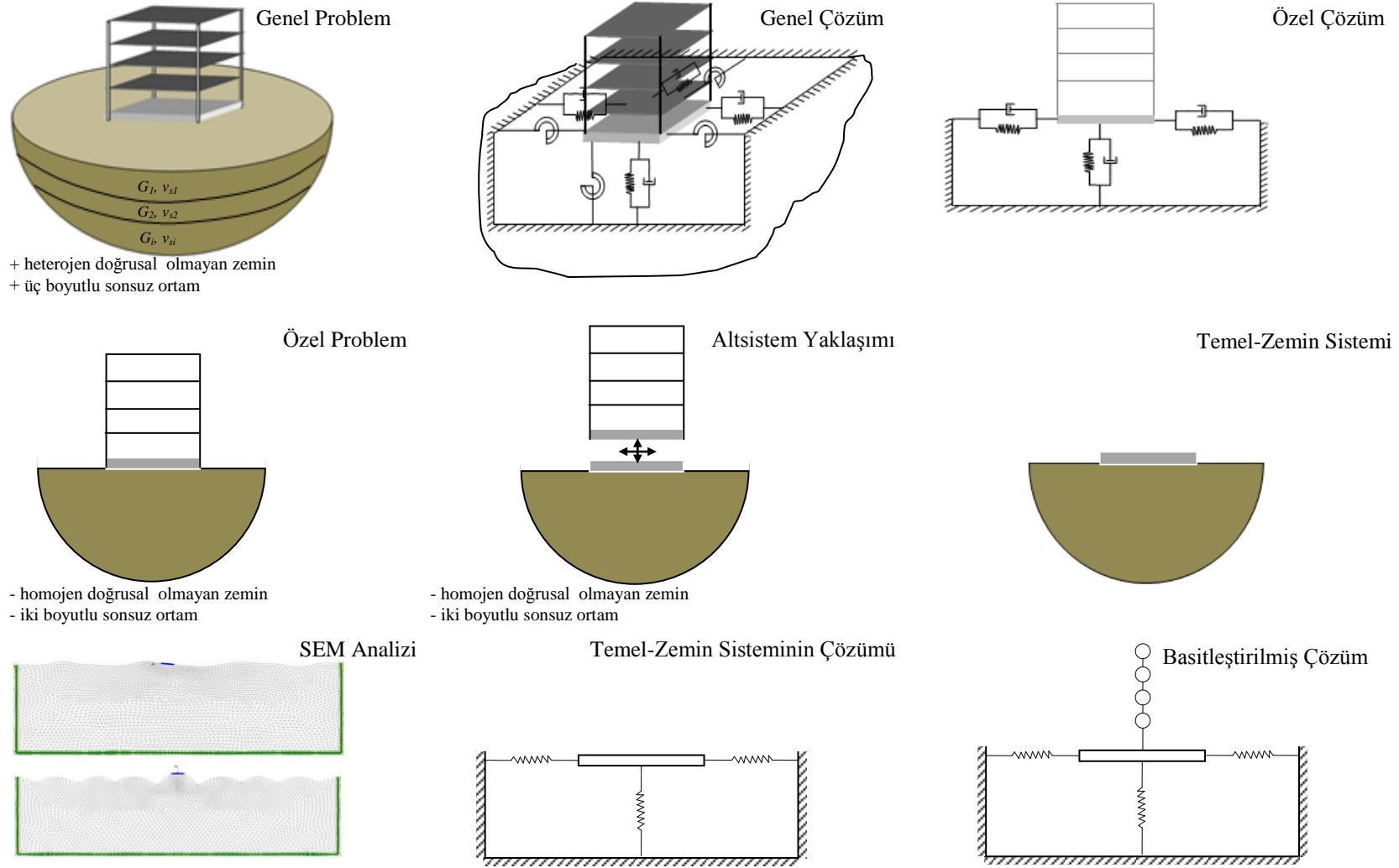
Bu çalışmada, üstyapının deprem etkisindeki dinamik davranışına yerel zemin koşullarının etkisini daha iyi tanımlayabilmek için temel-zemin arakesitindeki frekansa bağlı dinamik empedans fonksiyonlarının zemin ortamının doğrusal olmayan davranışı altında geliştirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 1.2).

Yapı-zemin etkileşim probleminin çözümünde öngörülen dinamik rijitlik değerleri Adapazarı bölgesi için elde edileceğinden dolayı yerel zemin özellikleri, daha önce yapılmış geoteknik incelemeler ve sismik deneylerden alınarak bölgeyi temsil edecek parametrelerin kullanılması sağlanmıştır.

Yarı sonsuz zemin ortamına oturan şerit temel plağına ait dinamik empedans fonksiyonlarının elde edilmesi için iki boyutlu düzlem şekil değiştirme problemi olarak kurulan temel-zemin ortak sisteminin çözümü, zaman tanım alanında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Dinamik etki olarak düşey ve yatay doğrultularda ayrı ayrı olmak üzere temel plağının orta noktasından etki eden, yer hareketinin etkin frekans içeriğinde noktasal harmonik karakterde bir yük uygulanmıştır. Düşey ve yatay doğrultular için zemin ortamının doğrusal olmayan mekanik özellikleri altında yapılacak nümerik analizlerde kullanılacak modelin doğrulanması mevcut elastik zemin ortamında yüzeysel şerit temeller için verilmiş olan statik empedans değerleri kullanılarak yapılmıştır. Sayısal modelin doğruluğunu ve zaman tanım alanında sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak dinamik analizlerde uygunluğunu sağlamak için yapı-zemin etkileşim probleminde dalga yayılımına ve

problemin çözümüne etki eden tüm parametreler araştırılmıştır. Literatürdeki tanımlamalar da dikkate alınarak temel-zemin ortak sisteminin dinamik analizinde, geometrik (radyasyon) sönüm yani sınır şartlarının doğruluğu, malzeme sönümü, sonlu elemanların boyut etkisi ve sayısal kararlılık parametrelerinin zemin ortamında dalga yayılımına etkileri araştırılmış ve dalgaların en gerçekçi şekilde zemin ortamında yayılmasını sağlayacak şekilde incelenen parametreler için uygun değerler alınmıştır.

Yerel zemin koşullarının doğrusal olmayan malzeme davranışına ait temel-zemin ortak sisteminin dinamik analizlerinde Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Seçilen doğrusal olmayan malzeme davranışının, elastik ortamlar için kurulan ve doğrulaması yapılan temel-zemin ortak sisteminin sonlu eleman modeli için de geçerliliğini kontrol etmek amacıyla düşey ve yatay doğrultularda ayrı ayrı statik yük etkisi altında analizler yapılmış ve analizler sonucunda başlangıç rijitlik değerlerinin elastik ortamlar için mevcut olan rijitlik değerleri ile örtüştüğü görülmüştür. Malzeme davranışının kurulan ve doğrulaması yapılan sonlu eleman modeli için uygunluğu kontrol edildikten sonra zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan mekanik özelliklerine ait, yer hareketinin etkin frekans içeriği dikkate alınarak düşey ve yatay doğrultularda şerit temel plağının orta noktasından uygulanan harmonik yük etkisi altında dinamik analizler yapılmış ve frekansa bağlı olarak her iki duruma ait yük-yerdeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Literatürde tanımlanmış olan “doğrusal olmayan davranış göstergesi” (δ) katsayıları, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları altında elde edilmiş olan yük-deplasman ilişkileri kullanılarak farklı tehlike durumları için bulunan limit yerdeğiştirme değerleri için tüketilen enerji prensibine dayalı olarak hesaplanmıştır. Bu katsayılar kullanılarak düşey ve yatay doğrultularda Adapazarı bölgesi için yüzeysel şerit temel plağının doğrusal olmayan empedans değerleri eşdeğer lineer olarak elde edilmiştir.



Şekil 1.2. Matematik modelin idealleştirilmesi

Çalışmanın son aşamasında ise, yüzeysel şerit temel plağı için elde edilen doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarına ait frekansa bağlı empedans değerlerinin üstyapının deprem etkisindeki dinamik davranışına etkilerini görebilmek amacı ile tek serbestlik dereceli köprü ayağı uygulaması kullanılarak analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizlerde, yapı-zemin etkileşiminin olmaması (zemine rijit bağlı) ve olması (doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranışı) durumlarında deprem etkisi altında üstyapıya ait periyot, tepe noktası görelî yerdeğiştirmesi ve taban kesme kuvveti değerlerinin değişimi incelenmiştir. Ayrıca narinliğin temel plağına ait eğilme empedans değeri ile ilişkisi de araştırılmış, periyot ve tepe noktası görelî deplasmanın narinliğe bağlı değişimleri elde edilmiştir.

BÖLÜM 2. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM PROBLEMİNDE EMPEDANS FONKSİYONLARI VE MALZEME DAVRANIŞI

Dış yük etkisi altında yapı-zemin etkileşimi, zemin ortamının üstyapı ile birlikte değerlendirilmesi ile dikkate alınır. Bu değerlendirme sırasında esas sorun zemin ortamının nasıl idealleştirileceğidir. Yapı-zemin etkileşimi problemini çözmek için genel anlamda, Doğrudan Çözüm Yöntemi ve Altsistem yaklaşımı kullanılmaktadır (Aydinoğlu, 1994).

Tablo 2.1. Doğrudan çözüm yaklaşımı ve altsistem yaklaşımının karşılaştırılması

	Doğrudan çözüm yaklaşımı	Altsistem yaklaşımı
Analiz ve Çözüm	<ul style="list-style-type: none">• Tek adımda çözüm• Sonlu elemanlar yöntemi• Lineer ve nonlinear çözüm• Zaman ve frekans bölgesinde çözüm• Homojen ve homojen olmayan sistemler	<ul style="list-style-type: none">• Bölge bölge çözüm• Sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemi• Empedans analizi• Lineer çözüm• Frekans bölgesinde çözüm
Avantaj ve dezavantajları	<ul style="list-style-type: none">+ Malzeme ve geometri nonlinear- Yetersiz geometrik sönüm- Yüksek hesap yoğunluğu- Karmaşıklık	<ul style="list-style-type: none">- Malzeme ve geometri lineer+ Basit modelleme+ Düşük hesap yoğunluğu

Doğrudan çözüm yaklaşımında zemin ortamı da üstyapı gibi ayrıklaştırılır ve oluşturulan zemin-yapı ortak modelinin tek adımda çözümü gerçekleştirilir. Yapı-zemin etkileşimi probleminin doğrudan çözüm yaklaşımı ile ele alındığı sistemlerde en çok sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler yapılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı yapı-zemin etkileşimi problemlerinin düzlem şekildeğiştirme koşulları altında çözümü zamana bağlı giridi hareketi için;

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [\tilde{C}]\{\dot{U}(t)\} + \tilde{P}(\sigma) = \tilde{F}(t) \quad (2.1)$$

diferansiyel matris denklemi ile elde edilebilir. Burada $[M]$, yapı-zemin ortak sisteminin kütle matrisini, $[\tilde{C}]$ ise özel sönüm matrisini ifade etmektedir.

$$[\tilde{C}] = [C] + [C_b] \quad (2.2)$$

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2.3)$$

$$[C_b] = \int [N]^T \begin{bmatrix} c_1 \rho c_p & 0 \\ 0 & c_2 \rho c_s \end{bmatrix} [N] dA \quad (2.4)$$

Özel sönüm matrisine ait denklemlerde; $[C]$ yakın ve uzak alanlar için malzeme sönüm matrisini, $[C_b]$ ise zemin ortamının sonsuzluğunu ifade eden radyasyon sönümünü modelleyen sınır integral matrisini belirtmektedir. Burada malzeme sönüm matrisi kütle ve rijitlik matrislerinin bir fonksiyonu olarak ele alınmakla birlikte α ve β Rayleigh sönümlemesini tanımlayan katılım katsayılarıdır (Kramer, 1996). Radyasyon sönüm matrisinde ise c_1 ve c_2 viskoz sınırlar için soğurma performansını geliştiren yumuşatma katsayılarını, c_p ve c_s sırası ile zemin ortamına ait basınç ve kayma dalgası hızlarını ifade etmektedir. Düğüm noktası sayısına bağlı olarak yazılan sonlu eleman şekil fonksiyonu $[N]$ ise;

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & N_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

matrisi ile tanımlanmaktadır. Genel hareket denklemindeki $\tilde{P}(\sigma)$ ifadesi ise gerilmeye bağlı kuvvet matrisini tanımlamaktadır.

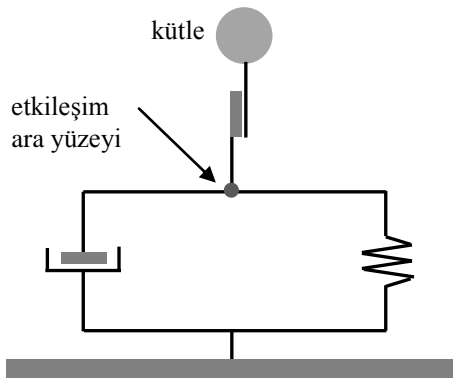
Zemin ortamının sonsuzluğunu ifade edecek sınır şartlarının yazımının sonlu eleman analizlerdeki zorluğundan dolayı zemin bölgesi gibi sürekli bir ortam sonsuz serbestlik dereceli ayrık sisteme dönüştürülebilir. Böyle bir sistemin hareket denklemi, ortamın sonsuz küçük bir eleman parçasının göz önüne alınmasıyla yazılan kısmi diferansiyel denklem ile tanımlanır (Çelebi ve diğ., 2006). Sınır elemanlar yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemde çözüm, sürekli ortamlar mekaniği problemlerinin hareketi için yazılan diferansiyel denklem takımının sınır integral

formülasyonuna dönüştürülmesi ile elde edilir ve analitik olarak ta bu diferansiyel denklemin kesin çözümünün bilinmesi gerekir (Dominguez, 1993). Zemin ortamının sadece sınırlarının ayrıklaştırılması daha az bilinmeyen kullanılmasına ve sınırlarda sonsuzluğu ifade eden radyasyon şartının doğrudan sağlanmasına neden olmaktadır. Bünye kuvvetlerinin etkisi dikkate alınmadığında ve başlangıç koşulunun sıfır olduğu durumda sınır integral formülasyonu;

$$c_{ik}(\eta)\tilde{u}_i^*(\eta, \omega) = \int_{\Gamma} \tilde{u}_{ik}^*(x, \eta, \omega)\tilde{t}_i(x, \eta, \omega)\partial\Gamma - \int_{\Gamma} \tilde{t}_{ik}^*(x, \eta, \omega)\tilde{u}_i(x, \eta, \omega)\partial\Gamma \quad (2.6)$$

şeklinde frekans bölgesinde yazılabilir. Burada $\tilde{t}_{ik}(x, \eta, \omega)$ ve $\tilde{u}_{ik}(x, \eta, \omega)$ terimleri sırasıyla, sonsuz bölgenin herhangi bir η noktasına k doğrultusunda etki eden birim kuvvet nedeniyle, ortamın diğer bir x noktasında i doğrultusunda oluşan gerilme ve yerdeğiştirme bileşenlerini, c_{ik} terimi ise sınır parametresini tanımlamaktadır. Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin çözümünde sonlu elemanlar yöntemine alternatif olarak kullanılan sınır elemanlar yöntemi veya hibrit metotlarda (sonlu ve sınır elemanlar yöntemlerinin ortak kullanımı) zemin ortamının sonsuzluğunu tanımlayacak sınır şartlarının matematiksel formülasyonla kesin olarak yazılması, problemin geometrisinin küçülmesine ve radyasyon koşulunun sağlanmasına böylece daha gerçekçi sonuçların daha kısa çözüm sürelerinde elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

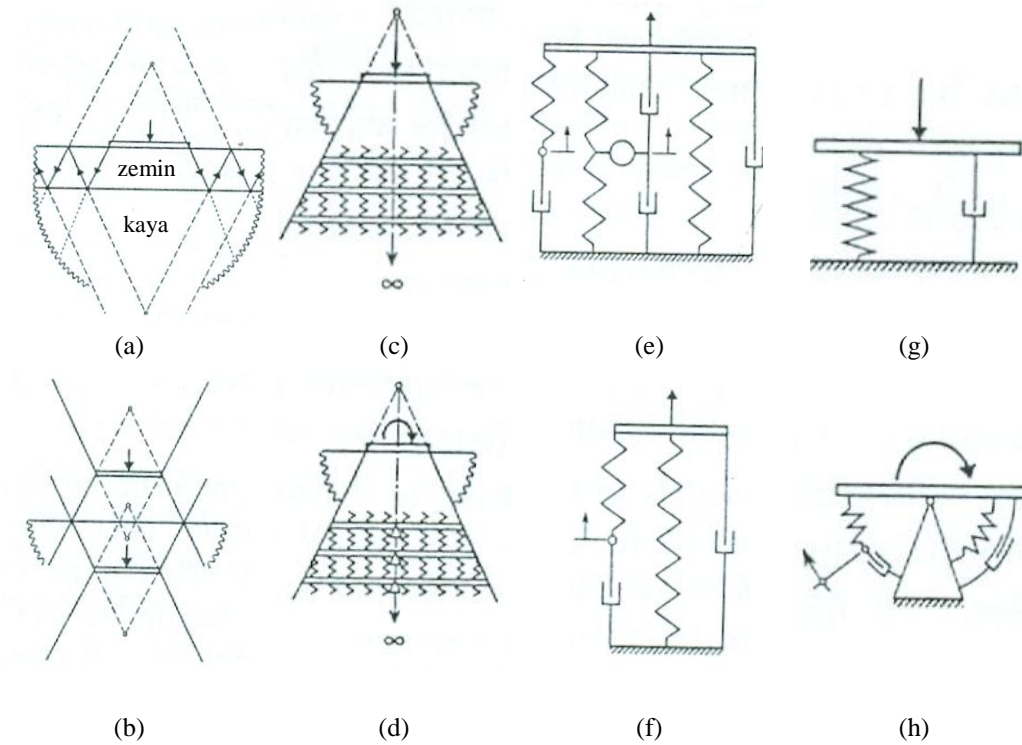
Yapı-zemin etkileşim problemi dinamik analizinin yukarıda tanımlanan hassas ve kapsamlı çözüm teknikleri ile ele alınması yerine bazı araştırmacılar basitleştirilmiş yaklaşık yöntemler önermişlerdir. Bunlardan ilk olarak öne sürülen genelleştirilmiş gerilme ve şekildeğiştirme değişkenleri kavramına dayanan *Makro Eleman Yaklaşımı*'dir (Nova ve Montrasio, 1991). Zorlanma-pekleşme plastisite teorisine dayanan bu yaklaşımın avantajı, sistemin dinamik davranış karakteristiklerine önemli bir etki yapmadan yapı-zemin etkileşimi probleminin basit bir şekilde ele alınmasını sağlamasıdır (Şekil 2.1).



Makro eleman	
• yakın bölge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ üstyapı ▪ zeminin bir bölümü
• uzak bölge (zemin ortamı)	• lineer davranış

Şekil 2.1. Makro eleman yaklaşımı

Diğer bir yaklaşık yöntem olarak, yapı-zemin etkileşim problemlerinde hassas sınır elemanlar çözümleri yerine alternatif olarak geliştirilen *basit fiziksel modeller* temel plağına ait kuvvet-deplasman etkileşim ilişkisinin tanımlanmasında ve temel plağı için sismik girdi hareketinin belirlenmesinde kullanılabilir (Wolf, 1998) (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Basit fiziksel modeller

Şekil 2.2'deki çözüm yaklaşımlarına bakıldığında;

- (a) Esnek yarısonsuz kaya ortamındaki tek tabakalı zemin yüzeyine oturan dairesel plak için eşdeğer koni
- (b) Green fonksiyonlarının hesabı için yüzeysel dairesel plağa ait eşdeğer çift koni
- (c) Yarısonsuz zemin yüzeyine oturan dairesel plak için yarısonsuz ötelenme konisi
- (d) Yarısonsuz zemin yüzeyine oturan dairesel plak için yarısonsuz eğilme konisi
- (e) Yay, sönümleyici ve kütleli içeren toplu iki serbestlik dereceli sistem
- (f) Yay ve sönümleyici içeren toplu tek serbestlik dereceli sistem
- (g) Ötelenme konisi için ayırık eleman modeli
- (h) Eğilme konisi için ayırık eleman modeli

şeklinde sıralanmaktadır. Problemin karmaşık ve kapsamlı bir halden daha kolay ve anlaşılabilir bir duruma getirildiği basit fiziksel modeller;

- tasarımcının dinamik sistemin ana parametrelerinin tanımlamasına yardımcı olması
- ön çalışma ve tasarım
- alternatif tasarımlar için araştırma
- zemin parametreleri ve yapı-zemin ara yüzeyindeki bağlantı koşulları gibi büyük belirsizliklerle beraber değişen koşullar için parametrik çalışmalar gerçekleştirmek

şeklinde tanımlanan konularda kolaylıklar sağlamaktadır.

2.1. Altsistem Yaklaşımı

Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin çözümünde altsistem yaklaşımı kullanılarak karmaşık modeller kurmaktan, kapsamlı hesaplar yapmaktan ve büyük hesap yüklerinin getirdiği uzun çözüm zamanlarından kurtulabilmektedir. Altsistem yaklaşımında yapı ile sonsuz zemin bölgesi arasındaki rijitlik ilişkisi kullanılarak

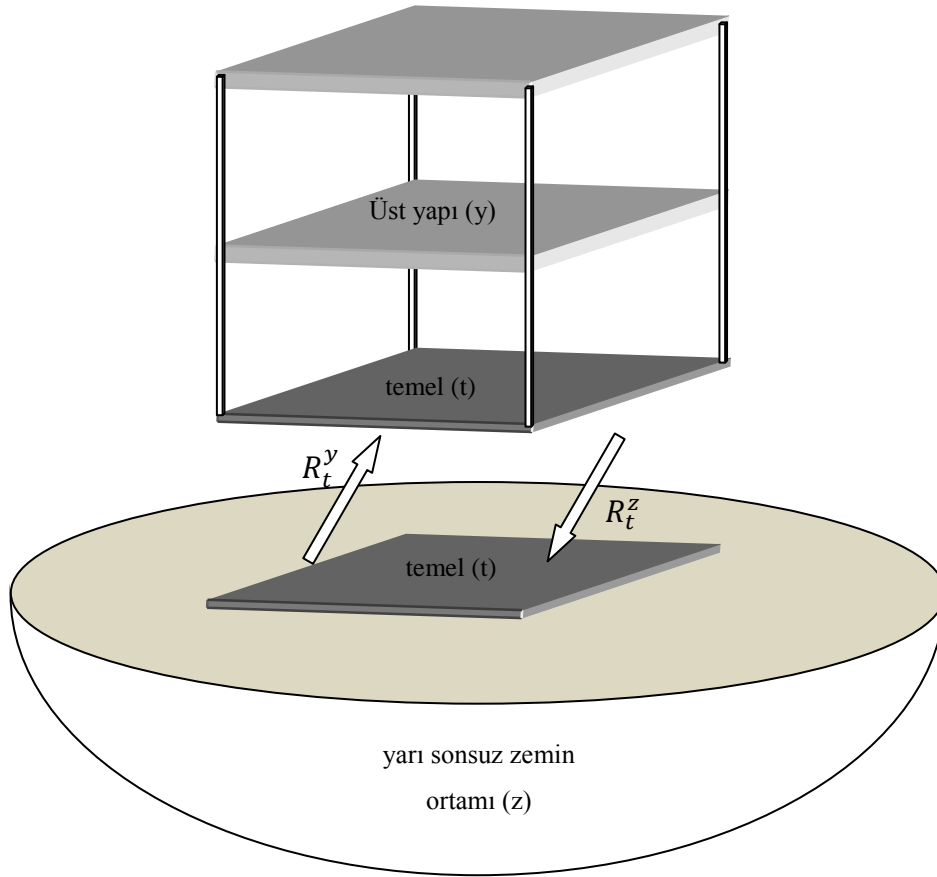
etkileşim kuvvetleri bulunmakta ve bu kuvvetlerin etkisi altında üstyapının analizi yapılmaktadır.

Altsistem yaklaşımında, çözümün yapıldığı sistemde üstyapı ile zemin ortamı ayrı iki bölge olarak ele alınmaktadır. Her iki sistem için denge denklemleri ayrı ayrı yazılmakta ve yazılan denge denklemleri yapı-zemin ara kesitinde denge koşulları ve geometrik uygunluk şartları dikkate alınarak birleştirilmektedir. Böylece zemin ortamı, yapı-zemin ara kesitinde, belirli sayıdaki düğüm noktalarında temsil edilen bir altsistem olarak modellenmiş olur. Denge denklemleri, yapı-zemin sistemini birbirine bağlayan etkileşim kuvvetleri de dikkate alınarak ;

$$\begin{bmatrix} K_{yy} & K_{yt} \\ K_{ty} & K_{tt}^y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_y \\ u_t^y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_y \\ P_t \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ R_t^y \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

$$S_{tt}^z * u_t^z = R_t^z \quad (2.8)$$

şeklinde yazılmaktadır (Şekil 2.3). Burada; y , t , z indisleri sırasıyla yapı, temel ve zemini ifade etmektedir. S_{tt}^z yapı-zemin arakesitinde zemin ortamını temsil eden rijitlik matrisidir. P etki eden dış kuvvetleri, u yerdeğiştirmeleri ve R ise yapı-zemin ara kesitindeki etkileşim kuvvetini ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Yapı-zemin etkileşimi probleminde altsistem yaklaşımı

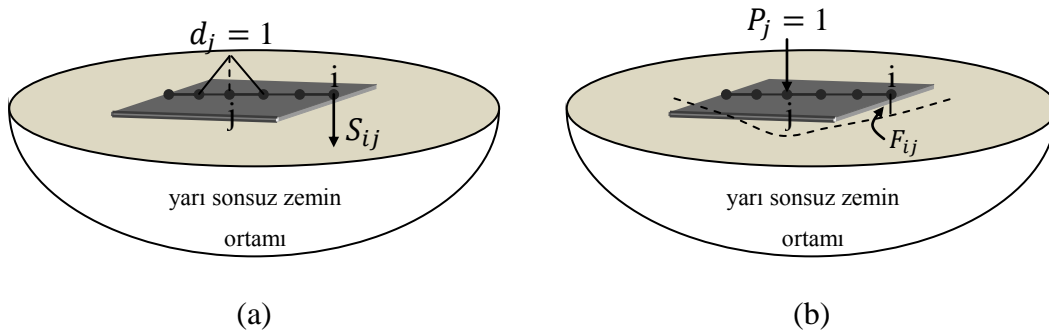
Etkileşim kuvvetleri ve yerdeğiştirmeler (R , u), geometrik uygunluk ve denge şartından dolayı birbirlerine eşittir. Bu şartlar altında denklem (2.7) ve (2.8) birleştirilerek aşağıdaki şekilde sadeleştirilir.

$$\begin{bmatrix} K_{yy} & K_{yt} \\ K_{ty} & (K_{tt}^y + S_{tt}^z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_y \\ u_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_y \\ P_t \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'e bakıldığında, zemin altsistem rijitlik matrisinin elde edilmesi için yalnızca yapı-zemin arakesitinin ayrıklaştırılması yeterli olacaktır.

Basit bir yaklaşım olarak temellerin oturduğu zeminin rijitliği ve sönümü, yaylar ve sönümleyiciler kullanılarak tanımlanabilmektedir. Yaylar ve sönümleyiciler frekansa bağlı temel empedans fonksiyonlarını temsil etmektedir. Bu yaklaşımın en önemli aşaması zemin-temel arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen

yapı temellerinin davranışının incelenmesinde etkin olarak kullanılan karmaşık dinamik rijitliklerin belirlenmesidir. Dinamik rijitlikleri, komplekans veya empedans denklemleri ifade etmektedir. Empedans (rijitlik) birim deplasmandan dolayı meydana gelen kuvveti (Şekil 2.4a), komplekans (fleksibilite) birim yükten dolayı meydana gelen deplasmanı (Şekil 2.4b) tanımlamaktadır.

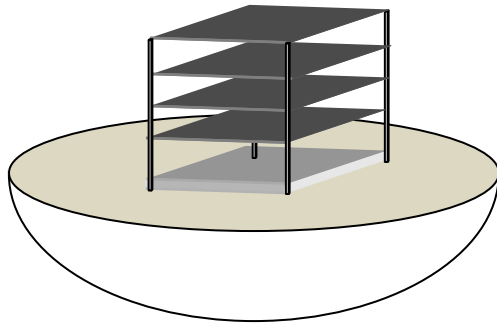


Şekil 2.4. Altsistem yaklaşımında empedans ve komplekans

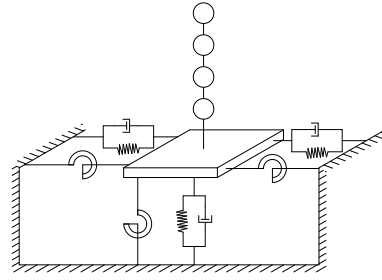
Burada rijitlik matrisinin i 'inci satır ve j 'inci kolonunda yer alan empedans (S_{ij}) değeri; arakesitte j 'inci serbestlik derecesine uygulanan birim yerdeğiştirme değeri için i 'inci serbestlik derecesine etkiyen kuvveti ifade etmektedir. Fleksibilite matrisinin i 'inci satır ve j 'inci kolonunda yer alan komplekans (F_{ij}) değeri ise; arakesitte j 'inci serbestlik derecesine uygulanan birim kuvvet değeri için i 'inci serbestlik derecesinde oluşan yerdeğiştirmeyi vermektedir (Aydınöglü, 1994).

2.1.1. Empedans analizi

Üstyapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinin çözümünde zemin ortamı dinamik rijitliği ifade eden yay ve sönümleyiciler kullanılarak modellenabilmektedir. Bu yaklaşımla hem çözüm süreleri hızlanmakta hem de uygulama mühendislerinin konut tipi yapılarda kullanabilecekleri basit formülasyonlar elde edilmektedir (Şekil 2.5).



(a) gerçek durum



(b) zemin ortamının yaylar ve sönümleyiciler ile idealize edilmesi

Şekil 2.5. Empedans analizinde zemin ortamının modellenmesi

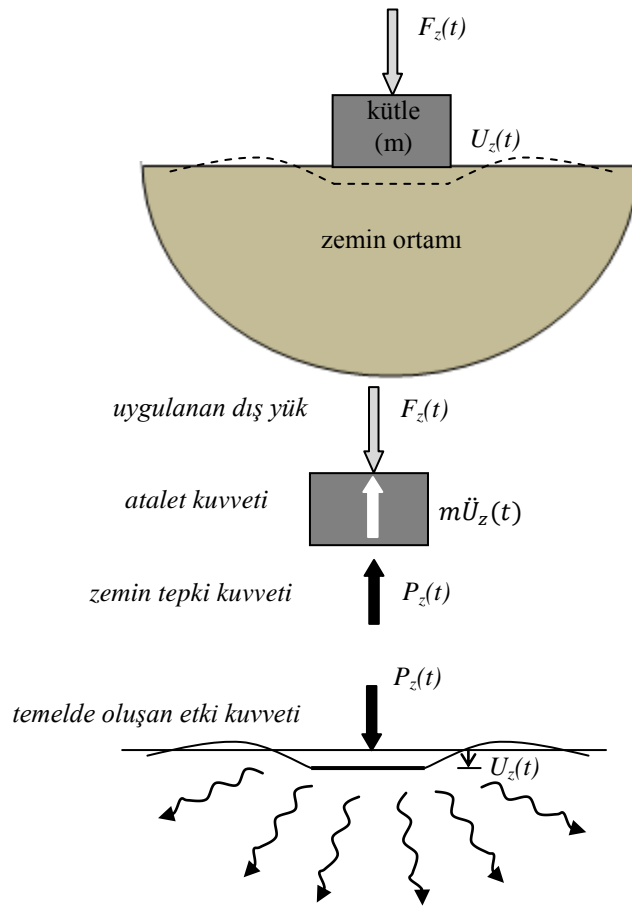
Empedans fonksiyonlarının kullanılması ve geliştirilmesi rijit-betonarme makine temel titreşimlerinin incelenmesi ile ortaya çıkmıştır (Gazetas, 1991). Genel olarak temelin tüm serbestlik dereceleri (ötelenme ve dönme) harmonik yük etkisi altında araştırılmış ve bir takım sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, nükleer santraller ve barajlar gibi rijit ve masif yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarında, empedans analizi kullanılarak yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak zemin ortamı elastik kabul edilerek çözümler yapılmıştır.

Harmonik bir yük etkisi altında titreşen rijit temel bloğu için hareket denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P(t) + m\ddot{U}(t) = F(t) = F * \sin(\omega t) \quad (2.10)$$

$$P(t) = K * U(t) \quad (2.11)$$

Burada, $F(t)$ etki eden harmonik dış kuvveti, $U(t)$ temelin yerdeğiştirmesini ve K ise dinamik empedans değerini ifade etmektedir. Örnek olarak düşey yük etkisi altında hareketin şematik olarak gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Düşey doğrultuda titreşen temel bloğu için dinamik etkileşim

Teorik ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki, zemin yüzeyinde “ P ” genliğinde uygulanan harmonik kuvvet ile bu kuvvet sonucunda oluşan yerdeğiştirme aynı frekans değerindedir. Fakat bunlar arasında belirli bir faz açısı olabilir.

$$P(t) = P * \sin(\omega t + A_1) = \bar{P} * e^{i\omega t} \quad (2.12)$$

$$U(t) = U * \sin(\omega t + A_1 + A_2) = \bar{U} * e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

Burada, \bar{P} ve \bar{U} kompleks sayılardır.

$$\bar{P} = P_1 + iP_2; \quad P = |\bar{P}| = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \quad (2.14)$$

$$\bar{U} = U_1 + iU_2; \quad U = |\bar{U}| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (2.15)$$

Sonuç olarak dinamik empedans (kuvvet-yerdeğiştirme oranı) değeri,

$$K = \frac{P(t)}{U(t)} = \frac{\bar{P}}{\bar{U}} = \bar{K} + i\omega C \quad (2.16)$$

formülüyle tanımlanmaktadır. \bar{K} frekansa bağlı rijitlik değerini, ωC katsayısı ise frekansa bağlı sönümü ifade etmektedir. Bu değer geometrik (radyasyon) sönümü ve malzeme sönümünü içermektedir. Dinamik empedans elde edildikten sonra sistemin hareket denklemi;

$$F(t) = m\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + \bar{K}U(t) \quad (2.17)$$

$$F = \bar{U}[(\bar{K} - m\omega^2) + i\omega C] \quad (2.18)$$

şeklinde tanımlanır. Yukarıdaki tanımlamalardan da anlaşılacağı gibi dinamik etki sonucunda temel titreşimlerinde zemin etkisi ya frekansa bağlı dinamik empedans ($K(\omega)$) değeri kullanılarak yada frekansa bağlı eşdeğer yay ($\bar{K}(\omega)$) ve sönüm ($C(\omega)$) parametreleri kullanılarak dikkate alınır. Bu parametreler belirli frekans değerleri için elde edildikten sonra hareket denkleminin çözümü, oluşacak yerdeğiştirmenin genliğini verir.

Literatürde dinamik empedans değerleri boyutsuz frekans (a_0) parametresine bağlı olarak tanımlanmışlardır (Mylonakis ve diğ., 2006).

$$a_0 = \frac{\omega B_t(R)}{c_s} \quad (2.19)$$

ω dış yükün açısal frekansını, $B_t(R)$ temelin yarı genişliğini veya yarıçapını, c_s ise zeminin kayma dalgası hızını göstermektedir. Boyutsuz frekansa bağlı olarak ifade edilen dinamik eşdeğer yay ve sönüm katsayıları, statik rijitliğe bir çarpan olarak dahil edilmekte böylece dinamik empedanslar hesap edilmektedir. En genel anlamda dinamik empedans fonksiyonları boyutsuz frekansa bağlı olarak,

$$K(\omega) = K_0(k(a_0) + ia_0c(a_0))(1 + 2i\xi) \quad (2.20)$$

formülü ile hesap edilebilir. Burada K_0 statik rijitliği, k ve c sırası ile frekansa bağlı rijitlik ve sönüm katsayılarını, ξ ise malzeme sönümünü ifade etmektedir.

Temellerin dinamik empedans değerlerinin belirlenmesine etki eden en önemli parametreler;

- a) temel plağı
 - geometri (dairesel, şerit, dikdörtgen)
 - gömülme tipi (yüzeysel, gömülü, kazık)
- b) zemin ortamı
 - zemin profili (derin üniform, tabakalı, kaya üzerinde zemin tabakası)
 - geometri (tabaka kalınlığı, yatay veya eğimli tabaka, yarı sonsuz ortam, ana kayaya oturan zemin ortamı)
- c) dış yükün frekansı

şeklinde sıralanmaktadır. Bu parametrelere bağlı olarak çeşitli hesap yöntemleri dört ana grupta toplanmaktadır.

- 1) Analitik ve yarı analitik yöntemler
- 2) Dinamik sonlu elemanlar metodu
- 3) Birleşik analitik-nümerik yöntemler
- 4) Yaklaşık yöntemler

1. yöntemde çok tabakalı zemin durumu ve dikdörtgen temeller ele alınabilir fakat gömülü temel durumu ele alınamaz (Luco, 1976).

2. yöntemle yüzeysel, gömülü ve kazıklı temel durumları ele alınabilir. Zeminin tabakalı oluşu, elastik olmayan malzeme davranışı dikkate alınabilir. Dikkate alınan analiz tipine bağlı olarak, aksinel aksisimetrik modelde dairesel temel, düzlem-şekildeğiştirme analizinde ise şerit temel durumu hesap edilebilir. Dikdörtgen temel durumu için üç boyutlu dinamik sonlu eleman analizlerinin yapılması gerekmektedir (Lysemer ve diğ., 1975).

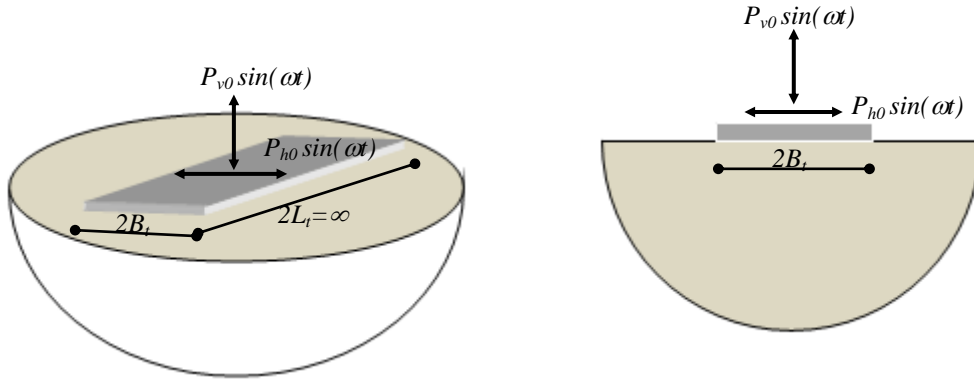
3. yöntemde analitik (sınır elemanlar yöntemi) ve nümerik (sonlu elemanlar yöntemi) yöntemlerin birlikte kullanılması ile sınır şartları yazılırken sınır elemanların katkısı, geometrinin ve malzeme özelliklerinin tanımlanmasında da sonlu elemanların katkısı dikkate alınarak dezavantajlı durumların ortadan kaldırılmasına çalışılmıştır (Spyrakos ve Chaojin, 2004).

Son olarak 4. yöntemle çok özel durumlar için problemin fiziksel ve mühendislik çözümü açısından basitleştirilmesi öngörülmektedir. Bu yaklaşımda problem ayrıntılı bir biçimde ele alınamamaktadır (Gazetas ve Tassoulas, 1987a).

Bu çalışmada yukarıda tanımlanan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak en uygun çözüm yönteminin seçilmesine çalışılmıştır. Çalışmanın başlıca amacı doğrusal olmayan malzeme davranışını dikkate almaktır. Sıralanan yöntemler içerisinde de malzeme davranışı en iyi sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile tanımlanmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada SEY kullanılarak problem, iki boyutlu düzlem-şekildeğiştirme analizi altında çözülecektir. Yukarıda da tanımlandığı gibi SEY’nde düzlem-şekildeğiştirme modeli altında şerit temel geometrisi kullanılabilir. Çalışmada dinamik analizler şerit temel durumu için yapılacaktır. Elde edilen empedans değerleri de şerit temellerin yapı-zemin etkileşimi analizlerinde kullanılacaktır.

2.1.2. Düzlem-şekildeğiştirme problemi için empedans analizi

Düzlem şekildeğiştirme probleminde empedans analizlerinin şerit temel durumu için yapılabileceği yukarıda anlatılmıştı. Elastik yarı sonsuz zemin ortamında sonsuza uzanan şerit temel durumu Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Üç boyutlu zemin-temel sisteminin düzlem sisteme indirgenmesi

Düşey ve yatay harmonik yük etkisi altında kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi;

$$\begin{Bmatrix} P_v(t) \\ P_h(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_v & 0 \\ 0 & K_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_v(t) \\ U_h(t) \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

Denklem (2.15)'de K_v ve K_h rijitlik matrisindeki frekansa bağlı düşey ve yatay yay rijitliğini, $P(t)$ etki eden harmonik kuvveti, $U(t)$ ise oluşan yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Statik ve dinamik durumda elastik ortamlar için empedans fonksiyonları elde edilmiştir. Fakat dinamik durum için şerit temel analizinde yalnızca sınırlı Poisson oranına ($\nu=0.3$ ve $\nu=0.4$) göre rijitlik değerleri hesaplanmıştır (Mylonakis ve diğ., 2006).

Bu çalışmada Adapazarı bölgesi için doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranışına bağlı olarak şerit temeller için frekansa bağlı rijitlik değerleri, elastik ortamlar için analitik ve deneysel olarak doğrulanmış statik empedans değerleri kullanılarak elde edilecektir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. Elastik zemine oturan şerit temeller için statik empedans değerleri (Gazetas, 1991)

Şerit Temel İçin Empedans Fonksiyonları ($2L \rightarrow \infty$)	
Düşey	$\frac{K_{v0}}{2L_t} = \frac{0.73G}{1 - \nu}$
Yatay	$\frac{K_{h0}}{2L_t} = \frac{2G}{2 - \nu}$

Harmonik dinamik yük etkisi altında düzlem-şekil değiştirme problemi olarak yapılacak analizlerin sonucunda her bir frekans parametresi için (a_0) düşey ve yatay doğrultulara ait rijitlikleri verecek çarpanlar elde edilecektir.

$$K_v = K_{v0} * k_v \quad (2.22)$$

$$K_h = K_{h0} * k_h \quad (2.23)$$

Denklem 2.22 ve 2.23'de k_v ve k_h sırasıyla düşey ve yatay doğrultular için elastik zemin durumunda boyutsuz frekans parametresine bağlı dinamik rijitlik katsayılarıdır.

2.2. Malzeme Davranış Modeli

SEY'nin yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde kullanılmasının başlıca amacı zemin malzeme davranışının hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranışı tanımlayacak şekilde ifade edilebilmesidir. Bu çalışmada empedans değerlerini elde etmek için temel-zemin sistemindeki dinamik yük-yerdeğiştirme ilişkisinin zaman bölgesindeki çözümü sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D (Brinkgreve ve diğ., 2002) bilgisayar programı aracılığı ile yapılmıştır.

Adapazarı bölgesi için elde edilecek olan rijitlik değerleri, zemin malzeme davranışının hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranış göstermesi durumları için ayrı ayrı elde edilecektir.

Doğrusal (elastik) izotropik homojen malzeme davranışı Hooke kanununun geçerli olduğu yani gerilme-şekildeğiştirme arasında lineer ilişkinin olduğunu tanımlar. Bu ilişkiyi tanımlamak için zemin malzemesinin Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) olmak üzere yalnızca iki parametresi yeterlidir (Plaxis, 2010). Plaxis programında kullanılan en basit malzeme modeli olan bu yaklaşımda gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı;

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

denklemini ile elde edilir. Bu denklemde, $\dot{\sigma}'$ efektif gerilme artış hızını, $\dot{\epsilon}$ ise şekildeğiştirme artış hızını ifade etmektedir. E' efektif elastisite modülünü, ν' efektif Poisson oranını tanımlamaktadır. Geoteknik problemlerin düzlem-şekildeğiştirme modeli olarak ele alınmasında şekildeğiştirme dağılımından dolayı Elastisite modülü ve Poisson oranı için böyle bir düzeltme gerekmektedir (Bowles, 1996). Bu davranış programın malzeme kütüphanesindeki Lineer Elastik Model altında tanımlanmaktadır. Bu model diğer malzeme davranışlarının da başlangıç durumunu oluşturmaktadır.

2.2.1. Doğrusal olmayan malzeme davranışı

Malzemelerin elastik ötesi davranışa geçişleri yani plastik hale geçişlerinin tanımlanmasında çeşitli etkileri öne sürerek kullanan hipotezler üç büyük grupta toplanmaktadır (İnan, 1973).

- a. Gerilme teorileri
- b. Şekildeğiştirme teorileri
- c. Enerji teorileri

Elastik davranıştan plastik davranışa geçiş birinci gruptaki teorilerde, elemanlarda oluşan gerilmelerin etkili olduğu, ikinci grupta şekildeğiştirmelerin etkili olduğu ve üçüncü grupta ise şekildeğiştirme enerjisinin etkili olduğu tezlerine göre tanımlanmaktadır.

Literatürde genel olarak malzemelerin yük etkisi altındaki dayanımları hesaplanırken elastiklik sınırı (akma sınırı) veya akma yüzeyleri sonlu eleman analizlerinde temelde üç farklı model kullanılarak belirlenmektedir (Budynas, 1999).

1. Maksimum kayma gerilmesi teorisi (Tresca teorisi)
2. Maksimum çarpılma enerji teorisi (von Mises teorisi)
3. Mohr-Coulomb yenilme teorisi

Tresca malzeme teorisinde, bir elemanda oluşacak maksimum kayma gerilmesi kayma akma dayanımı ile sınırlandırılmıştır.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 0.5S_Y \quad (2.25)$$

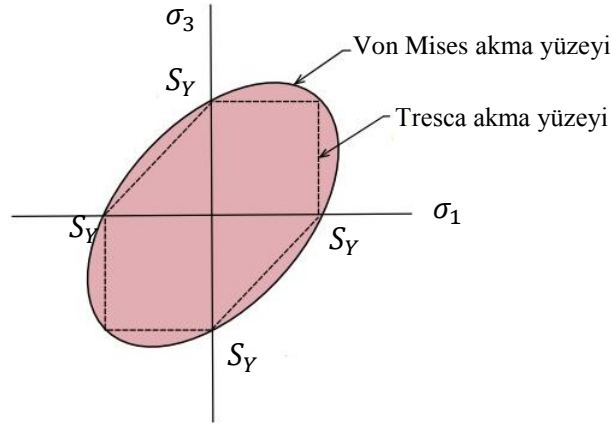
Burada σ_1 ve σ_3 maksimum ve minimum asal gerilmeleri, S_Y ise çekmedeki akma dayanımını ifade etmektedir. Sünek malzemelerin elastik sınırlarının belirlenmesinde kullanılan bu yaklaşım kayma dayanımının önemli olduğu malzemelerde kullanılır. Maksimum kayma gerilmesi Tresca gerilmesi (τ_{Tresca}) olarak ta adlandırılmaktadır. Malzemenin elastik halden plastik hale geçişi τ_{Tresca} kayma gerilmesinin kritik bir değere ulaşması ile olur. Çekme ve basınçta eşit davranış gösteren malzemeler için uygun sonuçlar vermektedir.

Sünek ve izotropik malzemelerin akma kriterlerinin belirlenmesinde geniş uygulama yeri bulan diğer bir yöntem ise von Mises teorisidir. Bu teori enerji kavramına dayanmaktadır. Bu yaklaşımda toplam elastik enerji, malzemenin hacim değişmesiyle bağımlı olan kısım ve kayma sonucu olan distorsiyon enerjisinden oluşmaktadır. Akma noktasındaki basit çekme sonucu elde edilen kayma çarpılma enerjisini bileşik gerilme halindeki distorsiyon enerjisine eşitleyerek akma kriteri elde edilir (Popov, 1968).

Düzlem gerilme durumunda eşdeğer von Mises gerilmesi;

$$\sigma_{von Mises} = S_Y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3} \quad (2.26)$$

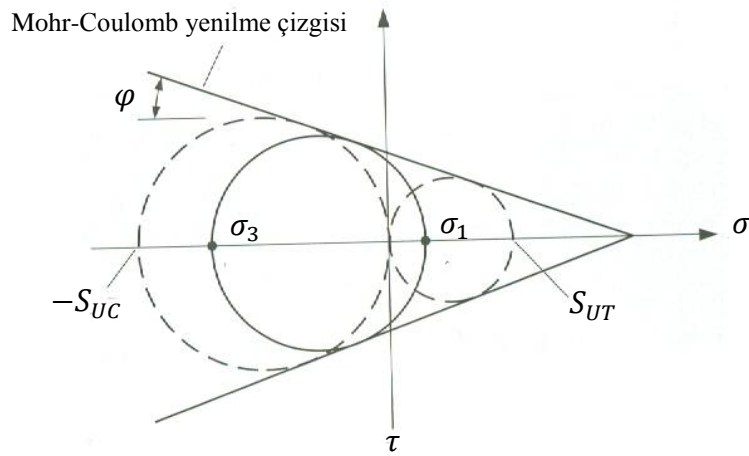
denklemleri ile bulunur. Bu teori uzaması fazla olan malzemeler için başarılı sonuçlar vermektedir. Tresca ve von Mises teorileri için akma yüzeyleri Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Tresca ve von Mises akma kriterleri

Şekil 2.8'de sınırların içerisi elastik bölgeyi tanımlamakta, sınırların dışındaki gerilme durumu ise plastik davranışı ifade etmektedir.

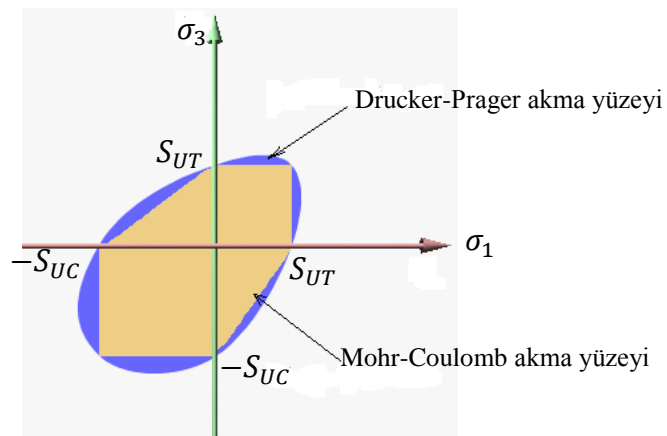
Yukarıda açıklanan teoriler sünek davranış gösteren malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Zemin ve beton gibi gevrek olan, çekme dayanımları basınç dayanımlarına oranla çok küçük olan malzemeler için ise plastikleşme sınırı literatürde belirli sayıda teorilerle tanımlanmaktadır. Fakat en temelde Mohr-Coulomb akma kriteri gelmektedir. Bu teorinin temeli ya kayma düzlemleri arasındaki sürtünmeye yada oluşan en büyük gerilmeye karşı gelen Mohr dairesine dayanmaktadır. Bu teoride akma, herhangi bir Mohr dairesinin, yenilme çizgisinin üstüne veya dışına gelmesi ile olur.



Şekil 2.9. Mohr-Coulomb teorisinde yenilme (Budynas, 1999)

Şekil 2.9’da S_{UC} basınç dayanımını, S_{UT} ise çekme dayanımı ifade etmektedir. Zemin malzemesinin yenilme yüzeylerinin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir.

Yukarıda tanımlanan akma kriterlerine ilave olarak beton ve zemin gibi malzemelerin yenilme durumlarını tanımlamak için geliştirilen modellerden birisi de Drucker-Prager teorisidir. Bu teorinin hesap mantığı von Mises akma kriterine benzemekle birlikte ondan farklı olarak bu teoride, çekme ve basınç dayanımları birbirinden farklıdır. Basınç dayanımının yüksek olduğu malzemelerde kullanılır. Mohr-Coulomb kriteri ile benzer davranışları tanımlar (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager yenilme kriterleri

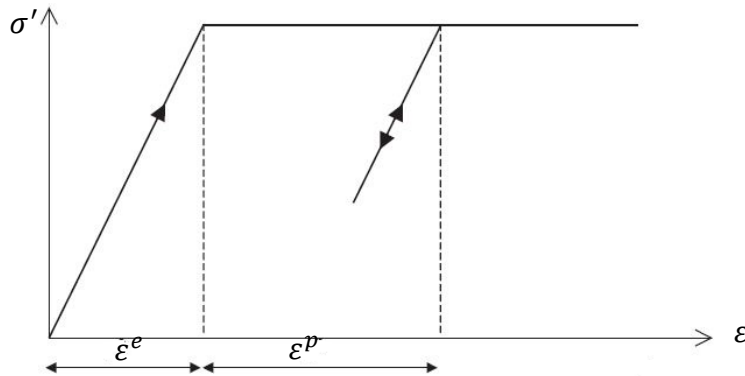
Tablo 2.3. Malzeme akma dayanım kriterleri ve özellikleri

Akma kriteri	Özellikleri
Tresca	Sünek malzeme (çelik vb.), basınç ve çekme dayanımları eşit, maksimum ve minimum asal gerilmeler kullanılır
Von-Mises	Sünek malzeme (çelik vb.), basınç ve çekme dayanımları eşit, tüm asal gerilmeler kullanılır
Drucker-Prager	Gevrek malzeme (beton, gevşek zemin)
Mohr-Coulomb	Gevrek malzeme (zemin ve kaya)

Genel olarak temelde tanımlanmış olan akma kriterleri ve kullanım yerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2.3'de verilmiştir. Doktora çalışması olarak yapılan bu tezde zeminler için etkili sonuçlar vermesinden dolayı Moh-Coulomb yenilme kriteri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde doğrusal olmayan malzeme tanımlaması yapılırken, Mohr-Coulomb teorisine dayalı lineer elastik-mükemmel plastik (elasto-plastik) malzeme modeli kullanılmıştır.

2.2.2. Lineer elastik mükemmel plastik malzeme modeli

Doğrusal olmayan malzeme davranışını tanımlamak için kullanılan bu modelde toplam şekildeğiştirme elastik ve plastik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Elastik-mükemmel plastik davranış

ε^e elastik şekildeğiştirmeyi, ε^p ise plastik şekildeğiştirmeyi ifade etmektedir. Mohr-Coulomb akma kriterinde iki boyutlu durumda yenilme fonksiyonları;

$$f_a = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\varphi - c * \cos\varphi \quad (2.27)$$

$$f_b = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\varphi - c * \cos\varphi \quad (2.28)$$

şeklindedir. Denklemlerde plastik model parametrelerini malzemenin kohezyon (c) ve kayma direnci açısı (φ) değerleri tanımlamaktadır. Akma fonksiyonlarına ilave olarak plastik potansiyel fonksiyonları da şişme açısına (ψ) bağlı olarak elde edilmektedir (Brinkgreve ve diğ., 2002).

$$g_a = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\psi \quad (2.29)$$

$$g_b = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\psi \quad (2.30)$$

Sonlu eleman analizlerinde Mohr-Coulomb malzeme modeli olarak ta ifade edilen bu davranışı tanımlamak için toplamda beş parametre kullanılmaktadır. Elastiklik özelliği, elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) ile tanımlanmaktadır. Plastiklik özelliği ise kohezyon (c), kayma direnci açısı (φ) ve şişme açısı (ψ) ile tanımlanmaktadır.

Elasto-plastik malzeme modelinde, etkileşim yüzeyinde küçük deformasyonların oluşabileceği elastik ve kalıcı deformasyonların görülebileceği plastik davranışı ayırt etmek için Coulomb kıstasından yararlanılmıştır. Ara yüzeyde plastik davranış için kayma gerilmesi (τ),

$$|\tau| = \sigma_n \tan\varphi_i + c_i \quad (2.31)$$

olarak verilmiştir. Burada φ_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 denklem 2.32'de verilen kurallara bağlı olarak hesaplanır.

$$\begin{aligned} \tan\varphi_i &= R_{inter}\tan\varphi_{zemin} \leq \tan\varphi_{zemin} \\ c_i &= R_{inter}c_{zemin} \end{aligned} \quad (2.32)$$

$\psi = 0^\circ$ için $R_{inter} < 1$, aksi durumda $\psi_i = \psi_{zemin}$

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 ($R_{inter} \leq 1$) olması gerekir. Dayanım azaltma katsayısı;

$$\begin{aligned} R_{inter} &= \frac{\tan\Delta}{\tan\varphi} \\ \Delta &= \frac{2}{3}\varphi \end{aligned} \quad (2.33)$$

formülüyle hesaplanmaktadır (Visone ve Magistris, 2007). Burada Δ zemin-yapı elemanı sürtünme açısıdır.

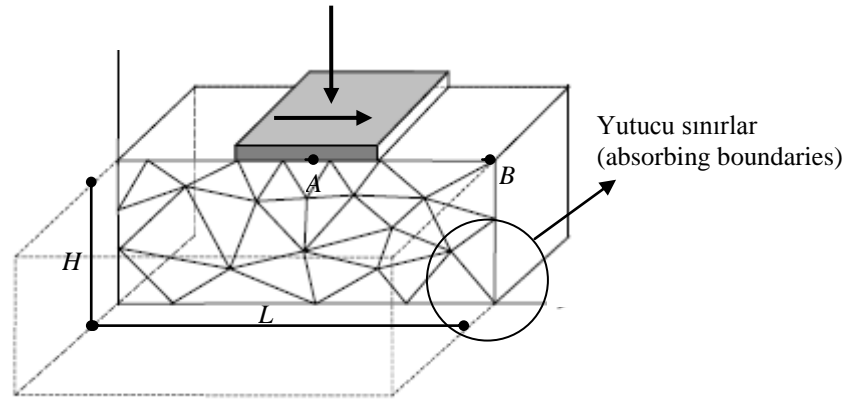
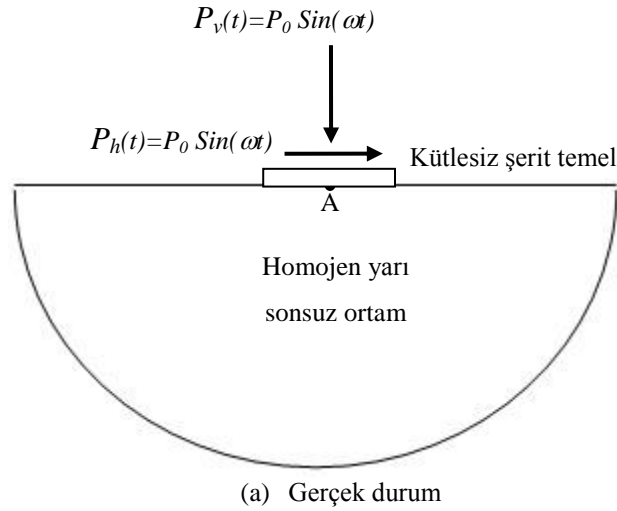
Bu bölümde empedans fonksiyonlarının elde edilmesinde izlenecek yöntem araştırılmış ve sunulmuştur. Ayrıca şerit temel plağına ait doğrusal olmayan empedans fonksiyonlarının hesaplanmasında kullanılacak doğrusal statik empedans değerleri verilmiştir. Zemin malzemesi için doğrusal olmayan davranışı tanımlayabilmek amacıyla kullanılacak elasto-plastik malzeme modelinde akma sınırının tanımlayan Mohr-Coulomb yenilme kriterinin özellikleri de açıklanmıştır.

BÖLÜM 3. SONLU ELEMAN ANALİZLERİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER VE MODELİN DOĞRULANMASI

Sonlu eleman yönteminde, hem karmaşık geometriye sahip sistemler bilinen geometriye sahip sonlu elemanlara bölünmekte hem de malzeme davranışları yapılan arazi ve laboratuvar deneylerinin yardımıyla daha uygun bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu yöntemin geçmişteki en büyük dezavantajı yapı-zemin etkileşimi analizi gibi büyük sistemlerin çözümünde çok fazla elemanın kullanılmasıdır. Her bir eleman için şekil fonksiyonları yardımıyla denge denklemlerinin tüm sistem için yazılması büyük hesap yükleri getirmekte böylece çok uzun süreli analizler ortaya çıkmaktadır. Ancak gelişen bilgisayar teknolojisi bu yoğun ve karmaşık hesap adımlarını azaltmış ve hesap sürelerini kısaltmıştır. Gelişen teknolojiye paralel olarak yapı-zemin etkileşimi problemi gibi karmaşık sistemler daha etkili bir şekilde çözülebilmekte ve uygulamada da SEY paket programlar aracılığıyla daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

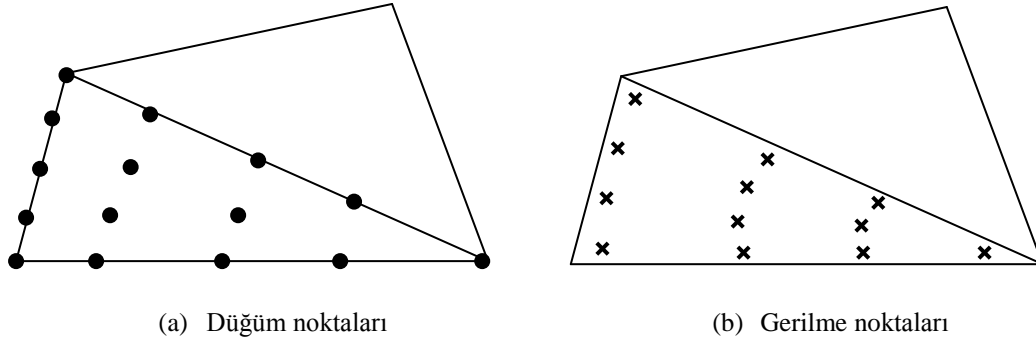
3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Yapı-Zemin Etkileşim Problemine Etki Eden Faktörler

Bu çalışmada sonlu eleman analizleri için Plaxis programı kullanılacaktır. Yapılan analizlerin doğru sonuçlar vermesi için kurulacak modelde analizlere etki eden bütün parametreler detaylı bir şekilde araştırılacak ve en uygun şekilde kurulması sağlanacaktır. Analizleri yapılacak yapı-zemin etkileşim probleminin SEY ile idealize edilmesinin şematik görünümü Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu modelde temel-zemin sistemi düzlem şekildeğiştirme problemi olarak ele alınmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Sonlu eleman modelinin (SEM) kurulması

Sonlu eleman analizlerine başlarken öncelikle zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında kullanılacak eleman tipine karar vermek gerekir. Plaxis programının eleman kütüphanesinde düzlem elemanlar için, üçgen geometriye sahip 6 düğüm noktalı ve 15 düğüm noktalı olmak üzere iki farklı sonlu eleman tipi mevcuttur. 6 düğüm noktalı eleman 3 adet gerilme noktasına sahiptir. 15 düğüm noktalı eleman ise 12 adet gerilme noktasına sahiptir. Çok önemli problemlerin çözümünde (göçme analizi vs.) 15 düğüm noktalı elemanla yapılan analizler çok daha doğru ve yüksek kalitede gerilme sonuçları vermektedir (Brinkgreve, 2002). Elemanlar her bir düğüm noktasında düşey ve yatay ötelenme olmak üzere iki serbestlik derecesine sahiptir. Bu çalışmada deplasmanları 4. dereceden enterpolasyon ile ele alan 15 düğüm noktalı sonlu elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. 15 düğüm noktalı üçgen eleman

Analizlerde kullanılacak şerit temel, $h= 0.25$ m kalınlığında ve $B_t= 1$ m yarı genişliğinde geometriye sahiptir. Ayrıca betonarme malzemedен imal edilmiştir. Temel-zemin sisteminin sonlu eleman analizinde şerit temel plağı, her bir düğüm noktasında iki ötelenme ve bir de dönme serbestlik derecesine sahip çubuk eleman kullanılarak geometrik açıdan modellenmiştir. Çubuk elemanların hesap yaklaşımları Mindlin kiriş teorisine göre yapılmaktadır. Bu çalışmada zemin ortamının ayrıklaştırılmasında 15 düğüm noktalı üçgen eleman kullanıldığı için temelin modellenmesinde de 5 düğüm noktalı çubuk eleman seçilmiştir.

Sonlu eleman analizlerinde yapı-zemin dinamik etkileşim problemine etki eden faktörlerin incelenmesinde Adapazarı bölgesi için zayıf dayanımı tanımlayan zemin özellikleri kullanılmıştır (Sert, 2003). Malzeme modeli olarak doğrusal davranış seçilmiştir. Kullanılan zemin ve şerit temel malzeme özellikleri Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Parametre	Boyut	Temel	Zemin
Elastisite modülü (E)	[kN/m ²]	$3 \cdot 10^7$	20000
Poisson oranı (ν)	[-]	0.2	0.33
Birim hacim ağırlık (γ)	[kN/m ³]	24.5	18.5

Dinamik etki olarak temel üzerinde yatay ve düşey doğrultuda ayrı ayrı olmak üzere harmonik karakterde bir yük uygulanmıştır. Harmonik yükün genliği $P_0= 100$ kN olarak alınmıştır. Bu çalışmada odaklanan frekans aralığı deprem hareketinin etkin

frekans içeriğidir (0-5 Hz). Bu nedenle SEM' nin kurulmasında etki eden faktörleri belirlerken yapılacak analizlerde kullanılan dış yükün frekans değeri, deprem hareketinin etkin frekans aralığı da dikkate alınarak 5 Hz alınmıştır.

Şekil 3.1'de kurulan SEM'nde A , yükün alt noktasını B ise zemin yüzeyinde sınırdaki noktayı tanımlamaktadır. Zemin ortamının genişliği L , yüksekliği ise H ile ifade edilmiştir.

3.1.1. Boyut etkisi ve sönüm

Sınırsız ortam olarak kabul edilen zemin bölgesinin sonlu serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülerek modellenmesi uygun sınır şartlarının ve sonlu bölgenin kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir.

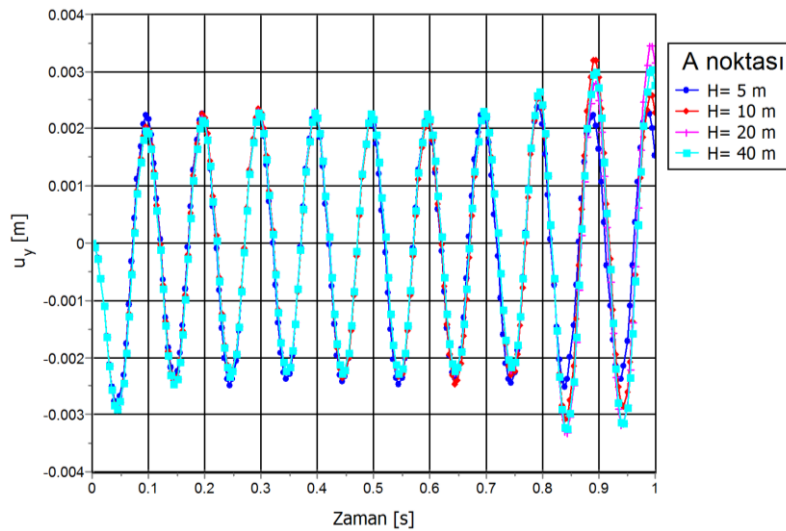
Dalga yayılım probleminin sonlu eleman simülasyonu için yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için yapay sınırlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sınırlarda viskoz sönümleyici elemanlar (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969) ve sonsuz elemanlar (Dasgupta, 1982; Wolf ve Song, 1994) yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğer ayrıklaştırılan bölgenin sınırları yeterli derecede uzakta seçilmemiş ise, bölgenin kesim noktalarında soğurgan (geçirgen) sınır şartları tanımlı olsa bile tam geçirimsizlik sağlanamadığından dolayı uzaklaşan ve yansıyan dalgaların çakışmasından analiz sonuçlarında beklenmedik sayısal belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir.

Dinamik analizlerde viskoz yapay sınırların tanımlanmasındaki belirsizlikler sınırlarda olası dalga yansımalarının yapısal davranışının kararlılığını bozabilir. Bu soruna yol açmadan kalıcı titreşimi elde etmek için ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin sınırlarını statik çözümlere göre daha uzakta oluşturmak güvenli bir çözüm yoludur. Yapılan araştırmalardan bu özel sınır şartlarının üstyapıdan en az taban genişliğinin 8-10 katı kadar uzakta olacak şekilde düzenlenmesi gerektiği önerilmektedir (Rosset ve Kausel, 1976).

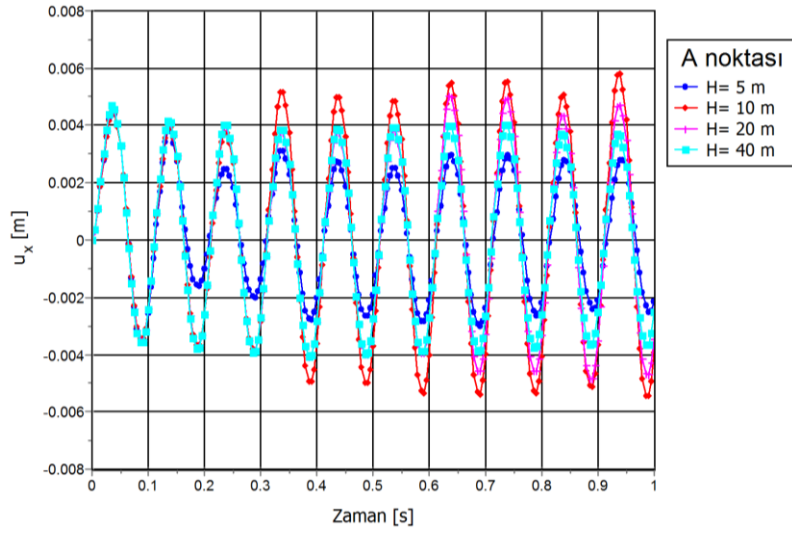
3.1.1.1. Ayırıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin geometrisi

Burada öncelikle ayırıklaştırılan zemin bölgesi boyutlarının (H , L), harmonik yük etkisi altında zemin ortamında oluşacak dalga yayılımına etkisi düşey ve yatay doğrultular için ayrı ayrı incelenmiştir (Şekil 3.1b).

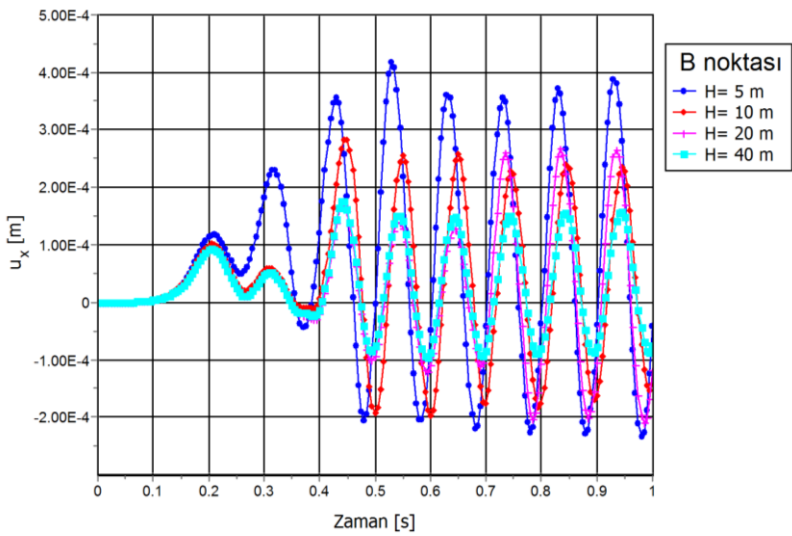
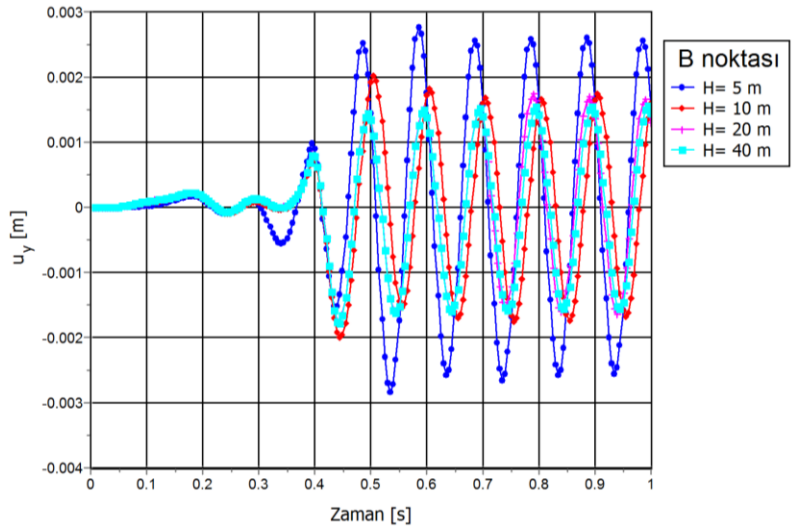
İlk olarak ayırıklaştırılan sonlu bölgenin yüksekliği incelenmiştir. Bölgenin genişliği yukarıda tanımlanan, sınır şartlarının temel genişliğinin 8-10 katı olması kuralı dikkate alınarak 50 m olacak şekilde sabit alınmıştır. Sınır şartları, yutucu sınır koşullarının standart değerleri alınarak belirlenmiştir. Bu tanımlamalar doğrultusunda sonlu eleman analizleri yapılmış ve ayırıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin dalga yayılımına etkisi incelenmiştir. Yüksekliğin değişiminin temel alt noktasında (A noktası) ve yüzey sınır uç noktasında (B noktası) yerdeğiştirme-zaman ilişkisine etkisi düşey ve yatay doğrultu için ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 3.3-3.4).



Şekil 3.3. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin A noktasındaki davranışa etkisi



Şekil 3.3. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin A noktasındaki davranışa etkisi (devamı)



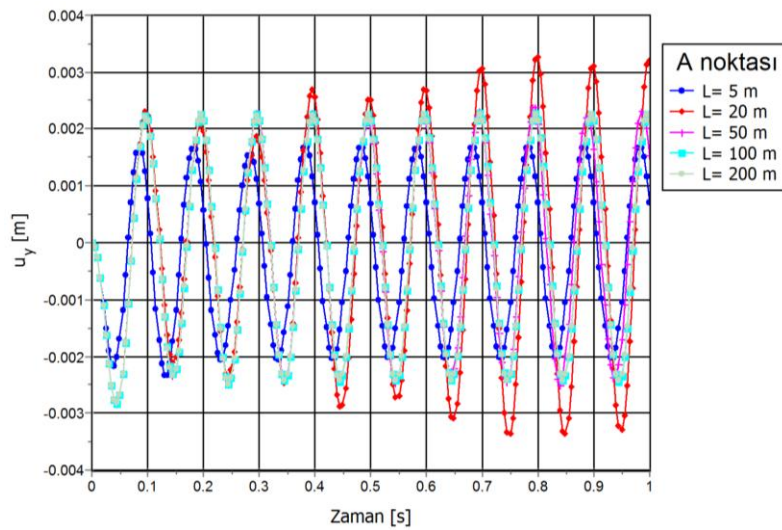
Şekil 3.4. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin B noktasındaki davranışa etkisi

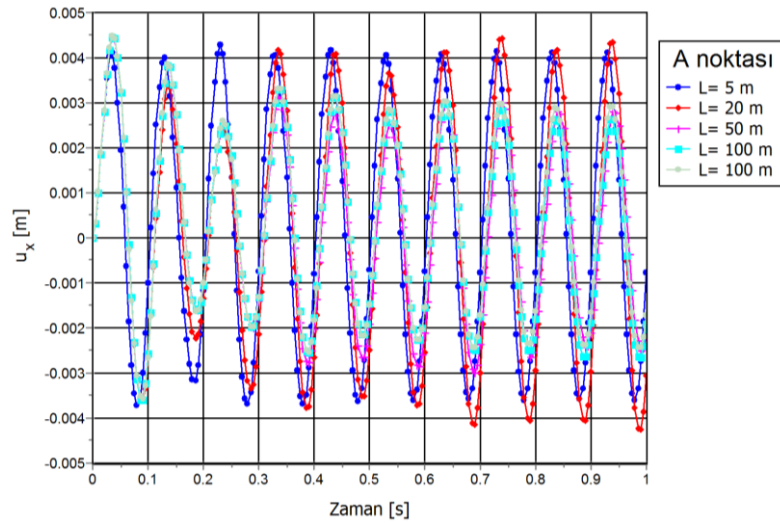
Zemin yüksekliğinin yükün alt noktasındaki (*A* noktası) dinamik davranışa etkisi incelendiğinde düşey yük etkisi altında yükseklik değişiminin oluşan yerdeğiştirmenin genliğine ve zaman geçişine bir etki yapmadığı görülmüştür. Yatay yük etkisi altında analizler incelendiğinde ise yükseklik değerinin $H = 20$ m ve sonrası değerleri için yerdeğiştirmenin genliği ve zaman geçişinin harmonik davranışı daha iyi yansıttığı görülmüştür (Şekil 3.3).

Yüzey sınır uç noktasında (*B* noktası) ayrıklaştırılan zemin bölgesi yüksekliğinin dinamik davranışa etkisi de incelenmiştir. Şekil 3.4'e bakıldığında düşey yük etkisi altında $H = 10$ m ve sonrası için yerdeğiştirme genliği ve davranışı değişmemektedir. Fakat yatay yük etkisi altında değişim görülmektedir. Burada zemin yüksekliği arttıkça sınırda yatay yerdeğiştirmenin zaman geçişi daha kararlı bir davranış sergilemektedir.

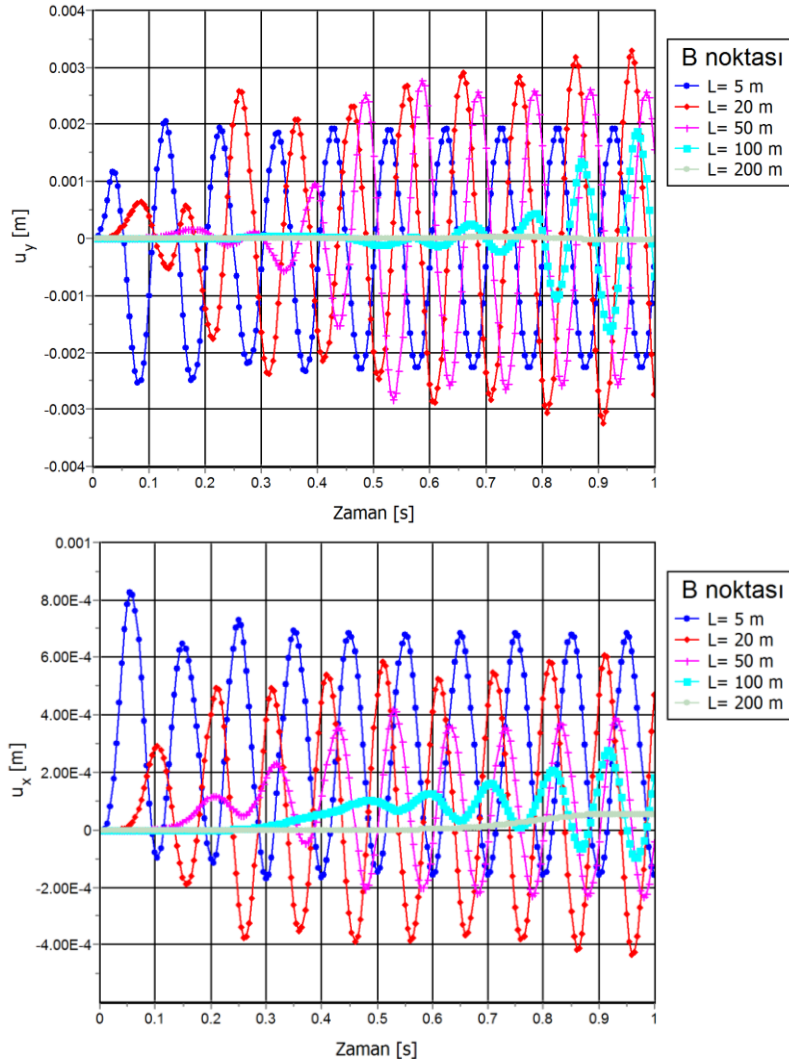
Yukarıdaki sonuçların ve oluşturulacak sonlu eleman bölgesi boyutlarının çözüm sürecine etkisi de dikkate alınarak ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesi yüksekliğinin $H = 20$ m olarak alınması uygun görülmüştür.

Bölge yüksekliği belirlendikten sonra $H = 20$ m alınarak ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin genişliği üzerine analizler yapılmıştır (Şekil 3.5-3.6).





Şekil 3.5. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi genişliğinin A noktasındaki davranışa etkisi



Şekil 3.6. Ayırıklaştırılan zemin bölgesi genişliğinin B noktasındaki davranışa etkisi

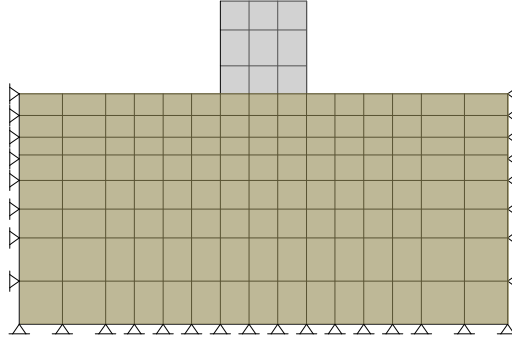
Yatay ve düşey yük etkisi altında A noktasındaki yerdeğiştirme-zaman ilişkisine bakıldığında ayrıklaştırılan zemin bölgesi genişliğinin $L= 50$ m ve sonrası değerleri için yerdeğiştirme genliği ve davranışı benzer şekildedir. Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesi genişliğinin 50 m'den sonraki değişimi sonuçları etkilememektedir. Ayrıca $L = 50$ m ve sonrası değerleri yukarıda bahsedilen ayrıklaştırılan bölge sınırlarının temel genişliğinin 8-10 katı (42 m) olması koşulunu da sağlamaktadır (Şekil 5). Bölge genişliğinin B noktasındaki yerdeğiştirme-zaman ilişkisine etkisi incelendiğinde, yanal açılım uzunluğunun zemin ortamının dalga yayılımına etkisi çok net olarak görülmektedir. Bölge genişledikçe B sınır noktası gelen dalganın genliği azalmakta ve neredeyse sifıra yaklaşmaktadır (Şekil 3.6). Burada ayrıklaştırılan zeminin genişliğine karar vermede yükün altında davranış daha etkili olmaktadır. Çünkü dalgaların sınırlardan yansıyıp sisteme geri dönmesi ancak yük altındaki tepkiyle kontrol edilebilir.

Bu sonuçlar etkisi altında oluşturulacak sonlu eleman bölgesinin genişliği $L = 50$ m olarak belirlenmiştir.

3.1.1.2. Sınır şartları ve geometrik sönüm

Dinamik yük etkisi altında geometrik uygunluk ve denge koşulları dışında zemin ortamında sağlanması gereken başka bir koşul da zeminin “radyasyon sönümü” etkisidir. Dinamik etkiler sonucunda zemin ortamında yayılan dalgalar, bölgenin sonsuzluğu nedeniyle yayılımla beraber sönüme uğrarlar. Ortamda oluşan enerjinin bir kısmı zeminin dinamik malzeme davranışından tamamı ile bağımsız olarak yalnızca geometrik özelliklerinden dolayı sönümlenmektedir. Bu duruma zeminin geometrik özelliği etki ettiği için “geometrik sönüm” olarak ta ifade edilmektedir (Kırtel, 2007).

Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinin sınırlarında tüm serbestlik derecelerinin tutulması ve yerdeğiştirmelerin sıfırlanması durumunda yapıdan geometrik sönüm yolu ile dalga enerjisinin uzaklaştırılması mümkün olmayacaktır. Yayılan dalgalar sınırlara çarpacak ve yapı-zemin sistemine geri dönecektir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Sınırlarda yerdeğişirmelerin sıfırlanması

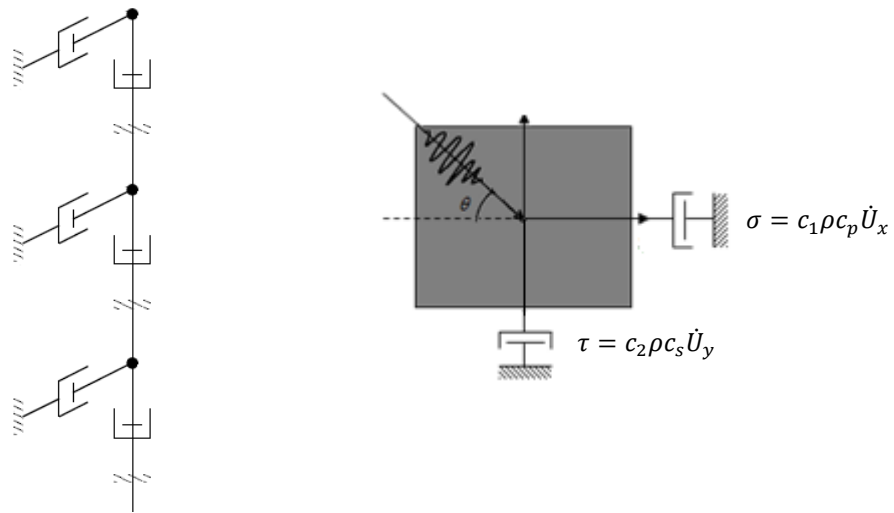
Bölge sınırlarında tüm serbestlik dereceleri serbest bırakılır ise geometrik sönüm hiç ele alınmamış olur. Model boyutları yeteri kadar büyük seçilirse ve dinamik malzeme davranışı (malzeme sönümü) iyi tanımlanırsa sınırların serbest bırakılması sonuçları etkilemeyebilir. Fakat bu durumda çok büyük model boyutlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Dinamik yük etkisinin sonlu zemin bölgesinin belirli bir kısmında oluşması ve zemin ortamında dış yük sonucu oluşan dalgaların kaynaktan dışa doğru yayılması durumunda (yer hareketi dışındaki etkiler), kurulan modelin sınırlarının tanımlanmasında en çok kullanılan ve kabul gören sınır koşulları özel viskoz sınırlardır (yutucu sınırlar). Bu tür sınır koşulları ile zemin ortamında yayılan dalgaların sınırlardan yansiyarak sisteme geri dönmesi engellenerek ikincil etkilerin oluşması önlenmekte ve ayrıca sonsuz zemin bölgesinin enerji iletim özelliği de tanımlanmaktadır (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969). Bu tür sınır koşulları sonlu eleman uygulamalarında kolay bir şekilde uygulanabilir. İçeriğinde sınırlardaki bütün düğüm noktalarında tüm serbestlik dereceleri sönümleyicilerle tanımlanmaktadır (Şekil 3.8). Yutucu sınırlar tarafından sınırlarda soğurulan normal ve kayma gerilmeleri;

$$\sigma = c_1 \rho c_p \dot{U}_x \quad (3.1)$$

$$\tau = c_2 \rho c_s \dot{U}_y$$

ifadeleri ile elde edilmektedir.



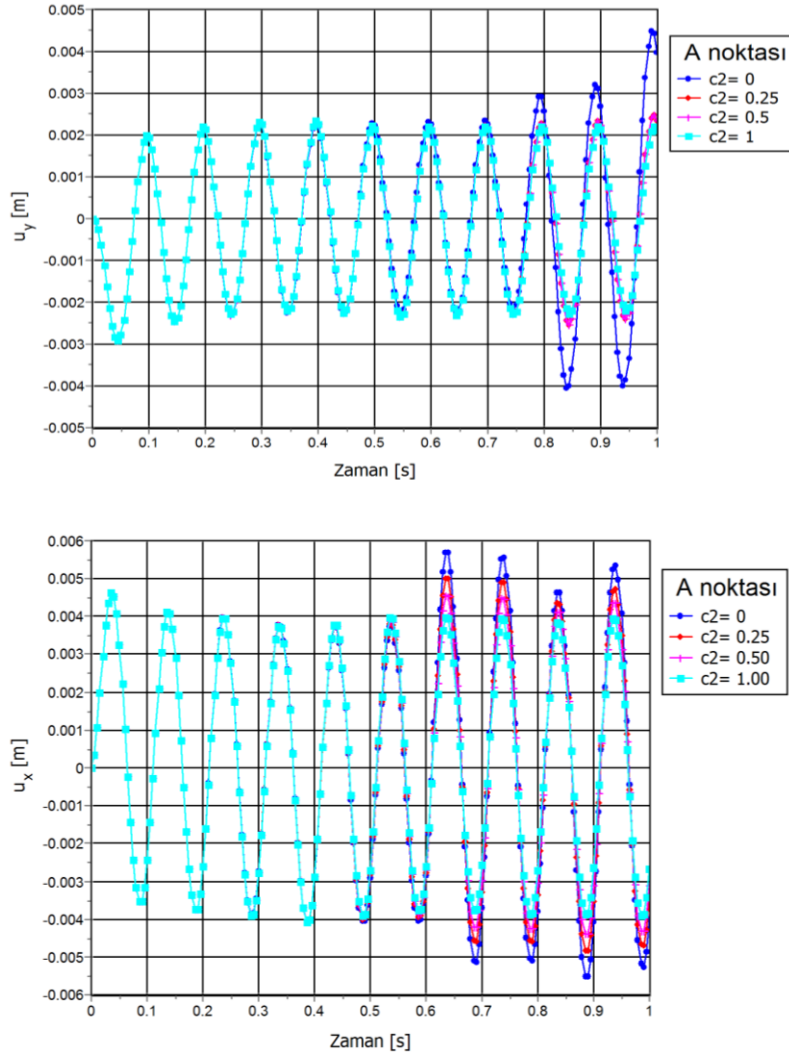
Şekil 3.8. Viskoz sönümleyici yutucu sınırlar (absorbing boundaries)

Burada c_1 ve c_2 yumuşatma (relaxation) katsayılarıdır. c_p ve c_s basınç ve kayma dalgası hızlarını, ρ malzeme yoğunluğunu tanımlamaktadır. \dot{U}_x ve \dot{U}_y ilgili düğüm noktasındaki normal ve teğetsel hızlardır.

Yapılan çalışmalarda sınırlara gelen basınç ve kayma dalgalarının absorbe edilmesi için yumuşatma katsayılarının, dalgaların sınırlara geliş açısına ve malzemenin Poisson oranına bağlı değişimleri elde edilmiştir. Farklı Poisson oranlarının davranışa etkisi olmadığı, katsayıların değişiminin tamamıyla sınıra gelen dalganın geliş açısına bağlı olduğu görülmüştür.

En fazla enerji yutulması $c_1 = c_2 = 1$ durumunda gerçekleşmektedir. Dalganın geliş açısının 30° den büyük olması durumunda bu değer için mükemmel yakın sonuçlar elde edilmektedir. Daha düşük açı değerlerinde bazı yansımalar ortaya çıkmıştır. Basınç dalgaları sınırlara dik geldiği için literatürde $c_1 = 1$ alınması uygun görülmüştür (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969; Brinkgreve ve diğ., 2002). Kayma dalgalarının ise sınırlarda rasyonel ölçüde geçirimsizliği sağlamak için $c_2 = 0.2-0.3$ arasında tavsiye edilmiş ve bir takım araştırmaların yapılması önerilmiştir (Brinkgreve ve diğ., 2002). Çünkü geliş açısı kritik bir değerden küçük ise bazı özel durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple c_2 yumuşatma katsayısının belirlenmesi için 0-1 aralığında düşey ve yatay yükler etkisi altında analizler yapılmıştır. Sonuçlar

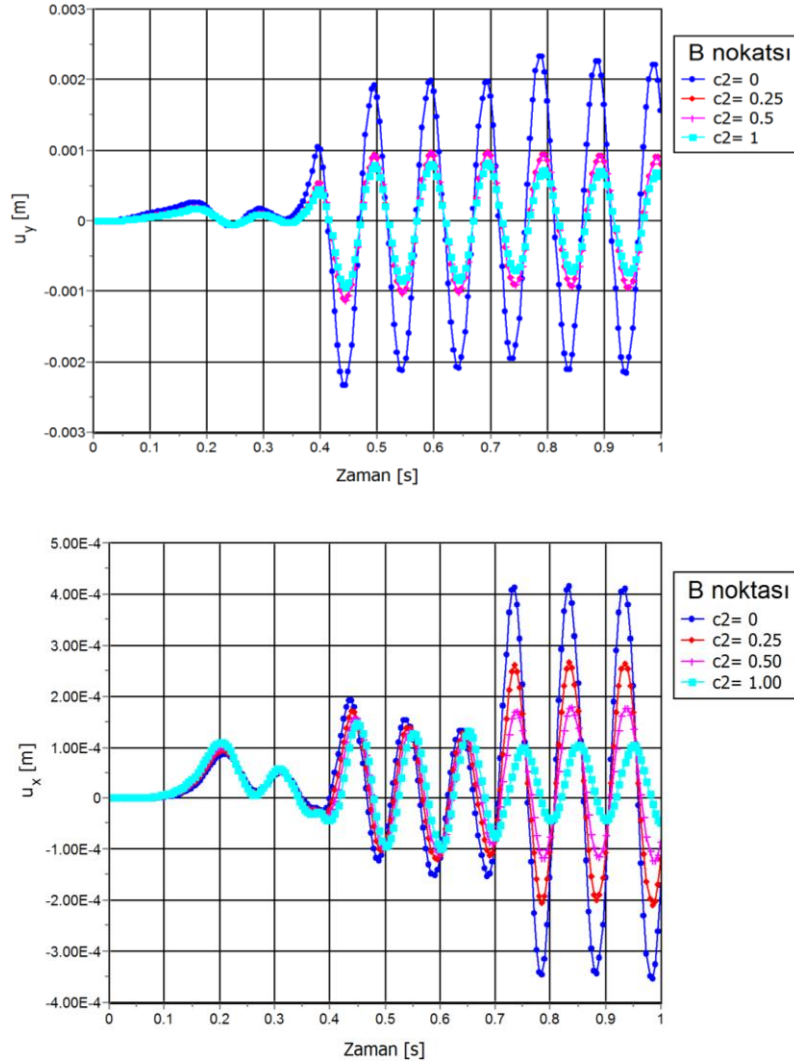
yükün alt noktası (*A* noktası) ve yüzey sınır uç noktası (*B* noktası) için karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir (Şekil 3.9-3.10).



Şekil 3.9. c_2 katsayısının *A* noktasındaki davranışa etkisi

Şekil 3.9 incelendiğinde c_2 yumuşatma katsayısının değişimi yükün hemen altındaki dinamik tepkiyi pek etkilememektedir. Düşey ve yatay yük etkisi için katsayının sıfır olması yani ilgili doğrultudaki sınırların serbest bırakılması durumu için az da olsa bir farklılık söz konusudur. Ayrıca yatay yük etkisi altında katsayının değeri arttıkça çok az miktarda bir farklılık görülmektedir. Bu farklılık ihmal edilebilecek seviyededir. Bu değişimin olmasının sebebi ise yatay yükün sınıra dik uygulanmasıdır. Sonuç olarak katsayının değişiminin yükün altındaki davranışa

etkisi yok denecek kadar azdır. Bunun nedeni zemin bölgesi boyutlarının yeterli ölçüde alınmasıdır.



Şekil 3.10. c_2 katsayısının B noktasındaki davranışa etkisi

Yüzey sınır uç noktasındaki davranış incelendiğinde ise katsayının artması sınırlarda oluşan yerdeğiştirmenin davranışını değiştirmemekle birlikte genliğini azaltmaktadır. Buda zaten beklenen bir sonuçtur. Çünkü $c_2 = 0$ olması sınırlarda yerdeğiştirmeler serbest bırakıldığını $c_2 = 1$ olması ise maksimum soğurmanın olduğunu ifade etmektedir (Şekil 3.10).

Yukarıdaki analizler ve literatürdeki tavsiyeler doğrultusunda viskoz yutucu sınırlar için yumuşatma katsayıları $c_1 = 1$ ve $c_2 = 0.25$ olarak alınmıştır.

3.1.1.3. Malzeme sönümü

Düzlem-şekildeğiştirme modeli olarak ele alınan yapı-zemin etkileşim problemlerinin analizinde geometrik sönümün yanında zeminin dinamik malzeme özelliklerinden dolayı histeretik sönümün de (malzeme sönümü) dikkate alınması gerekmektedir. Her iki sönüm etkisi ile dinamik etki sonucunda zemin ortamında yayılan dalga hareketinin şeklinde ve genliğinde önemli değişimler görülmektedir. Bu alanda yapılmış önemli çalışmaların büyük bir kısmında halen sönüm parametresinin tanımlanmasında genel kabul görmüş bir yöntemin gelişimi için başarı tam anlamı ile elde edilememiştir. Bunun yerine mühendislik amaçlarına uygun olarak sönümün sayısal hesaplara katılabilmesi için bazı önlemler alınmıştır.

Bu çalışmada viskoz etkilerden dolayı oluşacak malzeme sönümünü tanımlamak için Rayleigh yaklaşımı kullanılmıştır. Genel olarak inşaat mühendisliği çalışmalarında fiziksel sönümü tanımlamak için ξ sönüm oranı parametresi kullanılmaktadır. Rayleigh yaklaşımında sönüm (C);

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.2)$$

bağıntısı ile elde edilir. Rayleigh sönümü sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde kütle ve rijitlik matrislerinin sönüme katkılarını tanımlayan ve bir araya toplayan en uygun yaklaşımdır (Kramer, 1996). Zemin bölgesinin malzeme sönümünde kütle katılım oranı α , rijitlik katılım oranı ise β ile belirlenmektedir. Küçük frekanslı titreşimlerin genlikleri üzerinde kütle katılım katsayısı etkili olurken yüksek frekanslı titreşimlerde ise rijitlik katılım katsayısı etkili olmaktadır (Plaxis, 2010). Ayrıca zemin ortamları için malzeme sönüm oranları dış yük etkisi sonucu oluşan kayma birim şekildeğiştirmesi ile doğru orantılı bir şekilde değişmektedir (Kokusho, 2004).

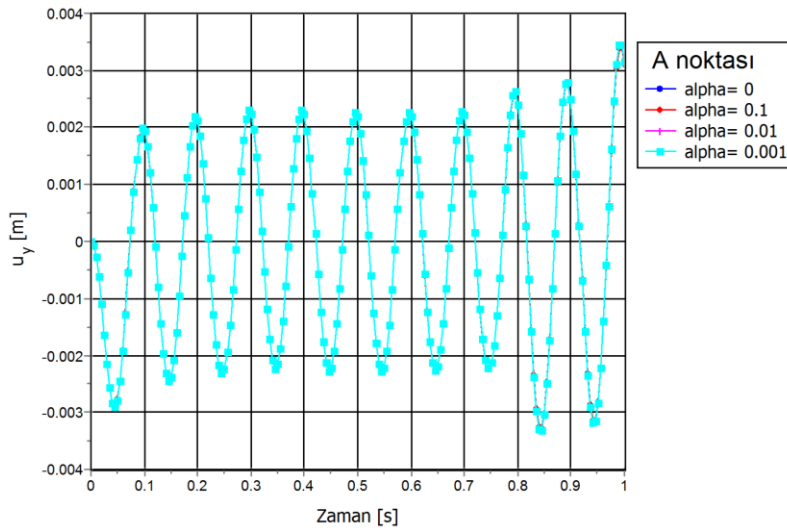
Sönüm matrisinin hesaplanmasında kullanılan kütle ve rijitlik matrislerinin katılımını sağlayan katsayılar;

$$\begin{bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{f_m} & f_m \\ \frac{1}{f_n} & f_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

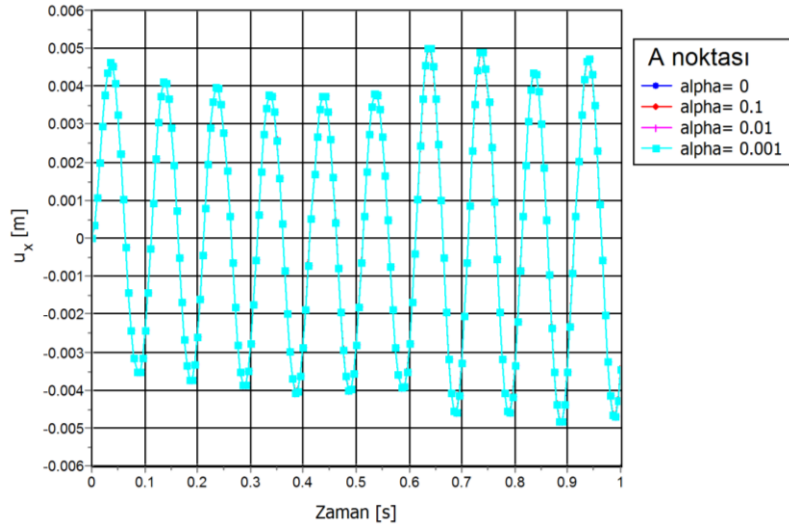
$$f_n = \frac{c_s}{4H} (2n - 1) \text{ (n mod numarası)}$$

denklemleri ile elde edilir. Bu denklemlerde, f_n ve f_m zemin ortamının etkin iki titreşim moduna ait hakim frekansları, ξ_n ve ξ_m ise yine ilk iki moda ait sönüm oranlarını ifade etmektedir. İlgili katsayılar Adapazarı bölgesini genel olarak ifade eden zemin özelliklerinin kullanıldığı nümerik analiz bölümünde hesap edilip kullanılacaktır. Bu bölümde ise bu katsayıların değişiminin zemin ortamındaki dalga hareketine etkisi incelenmiştir.

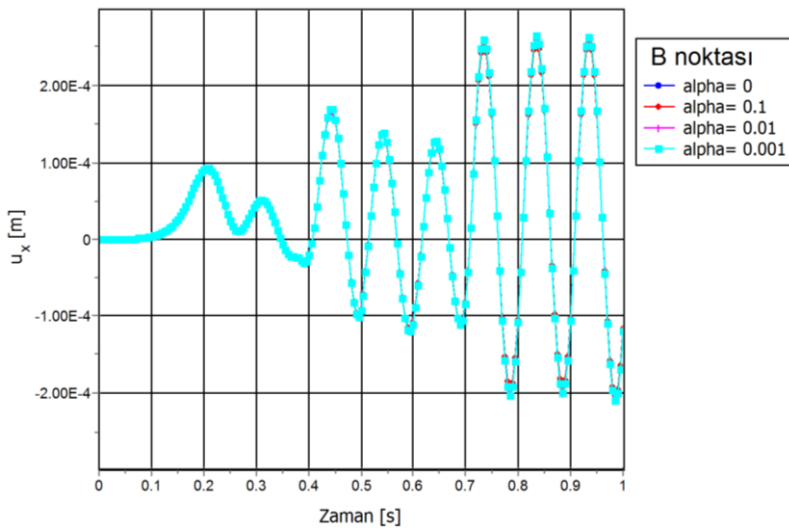
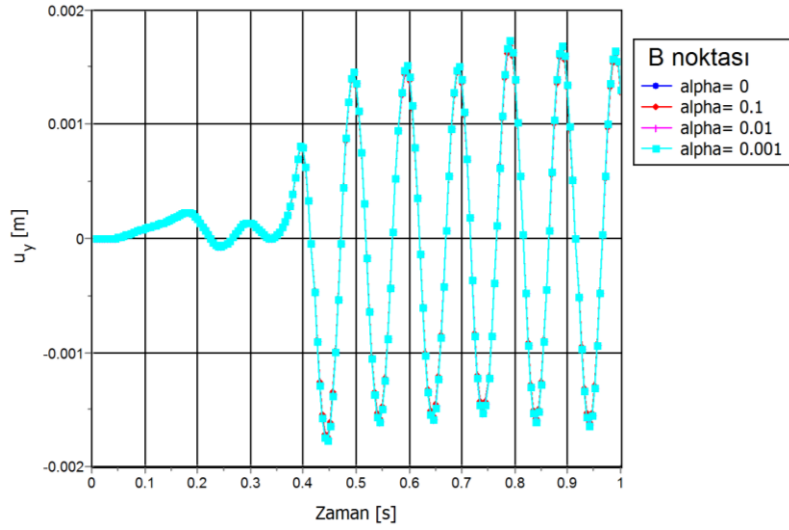
İlk olarak kütle katılım katsayısının değişimi incelenmiştir. α orantı sabitinin etkisine bakılırken rijitlik katılım katsayısı olan β orantı sabiti sıfır alınmıştır. α 'nın belirli sınır değerleri için düşey ve yatay yük durumlarına ait analizler yapılmış ve modeldeki A ve B noktaları için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Şekil 3.11-3.12).



Şekil 3.11. α katsayısının A noktasındaki davranış etkisi



Şekil 3.11. α katsayısının A noktasındaki davranışa etkisi (devamı)

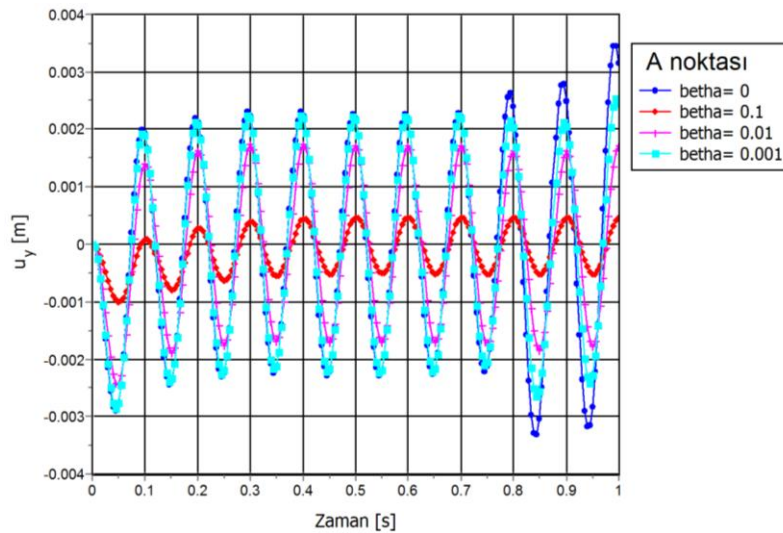


Şekil 3.12. α katsayısının B noktasındaki davranışa etkisi

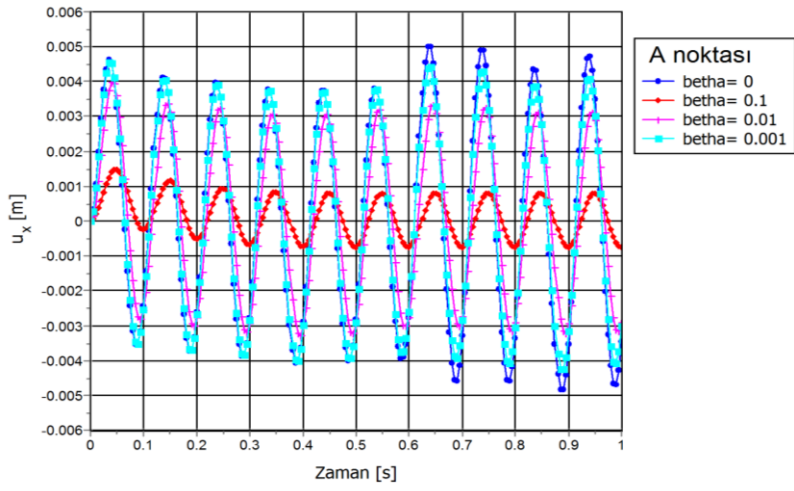
Grafikler incelendiğinde kütle katılım katsayısı olan α orantı sabitinin, düşey ve yatay yük uygulandığı durumda, yükün hemen altında ve sınırdaki yüzey noktasında yerdeğiştirme-zaman ilişkisinin davranışını ve genliğini değiştirmediği görölmüştür (şekil 3.11-3.12). Literatürde yapılan araştırmalarda yapı-zemin etkileşim problemlerinde kütle katılımının sönüme etkisinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu ve sadece rijitlik katkısının dikkate alındığı görölmüştür (Hashash ve Park, 2002).

$$C = \beta K; \quad (\beta = \frac{2\xi}{\omega}) \quad (3.4)$$

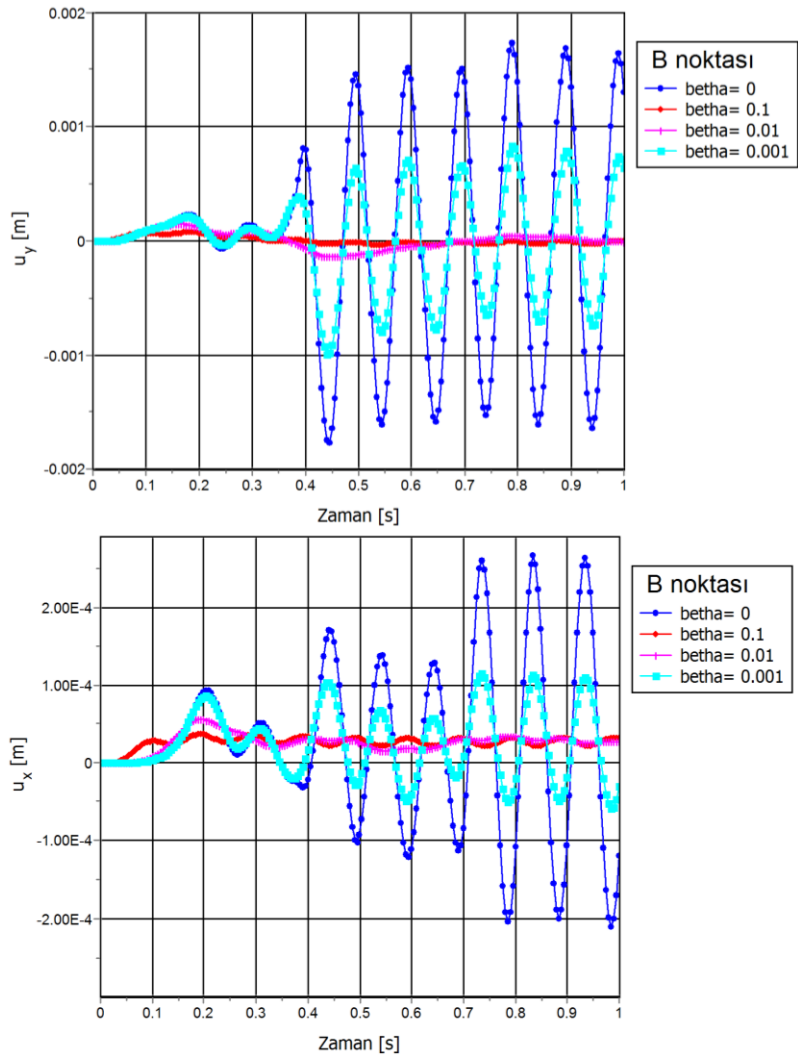
İkinci aşamada rijitlik katılım katsayısının değişimi incelenmiştir. β orantı sabitinin etkisine bakılırken kütle katılım katsayısı olan α orantı sabiti sıfır alınmıştır. β' nın belirli sınır değerleri için düşey ve yatay yük durumuna ait analizler yapılmış ve modeldeki A ve B noktaları için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (şekil 3.13-3.14).



şekil 3.13. β katsayısının A noktasındaki davranışa etkisi



Şekil 3.13. β katsayısının A noktasındaki davranışa etkisi



Şekil 3.14. β katsayısının B noktasındaki davranışa etkisi

Rijitlik katılım katsayısı için yapılan analizler sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde bütün durumlar için β orantı sabiti genlik üzerinde çok büyük etkiler oluşturmaktadır. Yükün hemen altında (A noktası) titreşimin davranışını etkilememektedir. Fakat β orantı sabiti arttıkça yerdeğiştirmenin genliğinde önemli derecede azalmalar görölmektedir (Şekil 3.13). Yüzey sınır uç noktasındaki (B noktası) yerdeğiştirme-zaman ilişkisi incelendiğinde β orantı sabiti arttıkça bu noktada da ortaya çıkan dalğanın genliğinde büyük oranda azalmalar görölmektedir. Ayrıca katsayı arttıkça dalğanın formu da değişim göstermiş ve sinüs hareketinden düz bir çizgiye doğru dönüşmeye başlamıştır (Şekil 3.14). Sınır uç noktasında sonuçların bu kadar değişmesi yük kaynağından yayılan dalgaların zemin içerisinde hareket etmesi ve hareket sırasında zemin malzeme sönümünün etkili olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kütle katılım katsayısının hiçbir şekilde etki etmediği görölmüş ve α orantı sabiti sıfır olarak alınmıştır. Rijitlik katılım katsayısının etkili olduğu analizler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu nedenle Adapazarı bölgesini genel anlamda ifade edecek zemin özelliklerine bağlı β orantı sabiti hesaplanacak ve yukarıdaki grafikler göz önüne alınarak en uygun rijitlik katılım katsayısına karar verilecektir. Bu süreçte nümerik analiz bölümünde temel-zemin arakesitindeki sonuçların kullanılacağı da dikkate alınacaktır.

3.1.2. Sonlu eleman ağının etkisi ve çözüm sürecinde sayısal doğruluk ve stabilite

Yapı-zemin etkileşimi problemlerinin SEY ile çözümünde, dış yükün frekansına bağlı olarak zemin ortamında yayılan dalgaların doğru bir şekilde seyahat edebilmesi için modellemede kullanılan sonlu eleman boyutlarının sınırlandırılması gerekmektedir. Bu sınır değer, zemin ortamında yayılan dalğanın boyu (λ) ile kontrol edilmektedir. Dalga boyu yayılma hızına ve yük kaynağının frekansına bağlı olarak değişmektedir.

$$\lambda_{min} = \frac{V_{min}}{f_{max}} \quad (3.5)$$

Ayrıklaştırılan sonlu zemin bölgesinde kullanılacak eleman boyutları (Δh) dalga boyuna bağlı olarak hesap edilmektedir (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969).

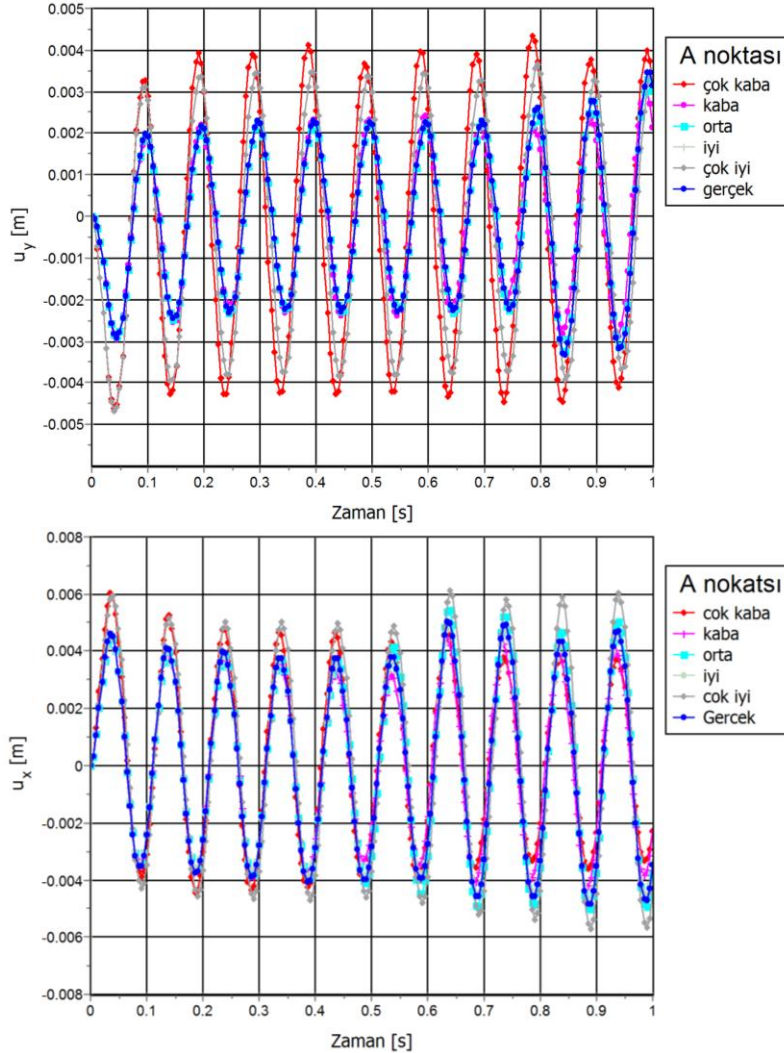
$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{min}}{k} \quad (3.6)$$

Denklemden sonlu eleman tipine ve kullanılan şekil fonksiyonuna bağlı olarak değişen “ k ” çarpanı $5 \leq k \leq 10$ aralığında değişmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta kısa dalga boyuna sahip frekans bileşenleri büyük elemanlar ile modellendiğinde, zemin ortamında seyahat eden yüksek frekans bileşenleri filtrelenebilir. Bu nedenle sonlu eleman analizlerinde dalgaların doğru bir şekilde seyahat edebilmesi için her dalga boyunun 10 düğüm noktası içermesi önerilmektedir (Bathe ve Edward, 1976; Hughes, 1987). Yani $k = 10$ olarak alınması tavsiye edilmektedir.

Dalga boyunun hesabı yapılırken en yüksek anlamlı frekans (f_{maks}) değerinin bilinmesi gerekmektedir. Harmonik karakterli yüklerde bu değer sabit olmakla beraber sismik yüklerde titreşim hareketinin Fourier analizi yapılarak hesap edilebilmektedir. Ayrıca denklemdeki V_{min} ortamda yayılan en düşük dalga hızıdır (Preisig ve Jeremic, 2005). Genel olarak zemin ortamında Rayleigh dalgası en düşük dalga yayılım hızına sahiptir.

Yukarıdaki formüller ve tanımlamalar doğrultusunda zemin ortamında dalga yayılımının sağlanabilmesi için kullanılacak sonlu elemanların maksimum boyutu sayısal olarak $\Delta h \leq 0.598 m$ olacak şekilde belirlenmiştir. Maksimum eleman boyutu belirlendikten sonra sonlu eleman ağ örgüsünün (Mesh) etkisini görmek için yukarıda hesap edilen sınır değer yanında Plaxis programında tanımlanmış olan farklı ağ tiplerini de (çok kaba, kaba, orta, iyi, çok iyi) kullanarak düşey ve yatay harmonik yük için kapsamlı bir parametrik araştırma yapılmış ve sonuçlar yükün alt

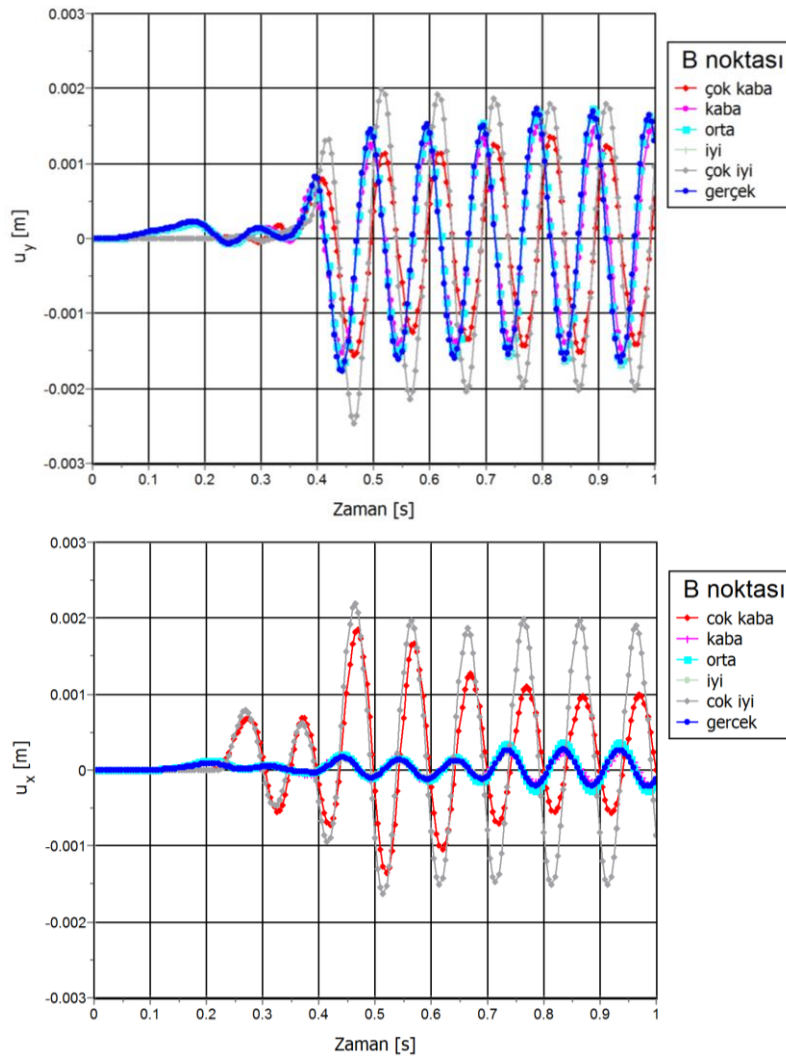
noktası ve yüzey sınır uç noktası için karşılaştırmalı olarak Şekil 3.15 ve Şekil 3.16' da verilmiştir.



Şekil 3.15. Sonlu eleman ağ yapısının A noktasındaki davranışa etkisi

Sonlu eleman ağ yapısının yükün hemen altındaki yerdeğiştirmenin zamana bağlı değişimine etkisi incelendiğinde eleman ağ yapısının çok kaba ve çok ince olma durumları için benzer sonuçlar orta çıkmıştır. Fakat diğer ağ yapılarının etkisi incelendiğinde sonuçların pek değişmediği gözlemlenmiştir. Düşey yük etkisi altında çok kaba ve çok ince ağ yapıları diğer durumlara göre daha büyük genlikte yerdeğiştirmeler oluşturmuştur. Yükün yatay doğrultuda uygulanması durumunda ise bütün sonlu eleman ağ yapıları için benzer davranışlar ortaya çıkmıştır (Şekil 3.15). Sonuç olarak yükün hemen altındaki davranışa ağ yapısının etkisi yok denecek kadar

azdır. Bunu nedeni ise sonlu eleman ağ yapısının zemin ortamında ilerleyen dalga yayılımını etkilemesidir. Hesap sonucu belirlenen maksimum eleman boyutunu sağlayan ağ yapısı (gerçek) yükün alt noktasında uygulanan harmonik karakteri vermektedir.



Şekil 3.16. Sonlu eleman ağ yapısının B noktasındaki davranışa etkisi

Yüzey sınır uç noktasında oluşan yerdeğiştirme-zaman ilişkisinin sonlu eleman ağ yapısına bağlı olarak değişimi Şekil 3.16' da verilmiştir. Burada düşey doğrultu için yapılan analizlerde ağ yapısının etkisi pek görülmemiştir. Sadece çok iyi ve çok kaba durumları için bir farklılık söz konusudur. Çok kaba ağ yapısında dalganın ölçülen noktaya daha büyük genlikte ve biraz geç geldiği (faz farkı) görülmüştür. Çok ince ağ yapısında ise daha düşük genlikte ve faz farkı ile geldiği görülmüştür. Yatay

doğrultu incelendiğinde ise çok kaba ve çok ince ağ yapısı durumlarında daha büyük genlikte yerdeğiştirmeler olmuştur. Bu durumdan dalga yayılımının sağlıklı olmadığı ve sistem içerisinde bir takım ikincil etkilerin oluştuğu sonucu çıkarılmaktadır.

Tüm analizler sonucunda kullanılan ağ yapılarına ait ayrılaştırılan sonlu zemin bölgesinin modellenmesinde kullanılan eleman sayıları ve ortalama eleman boyutları Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Sonlu eleman ağlarının özellikleri

Ağ tipi	Eleman sayısı	Ortalama eleman boyutu [m]
Çok kaba	102	3.131
Kaba	198	2.247
Orta	415	1.552
İyi	815	1.108
Çok iyi	1532	0.8079
Gerçek	5996	0.4084

Doğrusal olmayan titreşim problemlerinin nümerik çözümünde veya dalga yayılım problemleri için geliştirilen sonlu eleman modelinin doğruluk derecesi kullanılan ağ yapısının boyutu (Δh) ve çözüm aşamasında dikkate alınan zaman adım aralığı (Δt) ile kontrol edilmektedir. İki boyutlu düzlem şekildeğiştirme problemi olarak ele alınan sonlu eleman modelinin hareket denklemi Newmark'ın sabit ortalama ivme yöntemi ile çözülmüştür.

Hareket denkleminin çözümünde zaman adım aralığı (Δt) iki nedenden dolayı sınırlandırılmıştır. Birinci ölçüt sistemin en küçük titreşim periyodunun 10 adıma bölünmesidir. Tüm mod şekilleri için bu doğrulamanın yapılması gerekmektedir. İkinci ölçüt ise sonlu elemanlar yönteminin doğasından kaynaklanmaktadır. Sonlu elemanlar ile modellenen zemin ortamında yayılan dalgalar analiz sırasında önce bir düğüm noktasına ulaşmalı daha sonra diğer düğüm noktasına ulaşmalıdır. Analizin

zaman adım aralığı çok büyük olur ise dalga aynı anda iki ardışık elemana ulaşabilir. Buda temel dalga yayılım özelliğini ihlal ederek kararsızlığa sebep olabilir (Preisig ve Jeremic, 2005). Bu sebeple nümerik modelin çözüm adımlarında kullanılacak zaman adım aralığı;

$$\Delta t \leq \frac{\Delta h}{V_{max}} \quad (3.7)$$

formülü ile sınırlandırılmıştır. Courant ölçütü (Courant ve diğ., 1967) olarak ta bilinen bu denklemde V_{max} zemin ortamında yayılan en yüksek dalga hızı olan basınç dalgası hızıdır. Bu çalışmada, dış yükün karakteri ve ortalama sonlu eleman boyutu göz önünde bulundurularak nümerik modelin çözüm aşamasında yönetici denklemlerin sayısal integrasyonu $\Delta t \leq 0.0055$ s olacak şekilde analizler yürütülmüştür.

3.2. Modelin Statik Rijitliklerle Doğrulanması

Şerit temeller için mevcut olan statik ötelenme rijitliklerinin (Tablo 2.1) doğrulanmasında dinamik durum için belirlenen model parametreleri kullanılmıştır (geometri, sonlu eleman ağı, sınır şartları).

Dinamik analizler ve sonucunda hedeflenen doğrusal olmayan malzeme davranışı için ötelenme rijitlikleri Adapazarı bölgesi için elde edilecektir. Bu nedenle kurulan modelin statik rijitlikler ile doğrulanmasında bölgenin gerçek zemin özelliklerine ihtiyaç duyulmuştur. Adapazarı bölgesi için statik durumda modelin doğrulaması yapılırken bölge merkezinde farklı noktalarda 1999 Kocaeli depremi sonrası yapılmış olan arazi deneyleri yardımıyla elde edilmiş zemin özellikleri kullanılarak modelin geçerliliği daha sağlam bir temele oturtulmuştur (Şekil 3.17). Analizlerde Adapazarı bölgesi için 11 farklı noktada yapılan geoteknik çalışmalar sonucunda elde edilen zemin özellikleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir (Youd ve diğ., 2000; Bray ve diğ., 2000).



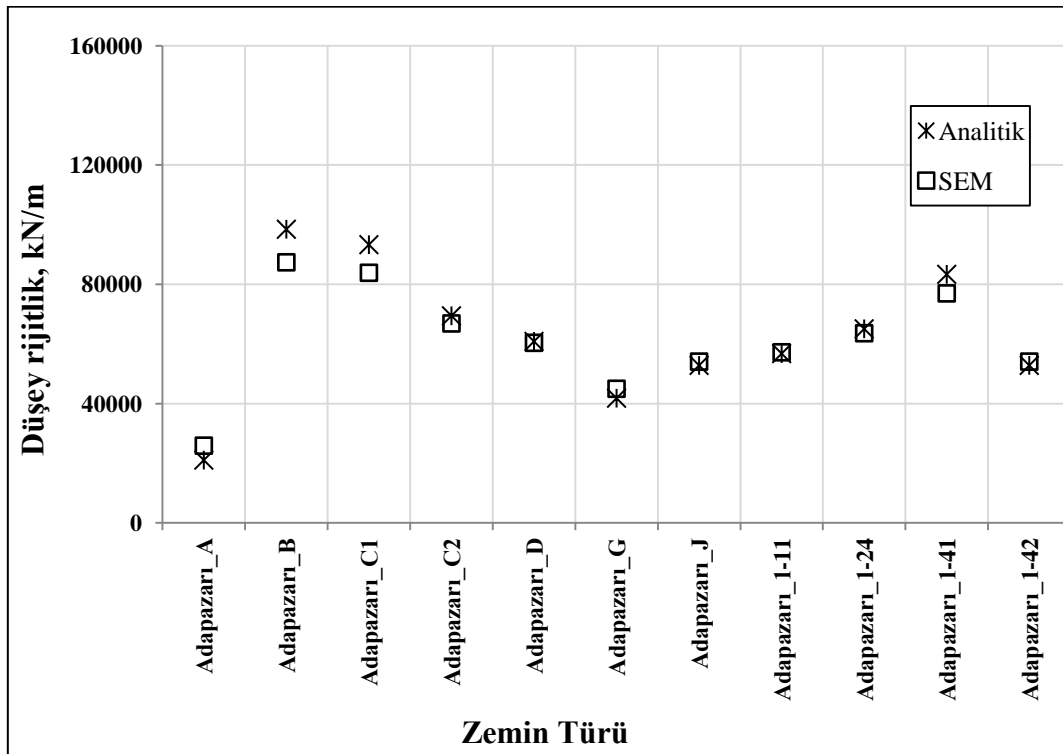
Şekil 3.17. Zemin özellikleri için deney yapılan noktalar

Tablo 3.2. Adapazarı merkez saha deneyleri zemin özellikleri (Youd ve diğ.; Bray ve diğ., 2000).

Deney bölgesi	G [kN/m ²]	ρ [t/m ³]	c_s [m/s]	ν [-]
Adapazarı_A	14450	2	85	0.4984
Adapazarı_B	68450	2	185	0.4923
Adapazarı_C1	64800	2	180	0.4927
Adapazarı_C2	48050	2	155	0.4946
Adapazarı_D	42050	2	145	0.4953
Adapazarı_G	28800	2	120	0.4968
Adapazarı_J	26450	2	135	0.4959
Adapazarı_1-11	39200	2	140	0.4956
Adapazarı_1-24	45000	2	150	0.4949
Adapazarı_1-41	57800	2	170	0.4935
Adapazarı_1-42	36450	2	135	0.4959

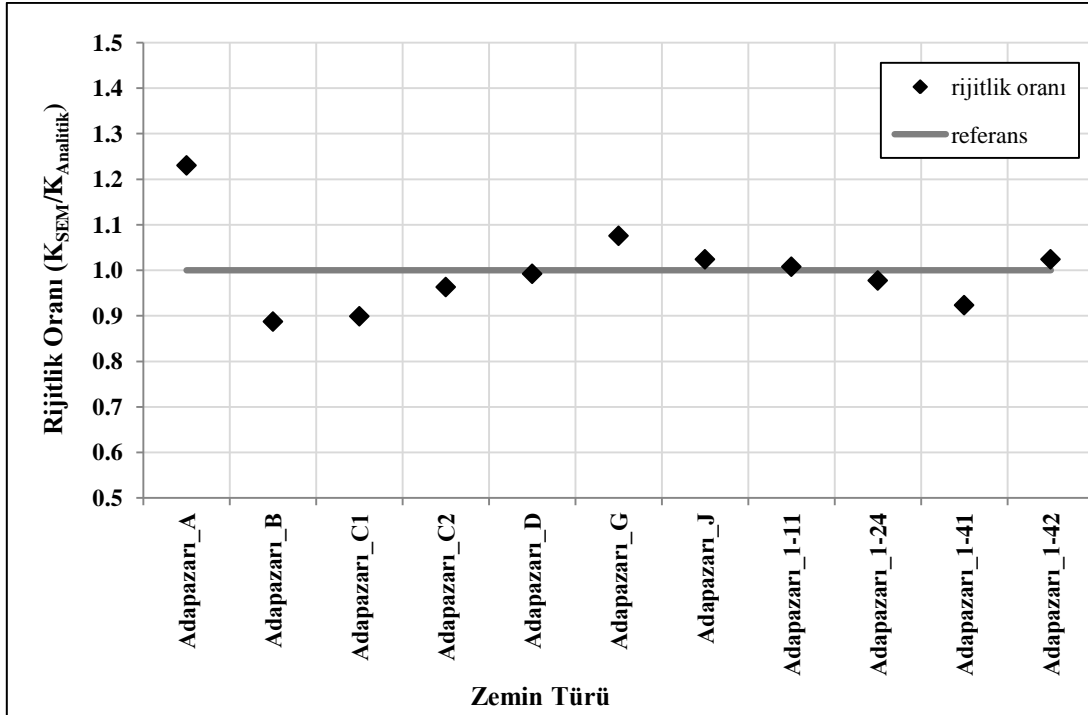
Yukarıda malzeme özellikleri belirtilen farklı bölgeler için düşey ve yatay doğrultularda ayrı ayrı sonlu eleman analizleri yapılacak ve statik durum için mevcut olan denklemlerle kıyaslanarak modelin doğruluğu araştırılacaktır.

İlk olarak belirlenen model parametreleri doğrultusunda statik düşey yük etkisi altında temel-zemin sisteminin sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Adapazarı bölgesine ait 11 farklı zemin durumu için bu analizler tekrarlanmıştır. Sonlu eleman analizleri sonucunda şerit temel için düşey statik rijitlikler her bir zemin durumu için elde edilmiştir. Daha sonra Tablo 2.1’ de Gazetas (1991) tarafından tanımlanan düşey rijitlik fonksiyonu kullanılarak 11 farklı zemin durumu için statik empedans değerleri analitik olarak hesap edilmiştir. Nümerik ve analitik olarak hesaplanan statik empedanslar Şekil 3.18’ de verilmiştir.



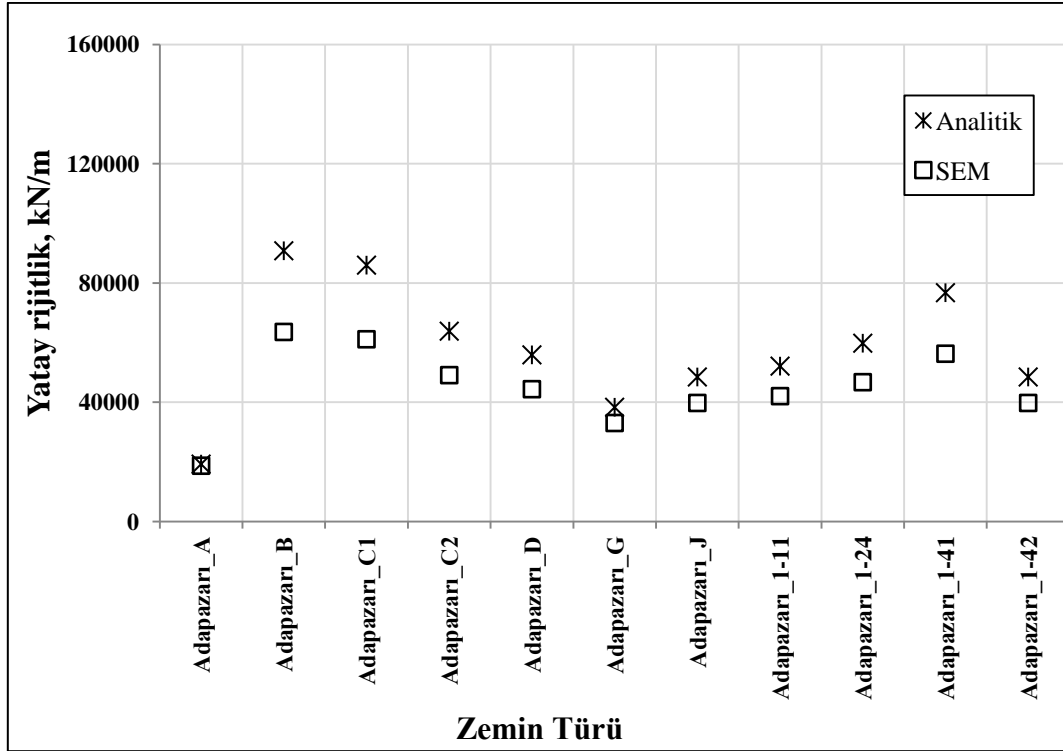
Şekil 3.18. Zemin türüne göre statik düşey rijitliğin değişimi

Hesaplanan bu değerler doğrultusunda kurulan modelin Adapazarı bölgesine ait 11 farklı zemin durumu için yeterli ölçüde yakınsama gösterdiği görülmüştür. Analitik ve nümerik olarak elde edilen rijitlikler incelendiğinde maksimum sapma +%23 olarak A bölgesinde olmuştur. Diğer bölgelere bakıldığında ise sapma yüzdesinin -%11 ile +%8 arasında değiştiği ve kurulan modelin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 3.19).

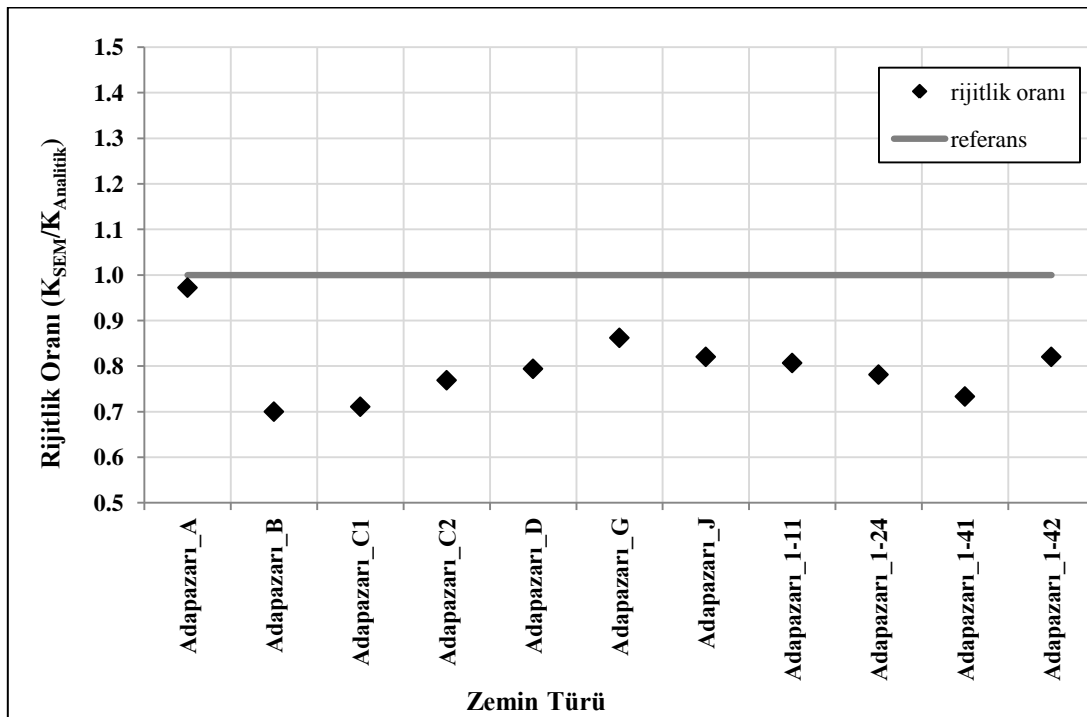


Şekil 3.19. Düşey doğrultu için SEM doğruluk düzeyinin analitik çözümle karşılaştırılması

Düşey doğrultu için yapılan işlemler yatay doğrultu içinde yapılmıştır. Analitik ve nümerik analizler sonucunda Adapazarı bölgesine ait 11 farklı zemin durumu için elde edilen statik rijitlik değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.20’ de verilmiştir. İki farklı analiz yöntemi ile hesaplanan empedans değerleri incelendiğinde zemin ortamı daha rijit oldukça sapma miktarı da artmıştır. Maksimum sapma miktarı -%30 olarak B bölgesinde görülmüştür. Yatay doğrultu için de sonlu eleman analiz sonuçlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür (Şekil 3.21).



Şekil 3.20. Zemin türüne göre statik yatay rijitliğin değişimi



Şekil 3.21. Yatay doğrultu için SEM doğruluk düzeyinin analitik çözümle karşılaştırılması

BÖLÜM 4. DİNAMİK EMPEDANS FOKSİYONLARININ ELDE EDİLMESİ VE SAYISAL UYGULAMA

Kurulan sonlu eleman modelinin yatay ve düşey doğrultular için mevcut statik empedans fonksiyonları ile doğrulanması Bölüm 3' de yapılmıştır. Ayrıca dinamik yük etkisi altında analize etki eden tüm parametreler araştırılmış ve literatürdeki tanımlamalar doğrultusunda en doğru değerlerin alınması sağlanmıştır.

Bu bölümde doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için şerit temel plağına ait düşey ve yatay doğrultudaki rijitlik değerleri boyutsuz açısız frekans parametresine bağlı olarak elde edilecektir (Denklemler 2.18). Burada öncelikle kullanılacak zemin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Adapazarı bölgesini ifade edecek zemin özellikleri için mevcut deney sonuçlarının yanında, Bol (2003) ve Bowles (1996)'ın çalışmalarından yararlanılarak bölgeyi genel olarak tanımlayacak değerler belirlenmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Adapazarı bölgesi için genelleştirilmiş zemin özellikleri

Parametre	Boyut	Değer
Yoğunluk	$\rho [t/m^3]$	2
Poisson oranı	$\nu [-]$	0.4968
Elastisite modülü	$E [kN/m^2]$	86216
kayma dalga hızı	$c_s [m/s]$	120
Kohezyon	$c' [kN/m^2]$	35
Kayma direnci açısı	$\Phi' [^\circ]$	15

Yapılacak tüm nümerik analizler ve sayısal uygulamalarda Tablo 4.1' deki zemin özellikleri kullanılacaktır.

Belirlenen genelleştirilmiş zemin özellikleri kullanılarak statik yük etkisi altında şerit temel plağının elastik yarı sonsuz zemin ortamında konuşlandırılması durumu için sonlu eleman analizleri yapılmış, düşey ve yatay doğrultulara ait statik empedans değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4.2).

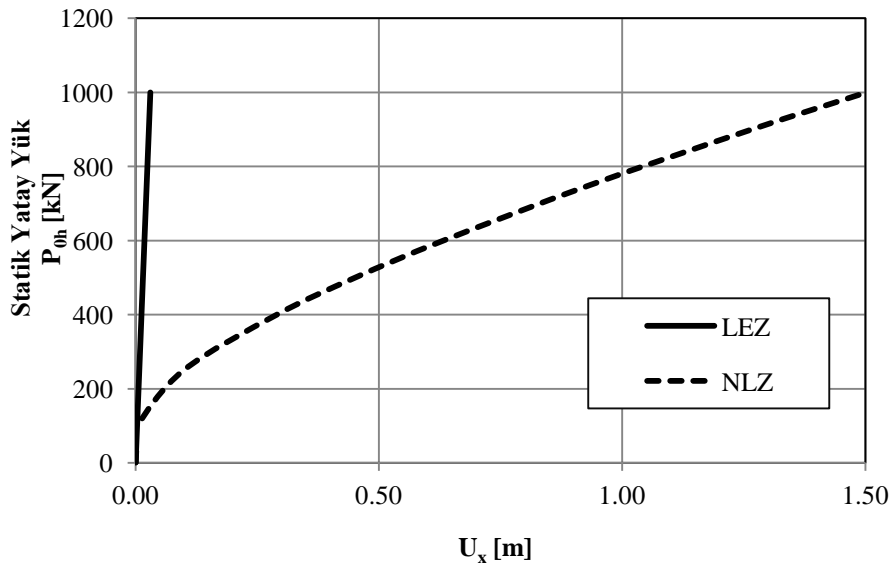
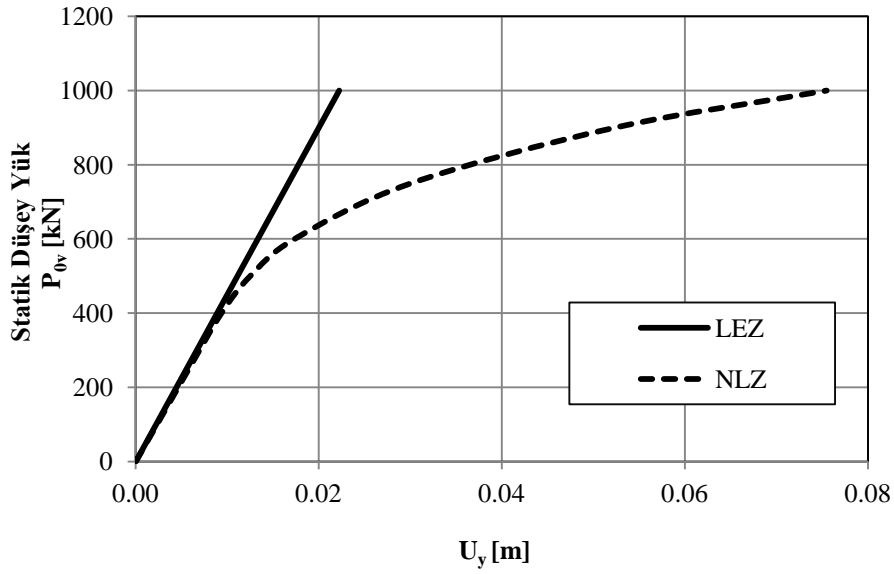
Tablo 4.2. Genelleştirilmiş zemin özelliklerine ait statik rijitlikleri

	Analitik	SEM	% hata
Düşey rijitlik [kN/m]	41781	44951	% 8
Yatay rijitlik [kN/m]	38318	33036	% 14

Statik yük etkisi altında sonlu eleman analizleri sonucunda, belirlenen malzeme özellikleri için zemin ortamının elastik davranış sergilemesi durumunda şerit temel plağına ait analitik olarak hesaplanan empedans değerlerine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Elastik ortamlar için model doğrulaması yapıldıktan sonra parametrik analizlerde kullanılacak elasto-plastik malzeme davranışı için de kurulan sonlu eleman modelinin geçerliliğinin doğrulanması gerekmektedir. Doğrusal olmayan davranış sergileyen bu malzeme modelinde değişken bir rijitlik değeri söz konusudur. Bu nedenle doğrusal olmayan malzeme davranışından elde edilen **başlangıç rijitlik değeri** ile doğrusal malzeme davranışından elde edilen rijitlik değeri karşılaştırılarak modelin uygunluğu kontrol edilecektir (Carrubba ve diğ., 2000).

Statik durumda düşey ve yatay doğrultular için zemin ortamının doğrusal olmayan davranış göstermesi halinde sonlu eleman analizleri yapılmış ve yük-yerdeğiştirme ilişkisi lineer elastik zemin modeli (LEZ) ve nonlinear zemin modeli (NLZ) için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Statik yük etkisi altında malzeme davranışının yerdeğiştirmeye etkisi

Grafikler incelendiğinde hem düşey hem de yatay doğrultu için yapılan analizlerde, kurulan modelin elasto-plastik malzeme davranışı için de tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Uygulanan yüklere karşı doğrusal olmayan davranış gözlemlenen grafiklerde ayrıca başlangıç rijitlikleri elastik ortamlar için elde edilen değerlerle de

uyuşmaktadır. Bu örtüşme kurulan modelin doğrusal olmayan malzeme davranışına (Mohr-Cloumb yenilme kriteri altında tanımlanan elasto-plastik malzeme modeline) sahip ortamlar için de geçerli olduğunu göstermektedir.

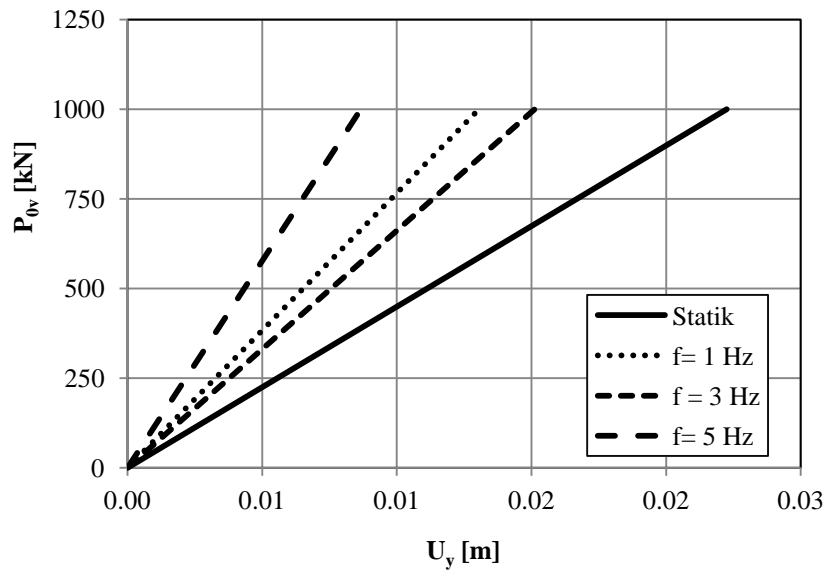
Statik durum için doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarına göre model doğrulamaları yapıldıktan sonra dinamik yük etkisi altında yatay ve düşey doğrultu için rijitlik değerleri hesap edilecektir. Dinamik yük etkisi altında model parametreleri Bölüm 3’de incelenmiş ve tanımlanmıştır. Sadece malzeme sönümü (Rayleigh sönümü) katılım katsayıları (α , β) analizde kullanılacak malzeme özelliklerine doğrudan bağlı olduğundan bu katsayılar burada tanımlanacaktır. Kütle katılım katsayısının yatay ve düşey yük durumları için hiçbir etki yapmadığı yapılan parametrik analizlerde ortaya konulmuştur. Rijitlik katılım katsayısı için denklem (3.4) kullanılacaktır. Sönüm oranı (ξ) için Tablo 3.3’deki zemin özellikleri için Shake programında analizler yapılmış ve % 4.5 - 6 aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Belirlenen genelleştirilmiş malzeme özellikleri ve hesaplanan sönüm oranları kullanılarak rijitlik katılım katsayısı hesaplanmış ve $\beta = 0.01$ olarak alınmıştır.

4.1. Şerit Temel Plağı İçin Dinamik Rijitlik

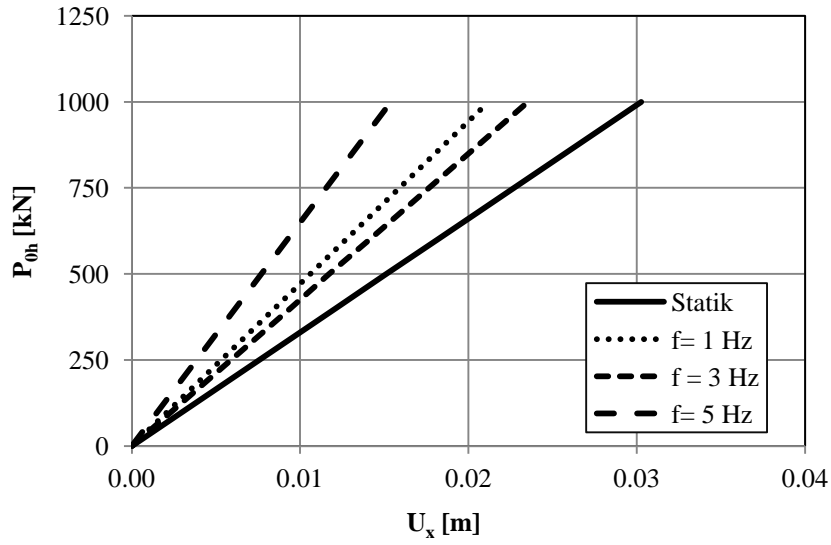
Statik yük etkisi altında yüzeysel rijit şerit temel plağının oturduğu zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için, kurulan sonlu eleman modelinin doğruluğu ve geçerliliği sağlandıktan sonra dinamik yük etkisi altında Adapazarı bölgesini ifade edecek zemin özellikleri kullanılarak empedans değerleri elde edilecektir. Dinamik analizlerde şerit temel plağının orta noktasına düşey ve yatay doğrultular için ayrı ayrı tekil harmonik yük uygulanmıştır. Harmonik yükün frekans değeri olarak, yer hareketinin etkin frekans içeriği dikkate alınarak 0-5 Hz aralığı incelenmiştir. Analizler sonucunda rijit şerit temel plağı için düşey ve yatay doğrultulara ait dinamik empedans değerleri daha önce tanımlanmış olan boyutsuz frekans parametresine (Denklem 2.19) bağlı olarak sunulacaktır.

4.1.1. Elastik ortamlar için dinamik dijitalik

Zemin ortamının doğrusal davranış sergilemesi için Adapazarı bölgesine ait genelleştirilmiş malzeme özelliklerinden (Tablo 4.1) elastik parametreler kullanılarak yukarıda belirtilen dinamik yük etkisi altında sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Düşey ve yatay doğrultular için ayrı ayrı olmak üzere her bir frekans değeri için temel-zemin ortak sisteminin dinamik yük etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Temel zemin arakesiti orta noktasındaki (Şekil 3.1) yük deplasman ilişkisi belirlenen frekans aralığı için sonlu eleman analizlerinden hem düşey hem de yatay harmonik yük etkisi altında elde edilmiştir (Şekil 4.2).

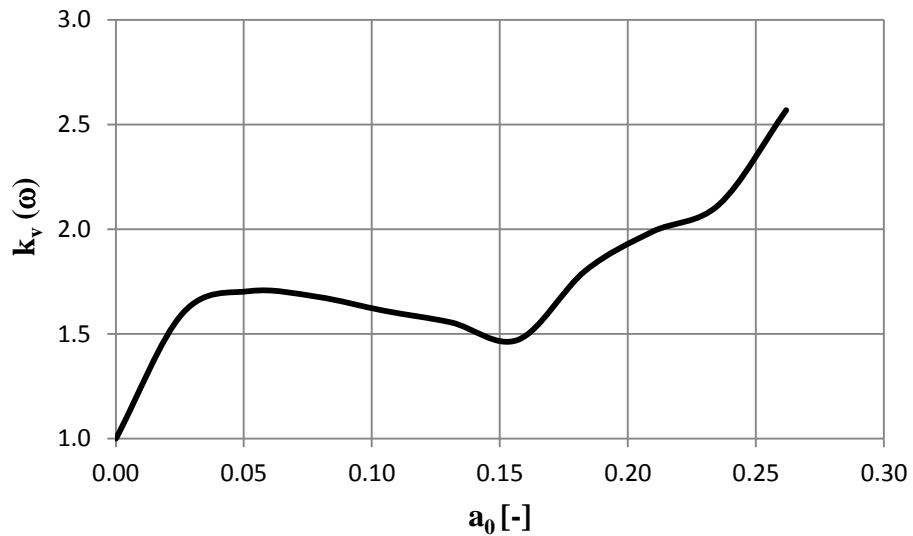


Şekil 4.2. Doğrusal malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi

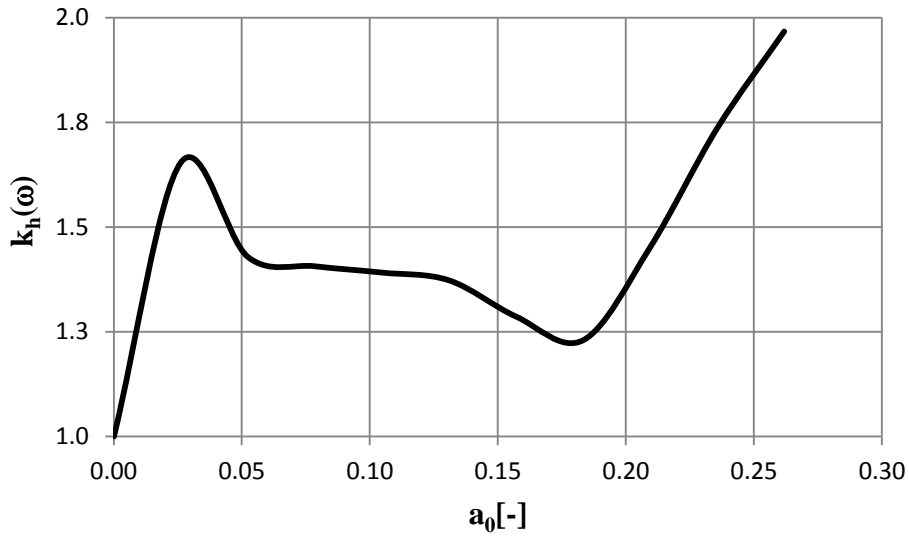


Şekil 4.2. Doğrusal malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi (devamı)

Her bir frekans değeri için temel plağı-zemin ara kesindeki dış yüke bağlı yerdeğiştirme davranışı elde edildikten sonra elastik ortamlar için denklem (2.22) ve (2.23) kullanılarak düşey doğrultu için dinamik rijitlik katsayısı (k_v) ve yatay doğrultu için dinamik rijitlik (k_h) katsayısı elde edilmiştir (Şekil 4.3 - 4.4).



Şekil 4.3. Adapazarı bölgesi zeminine ait doğrusal malzeme davranışı için düşey dinamik rijitlik katsayısının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi



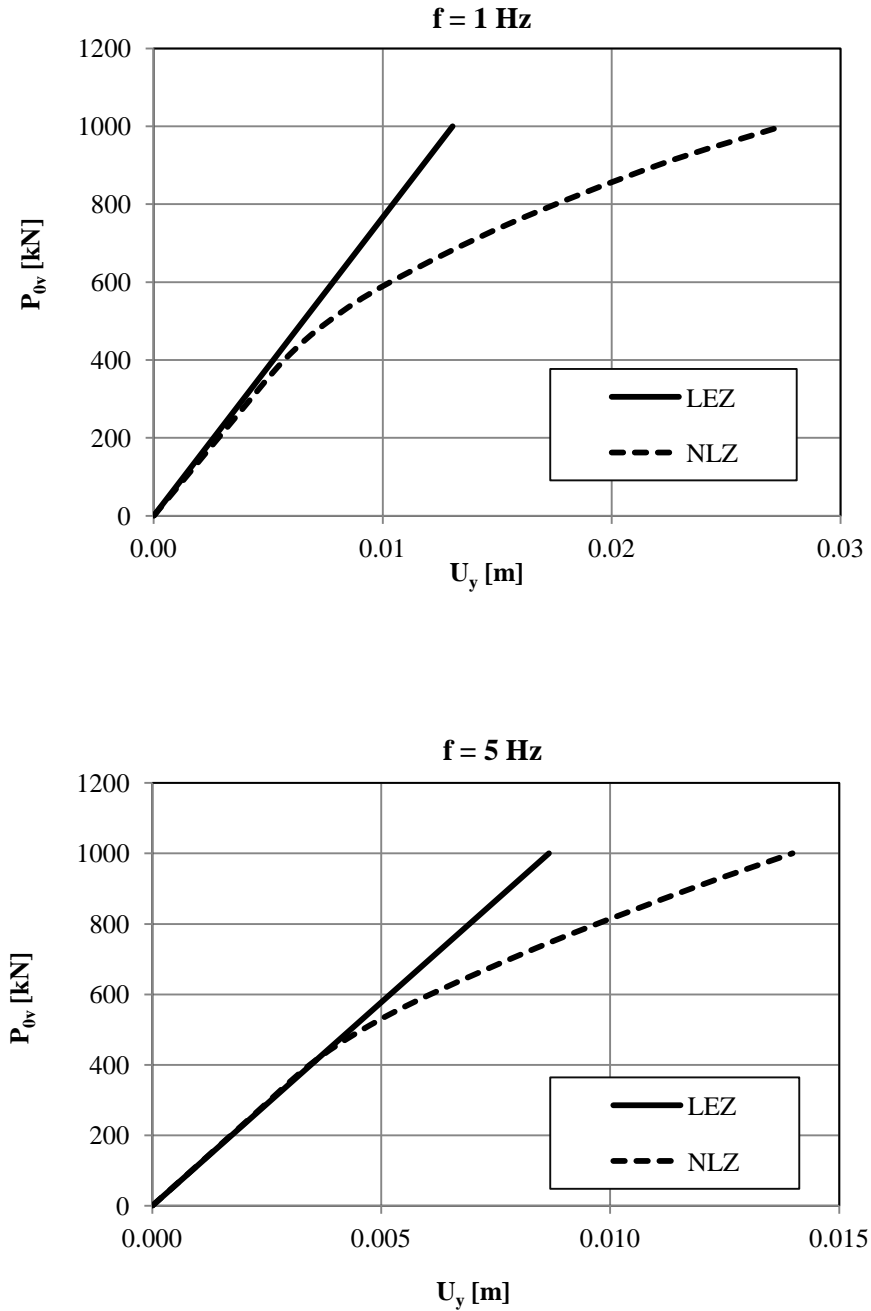
Şekil 4.4. Adapazarı bölgesi zeminine ait doğrusal malzeme davranışı için yatay dinamik rijitlik katsayısının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi

Grafikler incelendiğinde; elastik zemin ortamında, harmonik yük etkisi altında yapılan sonlu eleman analizlerinde yer hareketinin etkin frekans içeriği için şerit temel plağına ait düşey ve yatay dinamik rijitlik katsayılarında ani ve hızlı bir artışın olduğu görülmektedir. Yaklaşık % 70 oranında bir artış olduktan sonra tekrar bir azalma olmuş, fakat belirli bir frekans değerinden sonra tekrardan bir artış meydana gelmiştir. Bu değişimin olduğu bölge incelendiğinde zemin ortamının birinci ve ikinci serbest titreşim frekans aralığına denk geldiği görülmüştür. Genel olarak analizlerin yapıldığı bu düşük frekans değerleri için rijitlik katsayılarında büyük oranlarda artış olmuştur. Literatürde şerit temeller için elastik yarı sonsuz zemin ortamında belirli Poisson oranları için yapılan çalışmalarda da düşük frekans değerlerinde düşey ve yatay doğrultu için hesaplanan dinamik rijitlik katsayılarında ani artışların olduğu belirtilmiştir (Gazetas, 1991).

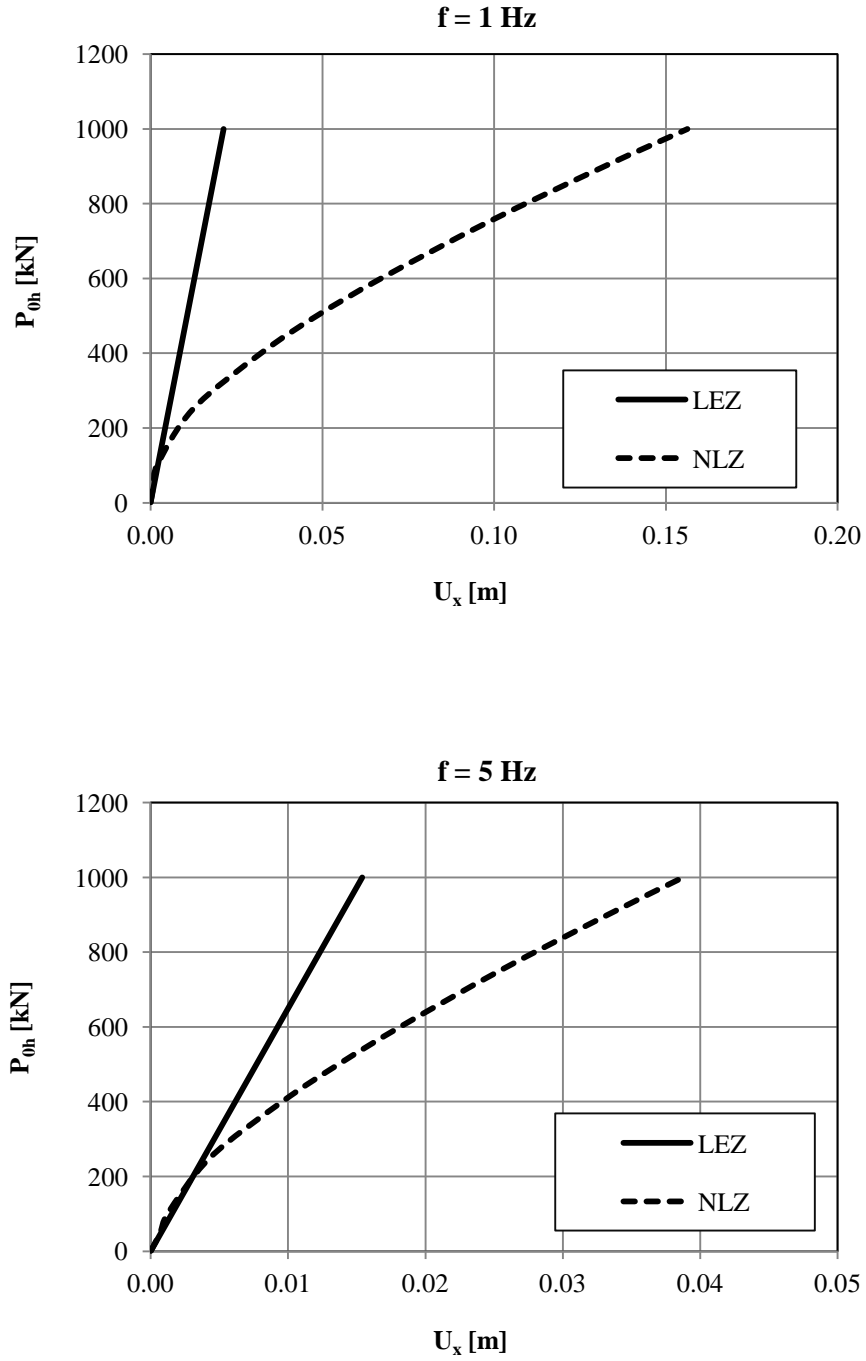
4.1.2. Doğrusal olmayan ortamlar için dinamik rijitlik

Düşey ve yatay doğrultularda şerit temel plağı-zemin ortak sisteminin harmonik yük etkisi altındaki dinamik analizleri, Adapazarı bölgesine ait doğrusal olmayan zemin özellikleri kullanılarak (Tablo 4.1) yer hareketinin etkin frekans içeriği için ayrı ayrı yapılmıştır. Temel-zemin arakesiti orta noktasındaki (Şekil 3.1) yük deplasman

ilişkisi belirlenen frekans aralığı için sonlu eleman analizlerinden hem düşey hem de yatay harmonik yük etkisi altında elde edilmiştir. Bazı frekans değerleri için zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan davranış göstermesi durumlarında düşey ve yatay doğrultulara ait kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Düşey yük etkisi altında doğrusal olmayan malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi

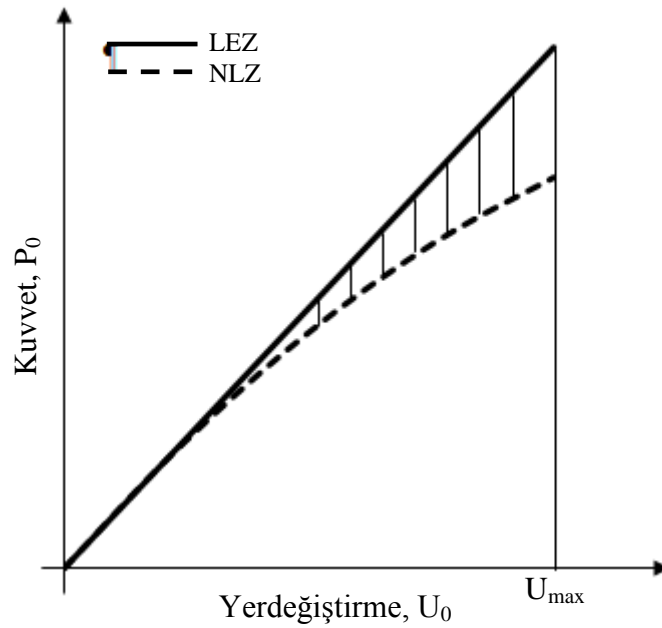


Şekil 4.6. Yatay yük etkisi altında doğrusal olmayan malzeme davranışı için frekansa bağlı yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Grafikler incelendiğinde doğrusal olmayan malzeme davranışındaki yük-yerdeğiştirme ilişkisinden değişken bir rijitliğin olduğu görülmektedir. Yani doğrusal olmayan malzeme davranışına ait eğrinin her bir noktasında farklı bir rijitlik söz

konusudur. Bu çalışmada pratik uygulama açısından elastik ortamlar için mevcut olan empedans fonksiyonlarının kullanılması ile doğrusal olmayan zemin davranışına ait dinamik rijitlikler geliştirilecektir. Yani şerit temel plağı için eşdeğer lineer empedans fonksiyonları elde edilecektir. Bunun için dinamik analizler sonucunda doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarına ait kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri arasında bir bağıntının geliştirilmesi gerekmektedir.

Doğrusal olmayan zemin malzeme davranışına ait şerit temel plağının empedans fonksiyonları için elde edilecek eşdeğer lineer empedans fonksiyonlarına geçiş, dış yük etkisi altında tüketilen enerji miktarının hesaplanması ile dikkate alınacaktır (Zhang ve Tang, 2006; 2007).



Şekil 4.7. Zemin ortamının farklı malzeme davranışları için kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinde enerji

$$\delta = \frac{W_{LEZ} - W_{NLZ}}{W_{LEZ}} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de W_{LEZ} zemin ortamının doğrusal davranış göstermesi halinde dış yük etkisi altında tüketilen enerjiyi, W_{NLZ} zemin ortamının doğrusal olmayan davranış göstermesi halinde dış yük etkisi altında tüketilen enerjiyi ve δ ise *doğrusal olmayan davranış göstergesini* tanımlamaktadır.

Doğrusal olmayan davranış göstergesinin değişimine bağlı olarak;

- doğrusal olmayan davranış göstergesi arttıkça zemin ortamı daha fazla elastik ötesi davranış gösterir.
- zeminin doğrusal olmayan davranışı arttıkça geometrik sönüm (radyasyon sönümü) azalır.
- radyasyon sönümü nonlinear davranışın olduğu zeminlerde, lineer davranışın olduğu zeminlere göre daha azdır.

İki farklı malzeme modeli arasındaki tüketilen enerji farkına dayalı olarak elde edilen bu katsayı ile doğrusal olmayan zemin davranışına ait düşey ve yatay rijitlik değerleri eşdeğer lineer olarak hesap edilecektir.

$$K_{NLZ,v} = K_{v0} \times k_v \times (1 - \delta_v) \quad (4.2)$$

$$K_{NLZ,h} = K_{h0} \times k_h \times (1 - \delta_h) \quad (4.3)$$

Burada esas problem farklı malzeme davranışları altında tüketilen enerjinin hesabında her iki malzeme modeli için de ortak yenilme sınırının belirlenmesi gerekmektedir. Yani doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranışları için düşey ve yatay doğrultularda tüm frekans değerlerine ait dış yük etkisi altında olabilecek üst sınır değer (U_{max}) belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen limit deplasman durumlarına göre elde edilen “ δ ” değerleri, zemin ortamının doğrusal olmayan davranış sergilemesi durumunda elastik malzeme davranışına göre dinamik rijitlikteki azalma oranını ifade etmektedir.

4.1.2.1. Düşey doğrultu için limit deplasman ve doğrusal olmayan davranış katsayısı

Deprem etkisi altında düşey doğrultudaki rijitlik değerinin üst yapının dinamik performansına etki etmemesine rağmen bu çalışmada düşey yerdeğiştirmeye ait bir limit değer belirlenecek ve doğrusal olmayan zemin davranışına ait düşey empedans fonksiyonu hesap edilecektir. Temel-zemin ortak sisteminde düşey yerdeğiştirmenin

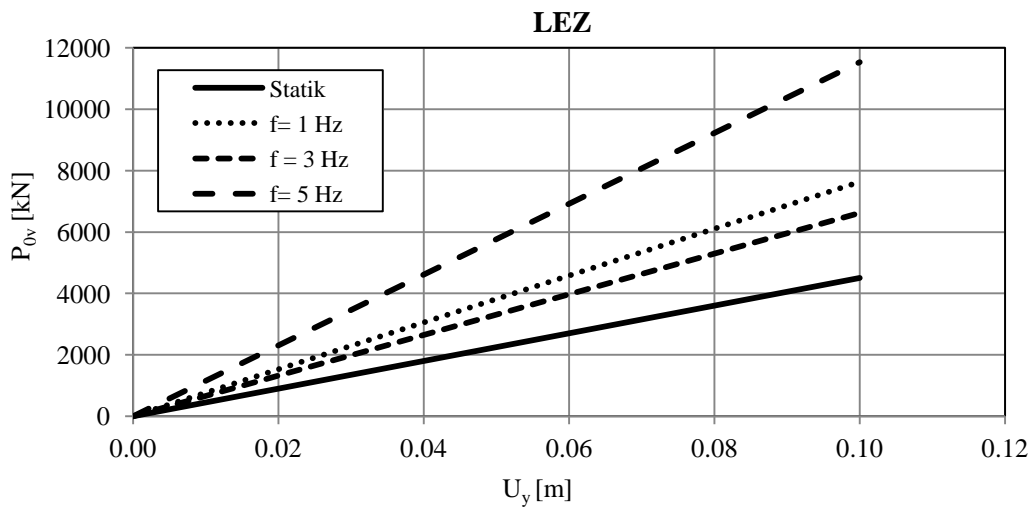
olası maksimum değeri için literatürde binalar ve temeller için verilen oturma kriterlerinden yararlanılarak bir çalışma yapılmış ve limit deplasman değeri belirlenmiştir.

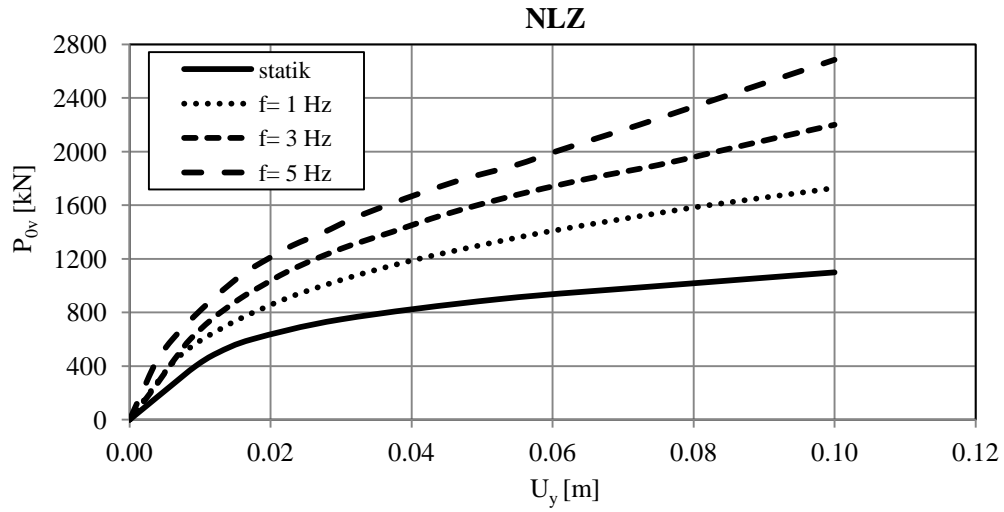
Tablo 4.3. İzin verilebilir toplam oturmalar için kılavuz (cm) (Önalp ve Sert, 2010)

	Killi Zeminde	Kumlu Zeminde
Tekil temeller	6.5	4
Yayıllı temeller (radyejeneral)	10	6
Yığma yapılar	5	3
Çerçeve yapılar	10	5

Yukarıda farklı zemin durumları için tanımlanan oturma kriterleri doğrultusunda Adapazarı bölgesi (killi zemin) için yapılacak yapılarda maksimum düşey deplasmana ait limit değer 10 cm olarak belirlenmiştir.

Belirlenen limit düşey deplasman değeri doğrultusunda doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için temel-zemin ortak sisteminin sonlu eleman analizleri yeniden yapılmıştır. Temel plağı-zemin arakesitindeki yük-yerdeğiştirme ilişkisi, belirlenen limit deplasman değerine kadar, uygulanan harmonik düşey yükün frekans değeri 0-5 Hz aralığında ve $\Delta f = 0.5$ Hz alınarak tüm frekans değerleri için ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 4.8).

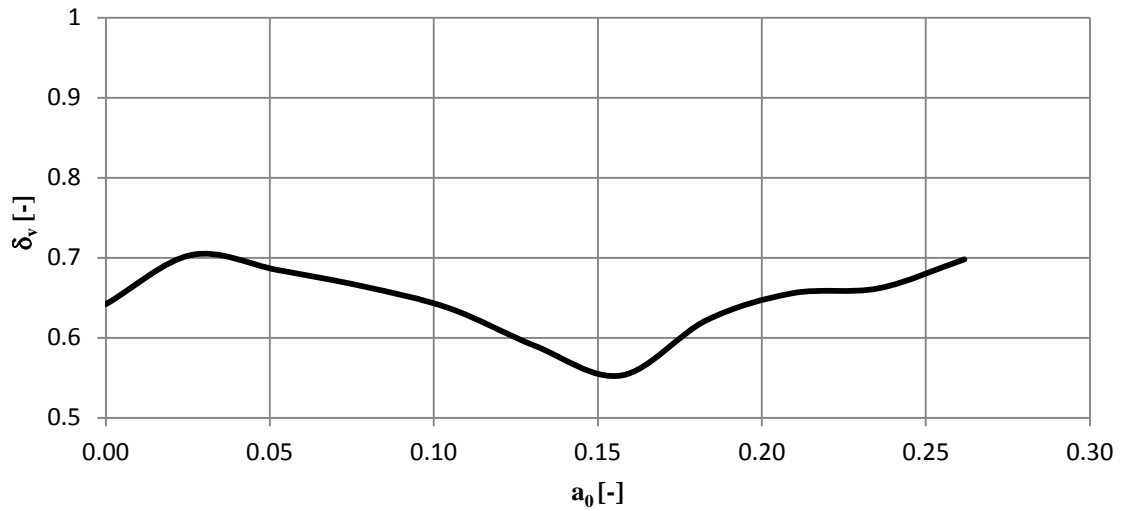




Şekil 4.8. Farklı zemin davranış modellerinde düşey doğrultu sınır değeri için yük-yerdeğiştirme ilişkisi

Düşey olarak uygulanan dış yükün bazı özel durumları için zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan tepkilerine bağlı olarak limit yerdeğiştirme değerine kadar kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.8’de verilmiştir.

Tanımlanan tüm frekans değerleri için hesaplanan sınır değere bağlı olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme grafikleri yardımı ile öncelikle doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için tüketilen enerjiler hesaplanmıştır. Daha sonra denklem (4.1) kullanılarak düşey doğrultu için doğrusal olmayan davranış göstergeleri (δ) tüm frekans değerleri için bulunmuş ve boyutsuz frekans parametresine bağlı olarak Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Düşey doğrultu için doğrusal olmayan davranış göstergesinin boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi

4.1.2.2. Yatay doğrultu için limit deplasman ve doğrusal olmayan davranış katsayısı

Bina ve bina temelleri için deprem etkisi altında yatay doğrultuda zemin yüzeyinde oluşabilecek maksimum (limit) yatay yerdeğiştirmeyi belirlemek amacıyla Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği (2008)'nde tanımlanan D1, D2 ve D3 deprem seviye durumları için Adapazarı bölgesine ait spektrum eğrileri kullanılarak limit deplasmanlar elde edilecektir. Burada;

- D1, 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan (şiddeti yüksek olmayan)
- D2, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (şiddetli deprem)
- D3, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan (yapıların maruz kalabileceği en şiddetli deprem)

depremi ifade etmektedir.

İlgili deprem seviyelerine ait spektrum eğrilerini çizebilmek için öncelikle yönetmelikte tanımlanan kısa periyoda (0.2 s) karşı gelen spektral ivme yani S_s ve 1.0 s'lik doğal titreşim periyoduna karşı gelen spektral ivme değeri yani S_1 elde edilecektir. Bu yönetmelikte Türkiye için enlem ve boylam değerlerine göre yukarıda tanımlanan periyotlara karşı gelen spektral ivme değerleri tablolar halinde verilmiştir. Adapazarı bölgesinin enlem ve boylam değerleri 30.4E, 40.79N olarak tespit edilmiştir. Bu tablolarda verilen spektral ivme değerleri referans zemin olarak tanımlanan kaya zeminler (B sınıfı) için olup Adapazarı bölgesine ait değerler Tablo 4.4'de sunulmuştur.

Tablo 4.4. Adapazarı bölgesi referans zemin durumu için spektral ivme değerleri

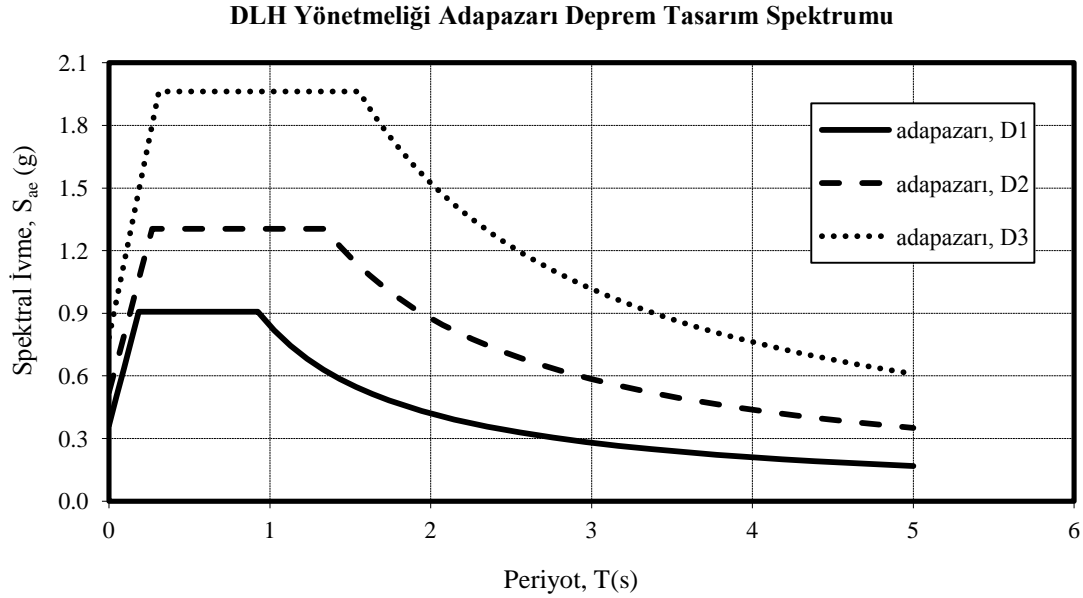
Kısa periyot için spektral ivme, S_s [g]			1.0 s doğal titreşim periyodu için spektral ivme, S_1 [g]		
50 yılda aşılma olasılığı			50 yılda aşılma olasılığı		
%50	%10	%2	%50	%10	%2
0.78	1.45	2.18	0.30	0.73	1.27

Yönetmelikte referans zemin durumu için verilen bu değerleri Adapazarı bölgesinin gerçek zemin özelliklerine göre dönüştürmek amacıyla kısa periyot için F_a ve 1.0 s'lik doğal titreşim periyodu için F_v olarak iki katsayı tanımlanmıştır. Bu yönetmelikte Adapazarı bölgesi, yumuşak zemin ($V_s < 180$ m/s) olarak tanımlanan E sınıfına girmektedir.

Tablo 4.5. Adapazarı bölgesi spektrum eğrileri için zemin düzeltme katsayıları

S_s için düzeltme katsayısı, F_a			S_1 için düzeltme katsayısı, F_v		
50 yılda aşılma olasılığı			50 yılda aşılma olasılığı		
%50	%10	%2	%50	%10	%2
1.164	0.9	0.9	2.8	2.4	2.4

Tüm deprem seviye durumları için ilgili spektral ivme değerleri kullanılarak yönetmeliğin 1.2.2.2 bölümündeki tanımlamalar doğrultusunda spektrum grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Deprem seviye durumları için Adapazarı bölgesine ait spektrum eğrileri

Farklı deprem seviye durumları için oluşturulan tasarım spektrumlarına ait maksimum yatay deplasman değerlerinin hesabı, spektrum eğrilerinden zaman bölgesine geçiş yani ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman verilerinin elde edilmesi ile gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada daha gerçekçi ivme-zaman verilerini elde etmek için matematiksel olarak geçiş yerine ölçekleme yöntemi kullanılarak şimdiye kadar gerçekleşmiş olan depremlere benzeşen kayıtların elde edilmesi amaçlanmıştır. Bunu için "http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database" bölümünde kullanıcı tanımlı spektrum grafikleri yüklenerek ölçekleme yöntemiyle gerçek deprem kayıtlarına benzeşen ivme-zaman kayıtları elde edilmiştir. Aşağıda örnek olarak D2 deprem seviye durumu için programın kullanım adımları belirtilmiştir. İlk olarak spektrum kaydı sisteme yüklenmiştir.

Edit Spectra

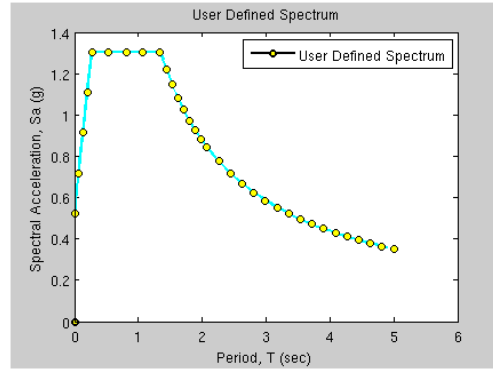
Select Spectrum Model

Select models to generate target spectrum : **User Defined Spectrum** ▾

User Defined Spectrum

Filename: [Upload File](#)

[Download Example file\(.csv\)](#)



[Show notations](#)

[Show chart controls](#)

[Create](#) [Next](#) | [Save Target Spectra](#)

Şekil 4.11. PEER, spektrum kaydının sisteme yüklenmesi

Daha sonra Adapazarı bölgesinin özellikleri genel olarak tanımlanarak ölçeklenmiş deprem kayıtları oluşturulmuştur.

Edit Search

PEER-NGA Spectrum

Magnitude : (min,max)

Fault Type : **Strike Slip(SS)** ▾

D9-95(sec) :

R JB(km) : (min,max)

R rup(km) : (min,max)

Vs30(m/s) : (min,max)

Pulse : **Any Record** ▾

Scaling : [learn more](#)

Single Period :

Factor Limit : (min,max)

T (sec) :

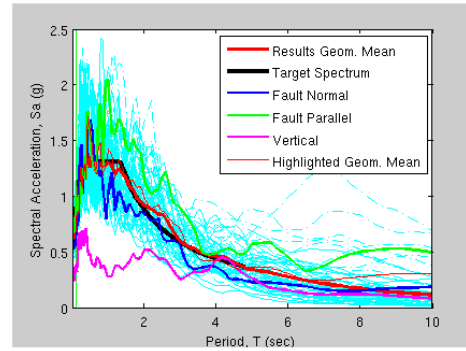
[Additional Search Options](#)

[Load Sample Values](#) [Clear](#)

Weight Function

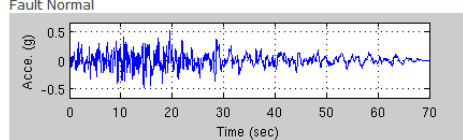
Period : (min max)

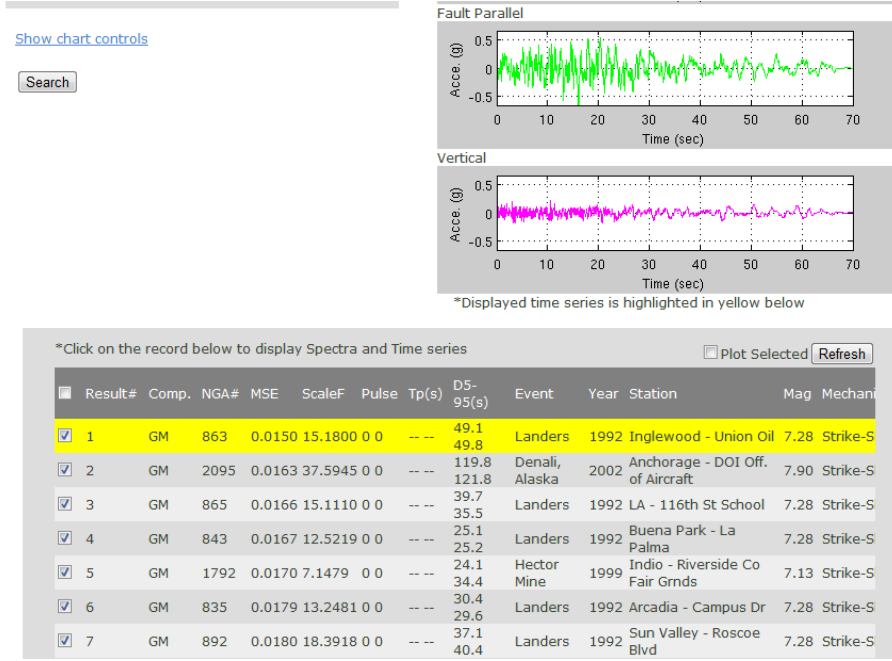
Weight : (wt. wt.)



Zoom In Time (min,max) [Zoom](#)

Scale Time Series [Acceleration](#) ▾

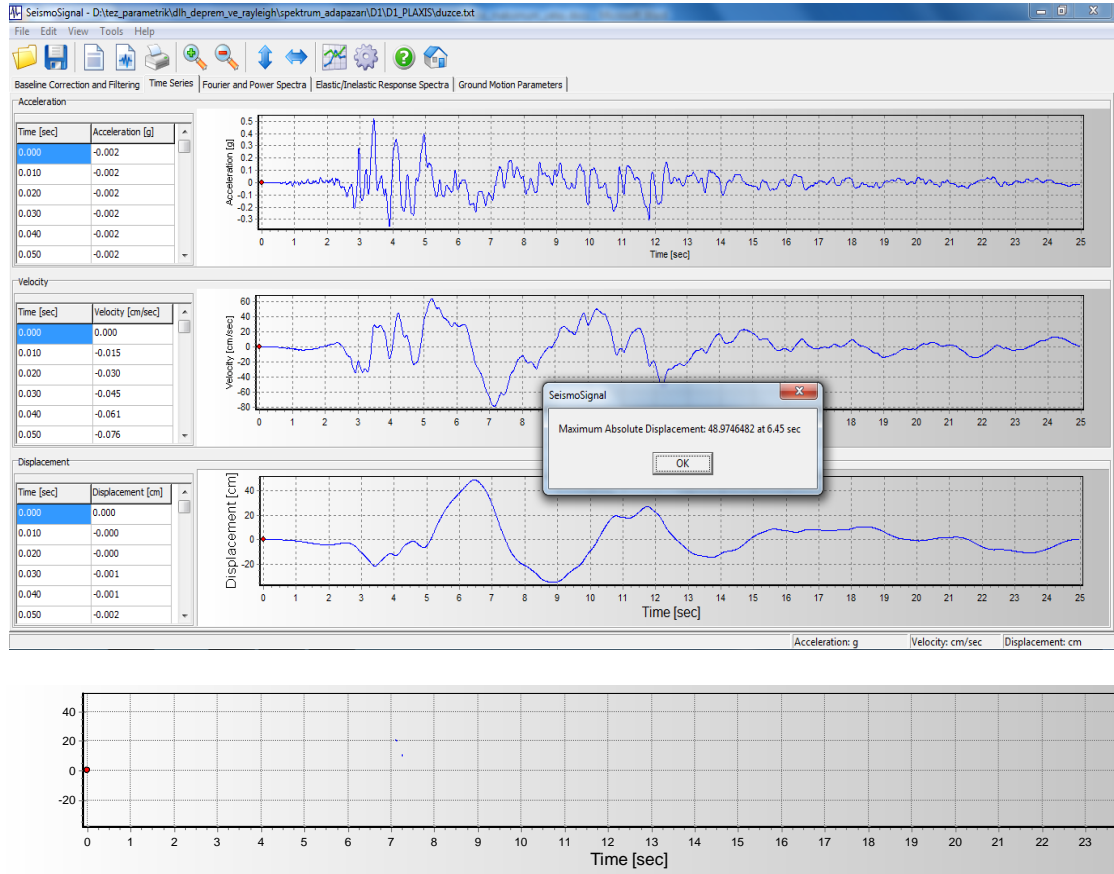




Şekil 4.12. PEER, ölçeklenmiş ivme kayıtlarının elde edilmesi

Ortaya çıkan deprem kayıtları içerisinde spektrum eğrileri hedef spektrum eğrisine en yakın olan yedi adet ölçeklenmiş depreme ait ivme kayıtları alınmıştır.

Son olarak ilgili deprem seviye durumu için elde edilen bu yedi adet ivme kaydına ait yerdeğiştirme-zaman grafiklerinden maksimum yatay yerdeğiştirme değerleri okunmuştur (Şekil 4.13). D1, D2 ve D3 deprem seviye durumları için tüm ivme kayıtlarına ait maksimum yatay yerdeğiştirmelerin ortalamaları alınarak limit sınır değerler elde edilmiştir (DBYBHY-2007) (Tablo 4.6).

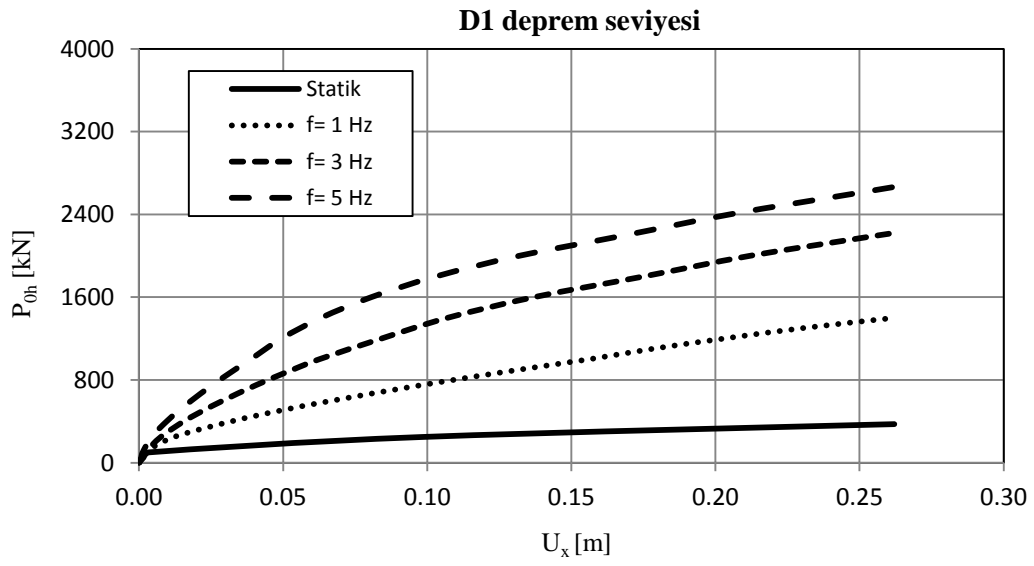
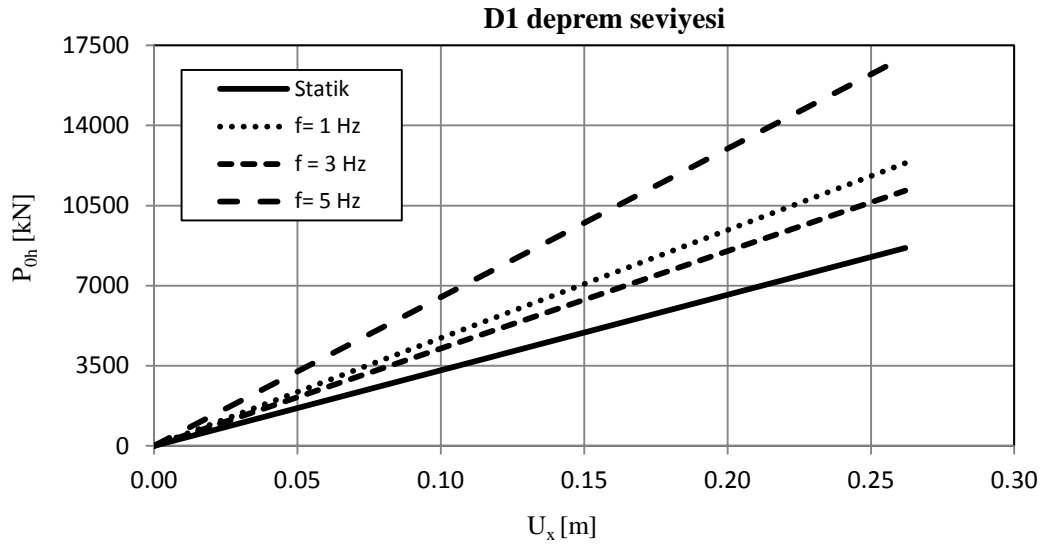


Şekil 4.13. Maksimum yatay yerdeğiştirmelerin elde edilmesi

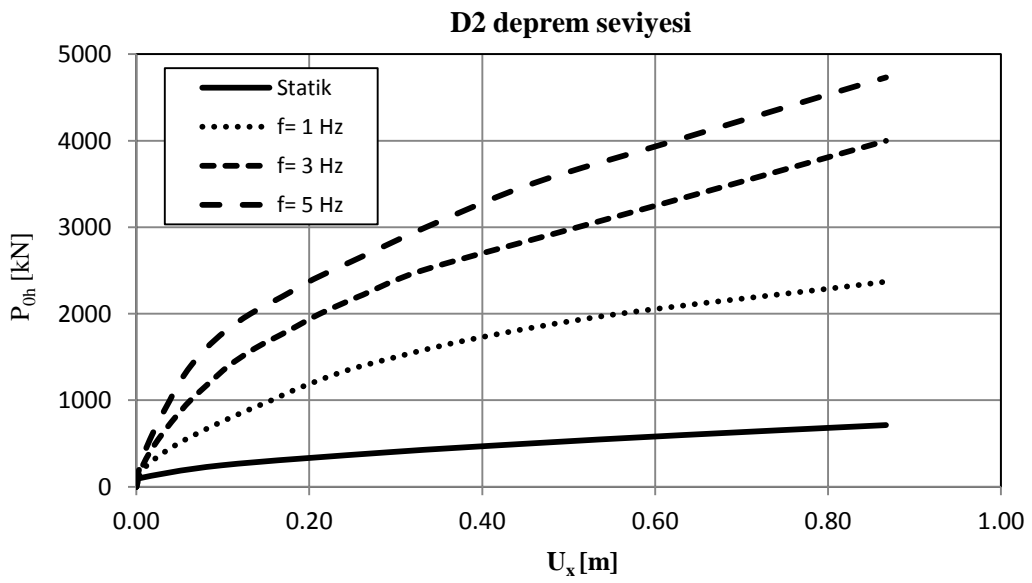
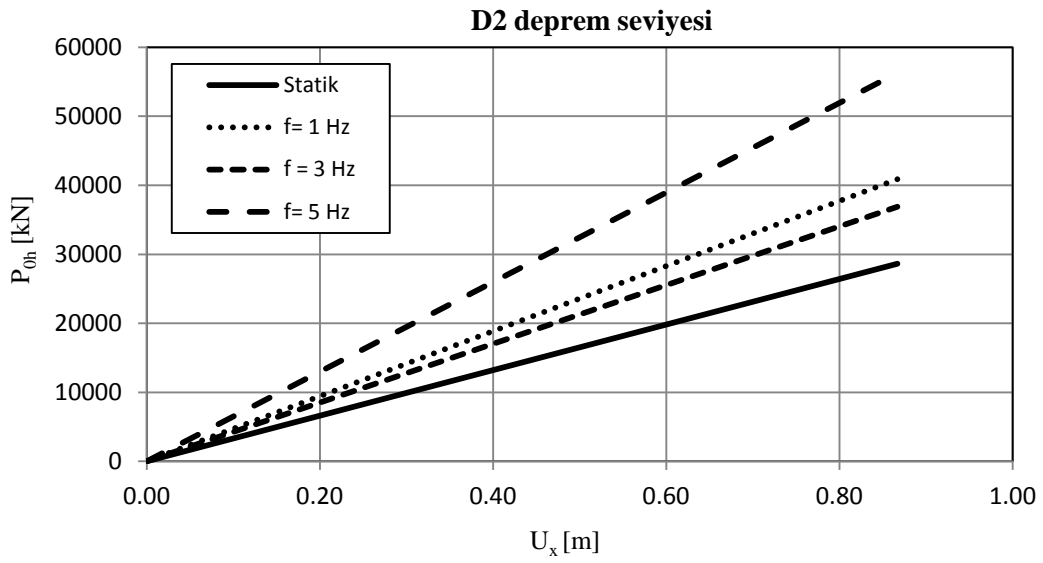
Tablo 4.6. Sınır deprem seviye durumları için limit yatay yerdeğiştirmeler

Deprem seviye sınırı	Ortalama maksimum yatay yerdeğiştirme [cm]
D1	26.2
D2	86.7
D3	122

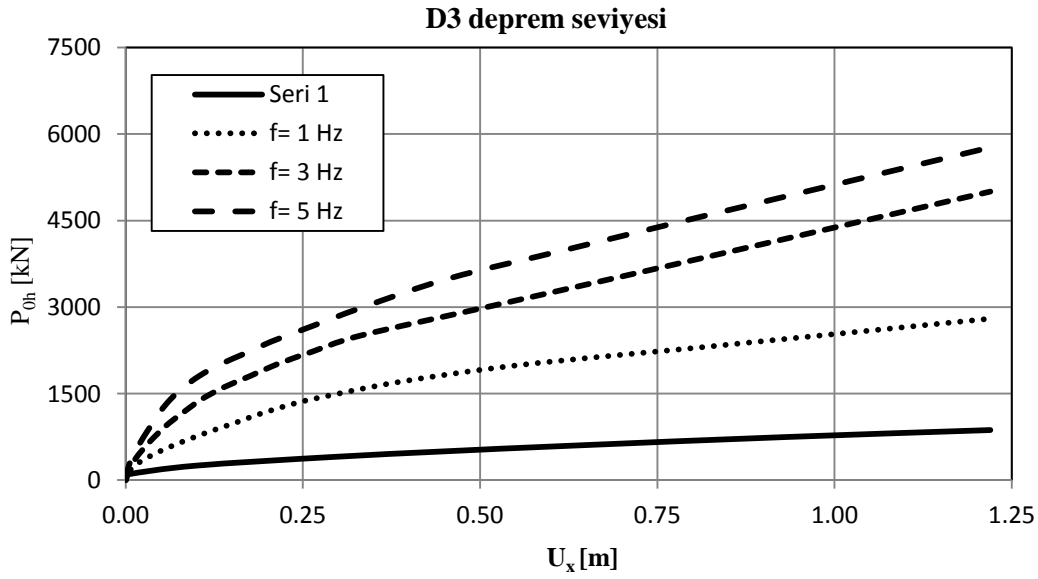
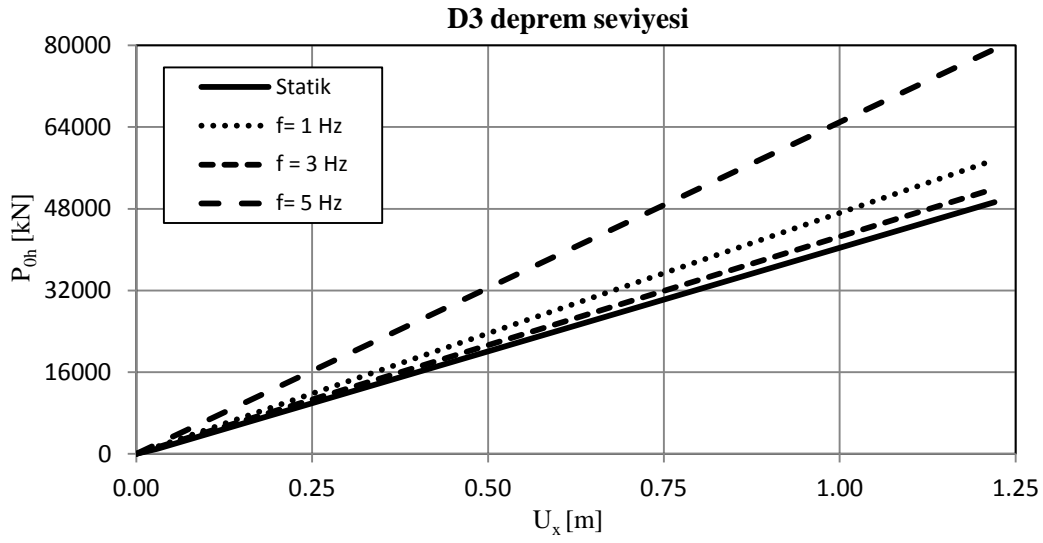
Her bir deprem seviye durumu için belirlenen limit yatay deplasman değerleri doğrultusunda doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için temel-zemin ortak sisteminin sonlu eleman analizleri yeniden yapılmıştır. Temel plağı-zemin arakesitindeki yük-yerdeğiştirme ilişkisi, belirlenen limit deplasman değerlerine kadar, uygulanan harmonik yatay yükün frekans değeri 0-5 Hz aralığında ve $\Delta f=0.5$ Hz alınarak tüm frekans değerleri için ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 4.14 - 4.16).



Şekil 4.14. Farklı zemin davranış modellerinde D1 deprem seviyesi için yük-deplasman ilişkisi



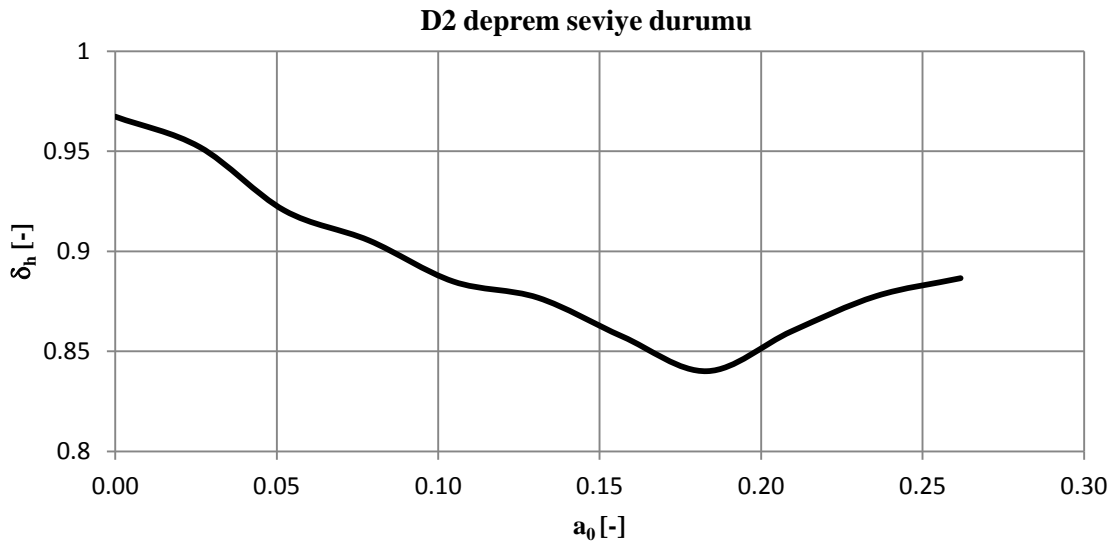
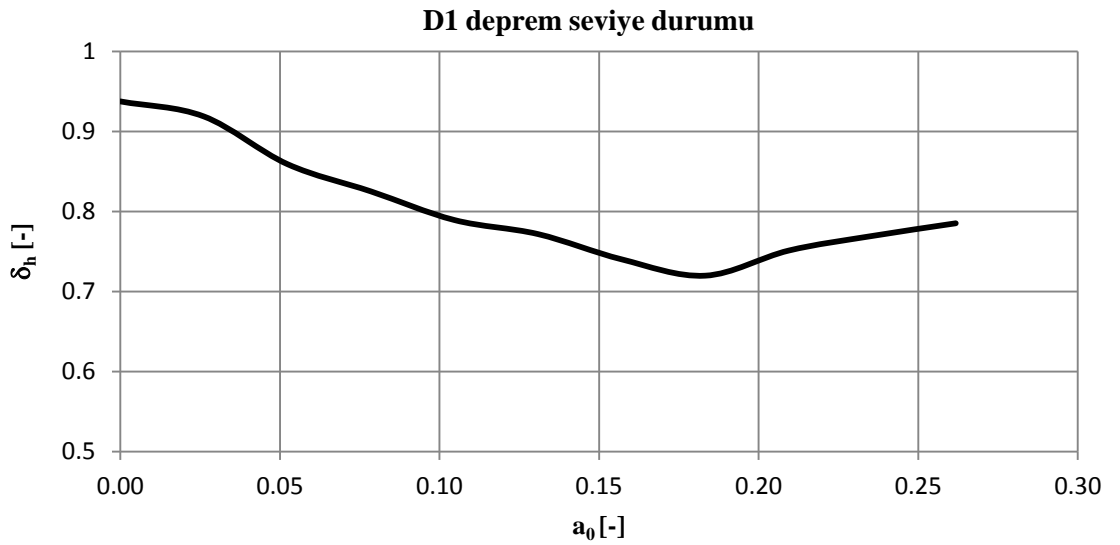
Şekil 4.15. Farklı zemin davranış modellerinde D2 deprem seviyesi için yük-deplasman ilişkisi

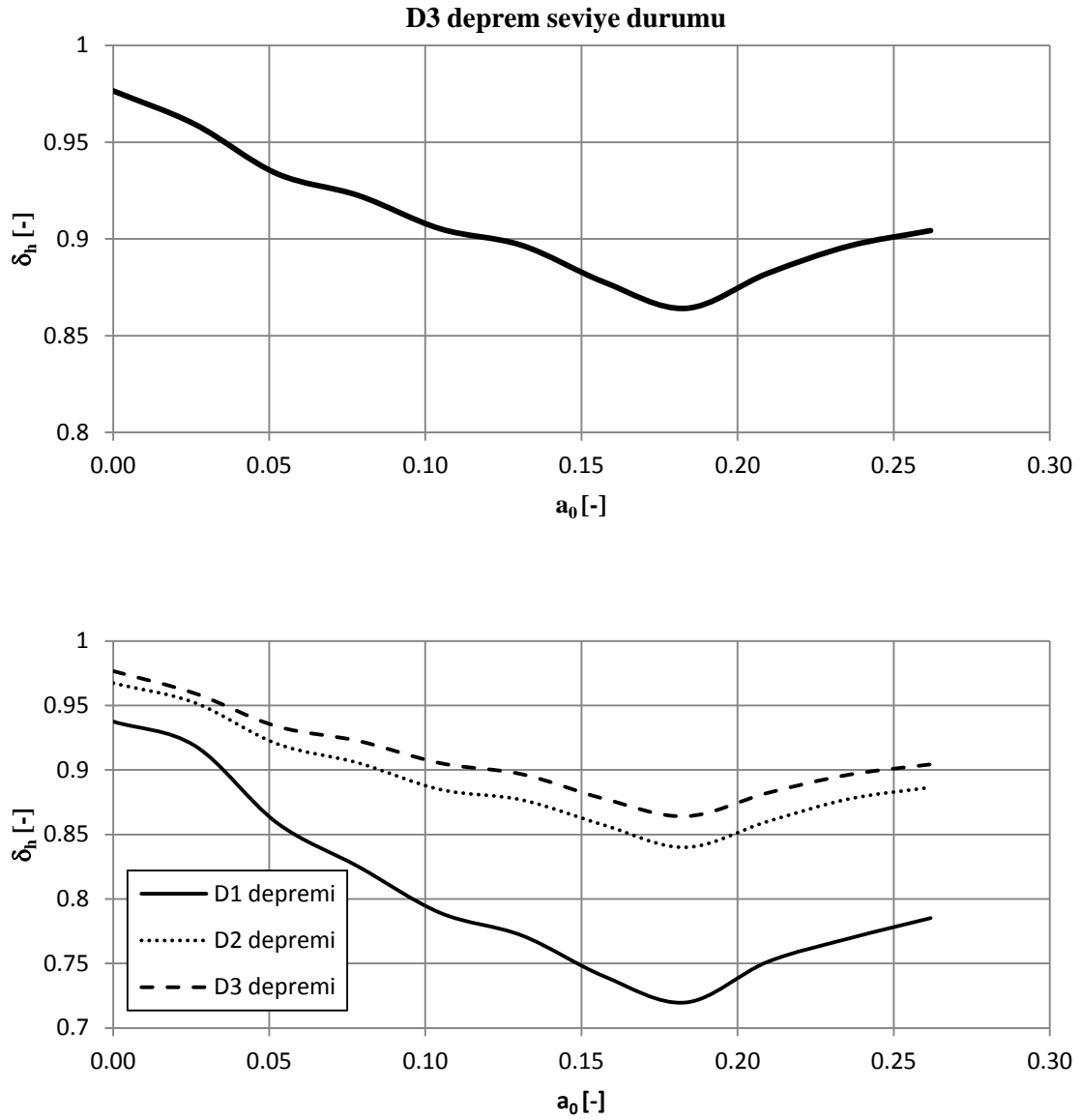


Şekil 4.16. Farklı zemin davranış modellerinde D3 deprem seviyesi için yük-deplasman ilişkisi

D1, D2 ve D3 deprem seviyeleri için zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan tepkilerine bağlı olarak hesaplanan sınır değerlere (26.2 cm, 86.7 cm, 122 cm) kadar oluşan kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 4.14 - 4.16'da verilmiştir.

Tanımlanan tüm frekans değerleri için hesaplanan limit yerdeğiştirmelere bağlı olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme grafikleri yardımı ile öncelikle doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışları için tüketilen enerjiler hesaplanmıştır. Daha sonra denklem (4.1) kullanılarak her bir deprem seviye durumunda yatay doğrultuya ait doğrusal olmayan davranış göstergeleri (δ) tüm frekans değerleri için bulunmuş ve boyutsuz frekans parametresine (a_0) bağlı olarak Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



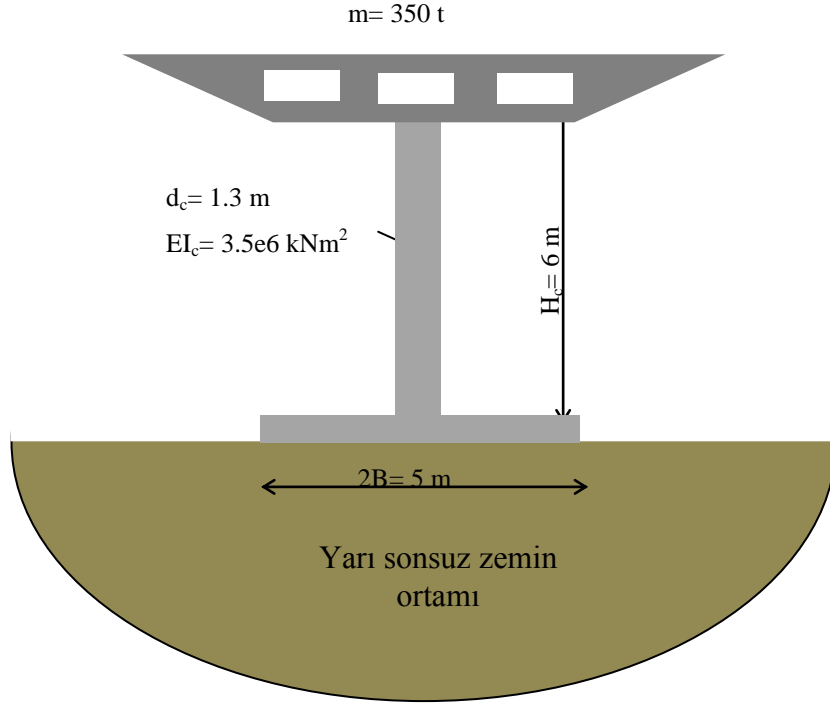


Şekil 4.17. Yatay doğrultu için deprem seviye durumlarına bağlı olarak doğrusal olmayan davranış göstergesinin boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi

4.2. Vaka Analizi

Bu bölümde, Adapazarı bölgesinde zemin mekanik özelliklerinin doğrusal ve doğrusal olmayan davranış göstermesi durumları için elde edilen şerit temel plağına ait dinamik empedans fonksiyonları kullanılarak deprem etkisi altındaki bir yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Sayısal uygulama için, sonuçların doğru bir şekilde

yorumlanması açısından üst yapı olarak köprü ayağı uygulaması seçilmiştir (Mylonakis ve diğ., 2006). Kullanılan yapının özellikleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 18. Vaka analizi için üstyapı ve özellikleri

Çalışmada yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depreminin Düzce kaydı kullanılmıştır. Dinamik analizler SAP2000 V15 sonlu eleman paket programında yapılmıştır. Vaka analizinde, zemin ortamının doğrusal ve doğrusal olmayan davranış göstermesi durumları incelenecektir. Ayrıca temel plağına ait rijitlik değerlerinin statik ve elde edilen dinamik değerleri için ayrı ayrı analizler yapılacak, sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilecektir.

Dinamik analizlere geçmeden önce zemin ortamının idealleştirilmesi ve empedans değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. İlk olarak yüzeysel şerit temel plağına ait belirtilen geometri ve malzeme özellikleri için elastik statik rijitlik değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. Elastik malzeme davranışı için statik rijitlikler

Doğrultu	Değer
Düşey	$\frac{K_{v0}}{2L_t} = \frac{0.73G}{1-\nu} = 41781 \text{ kN/m}$
Yatay	$\frac{K_{h0}}{2L_t} = \frac{2G}{2-\nu} = 38318 \text{ kN/m}$
Dönme	$\frac{K_{r0}}{2L_t} = \frac{\pi G B_t^2}{2-\nu} = 376188 \text{ kNm}$

Daha sonra uygulanan yer hareketine bağlı olarak doğrusal zemin davranış için, bu çalışmada elde edilmiş olan grafikler yardımı ile dinamik rijitlik katsayıları hesaplanacaktır. Öncelikle analizlerde kullanılacak deprem kaydının etkin frekans değeri için boyutsuz frekans parametresinin hesaplanması gerekmektedir. Boyutsuz frekans;

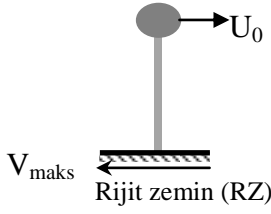
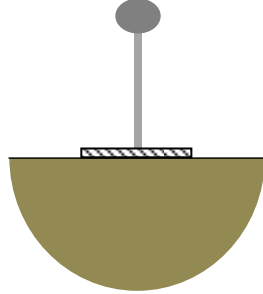
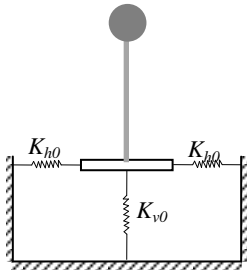
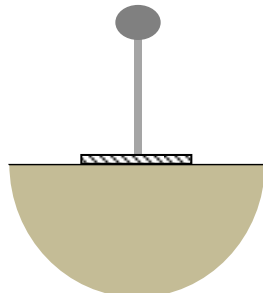
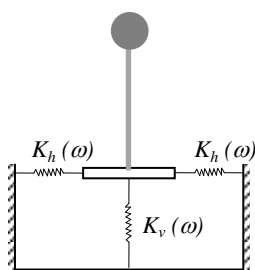
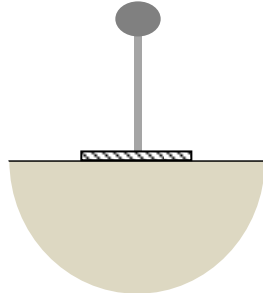
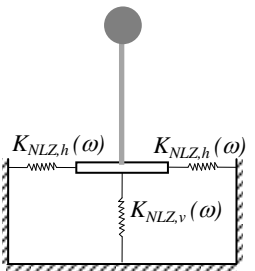
$$a_0 = \frac{\bar{\omega} * B_t}{c_s} = \frac{2 * \pi * 0.251 * 2.5}{120} = 0.033 \quad (4.4)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Boyutsuz frekans parametresine bağlı olarak elastik ortamlar için dinamik rijitlik katsayıları, sırasıyla düşey ve yatay doğrultular için elde edilen grafiklerden $k_v = 1.65$, $k_h = 1.59$ olarak okunmuştur. Daha sonra zeminin nonlinear davranış sergilemesi durumunu ifade eden doğrusal olmayan davranış göstergesinin, düşey ve yatay doğrultuda D1 deprem seviye durumu için $\delta_v = 0.7$ ve $\delta_h = 0.88$ değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Sınır durum olarak D1'in (0.9g) alınmasının sebebi DBYBHY-2007'deki tasarım spektrumun olası maksimum durumuna (1.0g) yakın olmasıdır. Bu katsayılar sonucunda analizlerde zemin ortamının idealleştirilmesinde kullanılacak tüm dinamik rijitlik değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4.8).

Tablo 4.8. Kullanılacak modeller için empedans değerleri

Doğrultu	k [-]	δ [-]	Lineer Statik	Lineer Dinamik	Nonlinear Dinamik
Düşey [kN/m]	1.65	0.70	41781	68939	20681
Yatay [kN/m]	1.59	0.88	38318	60926	7311
Dönme [kNm]	-	-	376188	-	-

Tablo 4.9. İlgili modellerin deprem etkisi altındaki dinamik davranış karakteristikleri

Gerçek durum	model	T [s]	U_0 [cm]	V_{maks} [kN]
 <p>Rijit zemin (RZ)</p>		0.533	5.486	2667
 <p>LEZ, statik empedans</p>		0.803	3.156	1533
 <p>LEZ, dinamik empedans</p>		0.715	3.782	1834
 <p>NLZ, dinamik empedans</p>		1.474	1.700	825.8

Zemin ortamının modellenmesi amacıyla hesabı yapılan tüm rijitlik değerleri için, yukarıda tanımlanan (Tablo 4.8) üstyapının belirlenen deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiş ve analizlerin yapıldığı tüm modellerde üstyapının periyot (T),

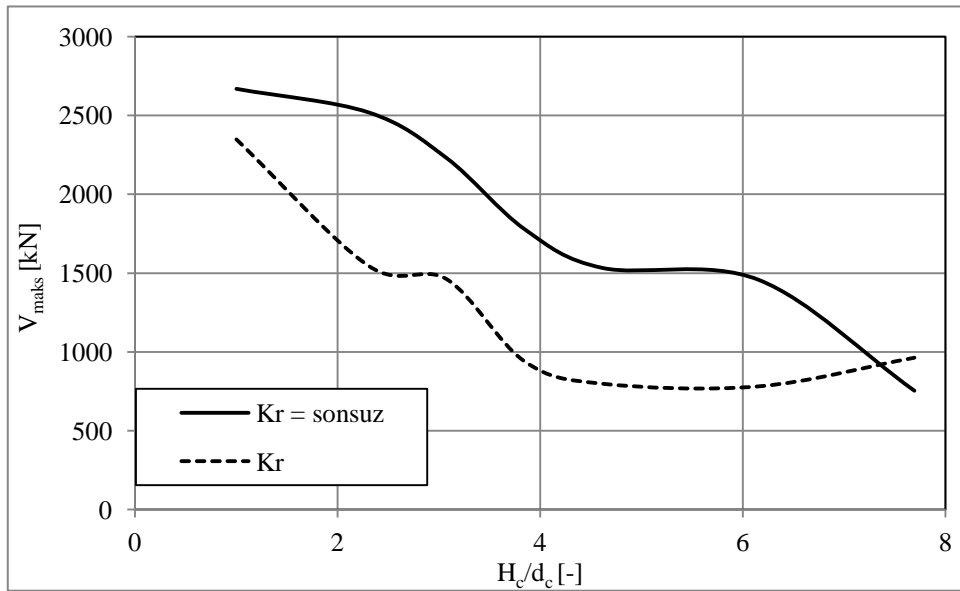
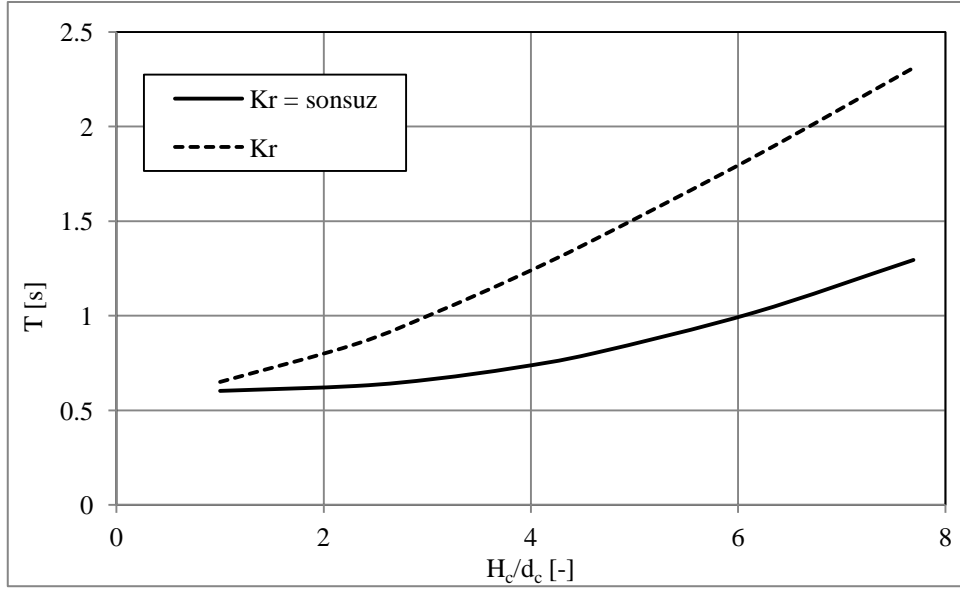
tepe noktası maksimum görelî deplasmanı (U_0) ve maksimum taban kesme kuvveti (V_{max}) değerlerinin değişimi elde edilmiştir (Tablo 4.9).

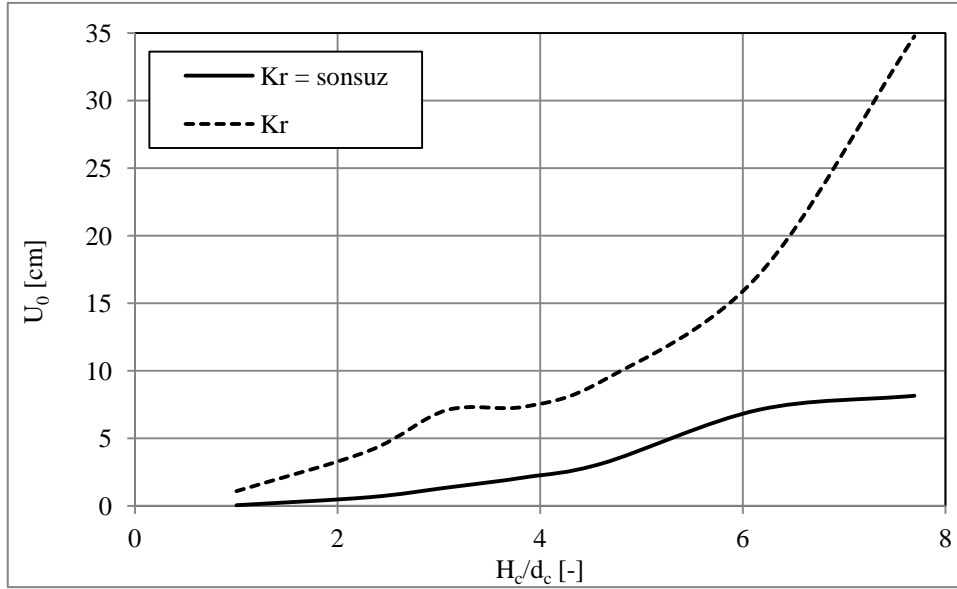
Bu çalışmalar ve analizlerden anlaşılmıştır ki;

- a) Zemin ortamının mekanik özellikleri doğrusal olmayan malzeme davranışını ifade edecek şekilde tanımlandığında, deprem etkisi altında elastik zemin davranışına göre üstyapının periyodu artmış bununla birlikte yapıya gelen taban kesme kuvveti ise azalmıştır.
- b) Deprem etkisi altında üstyapının tepe noktasında temel seviyesine göre oluşan görelî yatay yerdeğiştirme, doğrusal olmayan zemin davranışında en azdır.
- c) Elastik zemin ortamında uygulanan deprem hareketinin frekans parametrelerine bağlı olarak hesaplanan dinamik rijitliklerin kullanılması durumunda, statik rijitliklere göre;
 - yapı periyodu azalmış,
 - görelî kat ötelemesi artmış,
 - üstyapıya gelen taban kesme kuvveti artmıştır.
- d) Uygulanan yer hareketi etkisi altında doğrusal olmayan malzeme davranışı;
 - yapı periyodunu zemin ortamının elastik olması durumuna göre % 106, rijit olması durumuna göre ise % 176 arttırmış,
 - tepe noktası görelî deplasmanı ve taban kesme kuvvetini zemin ortamının elastik olması durumuna göre % 55, rijit olması durumuna göre ise % 69 azaltmıştır.

Doktora tezi olarak yapılan bu çalışmada, Adapazarı bölgesini ifade edecek zemin özellikleri dikkate alınarak şerit temel plağı için sadece düşey ve yatay doğrultulara ait dinamik rijitlik değerleri hesap edilmiş, dönme rijitliği elde edilememiştir. Bu nedenle dönme empedans değerinin deprem etkisi altında üstyapının dinamik davranışına etkisini görmek için de analizler yapılmıştır. Kurulan modelde, lineer statik durum için elde edilmiş olan zemin ortamını tanımlayacak empedans değerleri

kullanılmıştır. Dönme rijitliğinin sonsuz veya belirli bir değere (lineer statik rijitlik) sahip olması durumları için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Bu analizlerde üstyapının narinliğine (H_c/d_c) bağlı olarak deprem etkisi altında yapının periyot, göreceli tepe noktası deplasmanı ve taban kesme kuvveti değerlerinin değişimi elde edilmiştir (Şekil 4.19).

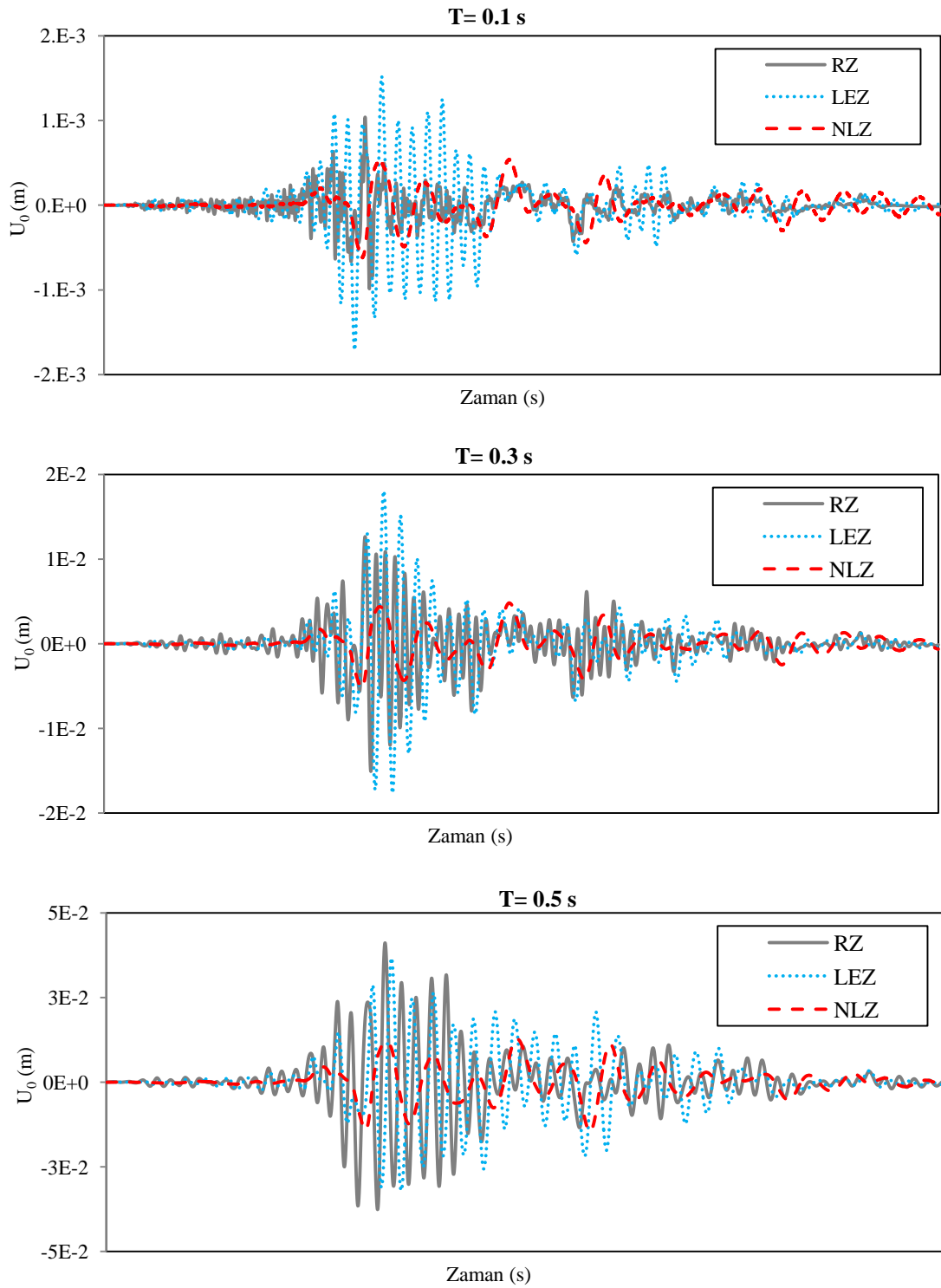




Şekil 4.19. Eğilme rijitliğinin yapının deprem davranışına etkisi

Grafikler incelendiğinde, periyot ve görel yerdeğiştirme değerleri için narinlik değeri arttıkça dönme rijitliğinin etkisi de artmaktadır. Yani narin yapılarda dönme rijitliğinin tanımlanması yapının deprem etkisi altındaki dinamik davranışını çok büyük oranda etkilemektedir. Temel plağı için tanımlanan dönme empedansının deprem etkisi altında üstyapıya gelen taban kesme kuvvetine etkisi incelendiğinde ise narinlik değişiminin belirgin bir etki yapmadığı gözlemlenmiştir.

Farklı periyotlara sahip üstyapının zeminin rijit, doğrusal ve doğrusal olmayan davranış göstermesi durumları için yer hareketi etkisi altında dinamik analizleri yapılmış ve üstyapıya ait görel tepe noktası yerdeğiştirmesinin zaman geçişleri karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir (Şekil 4.20).

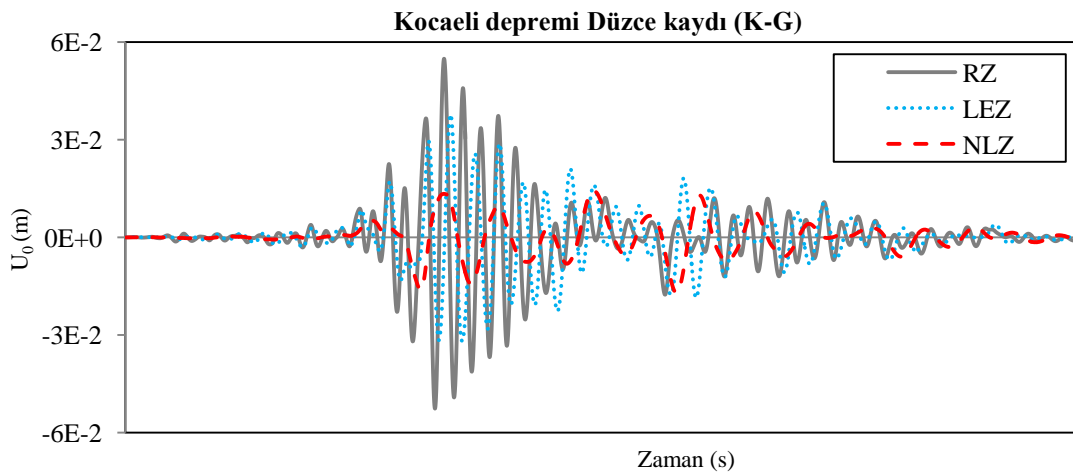


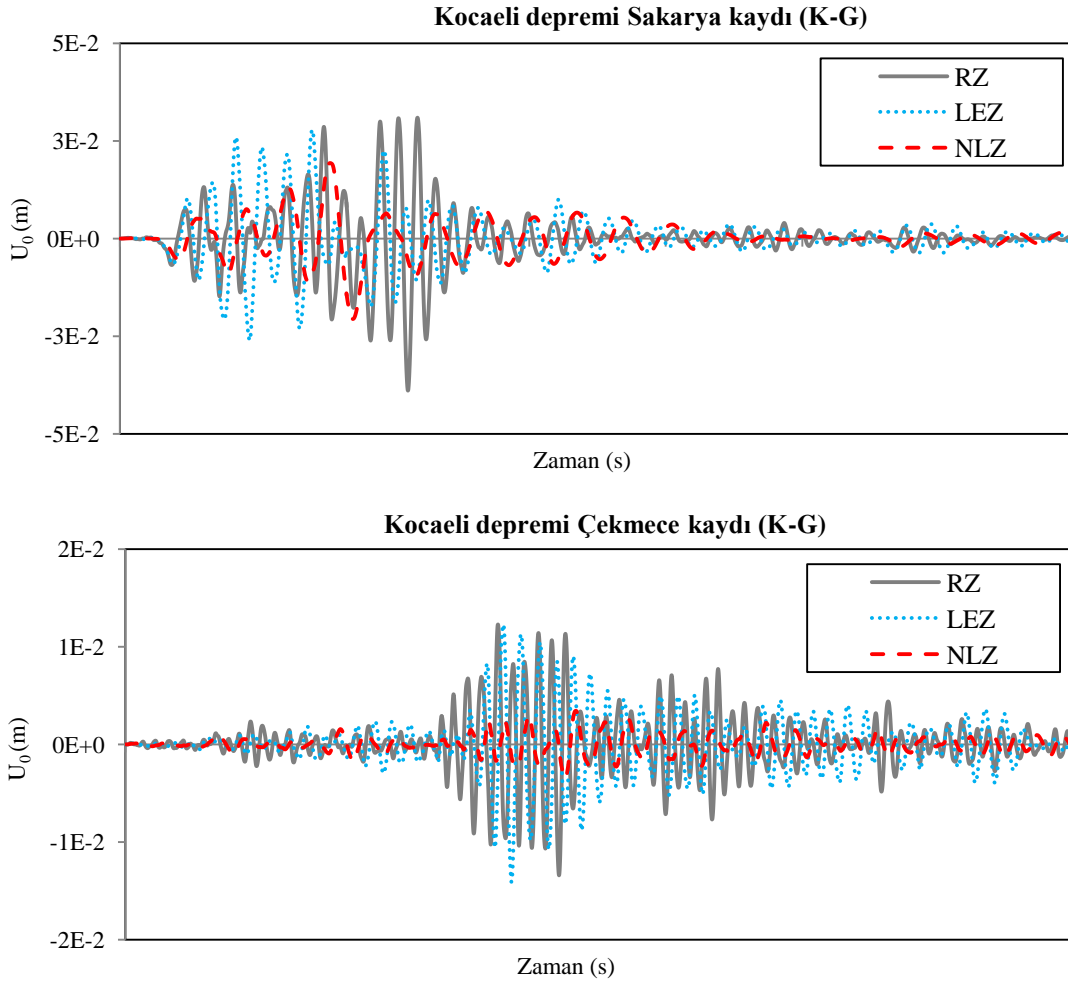
Şekil 4.20. Yerdeğiştirmenin farklı zemin davranışları için üstyapı periyoduna bağlı değişimi

Şekil 4.20 incelendiğinde üstyapı için, serbest titreşim periyodunun değişimi zemin ortamının doğrusal olmayan davranış gösterdiği durumda, yapı tepe noktası rölatif

yerdeşitirmelerini zemin ortamının sonsuz rijit ve lineer elastik olması durumlarına göre farklılaştırmamış tüm durumlar için daha düşük yerdeşitirme değerleri vermiştir. Düşük periyot değerinde (daha rijit üstyapı) lineer elastik zemin davranışı zemin ortamının sonsuz rijit olması durumuna göre rölatif deplasman değerini arttırmış fakat yapı rijitliği azaldıkça (üstyapı periyodunun artması) sonsuz rijit zemin ortamı için oluşan yerdeşitirme değerlerinde bir artış görülmüştür. Sonuç olarak yapı-zemin etkileşiminin doğrusal olmayan malzeme davranışı altında ele alındığı sistemlerde, üstyapı görelı yatay yerdeşitirme değerleri yapı-zemin etkileşiminin olmaması durumuna göre daha düşük değerlerde kalmış buda etkileşimin olumlu yönde katkı gösterdiğinin kanıtı olmuştur. Ayrıca üstyapı periyodu arttııkça tüm zemin durumları için beklendiği gibi görelı yatay yerdeşitirme değerleri de artmıştır.

Son olarak ise model özellikleri verilen üstyapının farklı genlik ve frekans içeriğine sahip yer hareketleri etkisi altındaki dinamik davranışı zemin ortamının rijit, doğrusal ve doğrusal olmayan davranış göstermesi durumları için incelenmiştir. Üstyapı tepe noktası görelı yerdeşitirmesinin zaman geçmişi farklı zemin davranışları için Şekil 4.21'de verilmiştir. İlave olarak üstyapının dinamik karakteristiklerinin yapı-zemin etkileşiminin farklı ele alınması durumları için değişimi Tablo 4.10'da verilmiştir.





Şekil 4.21. Yerdeğiştirmenin farklı zemin davranışları için yer hareketine bağlı değişimi

Şekil 4.21 ve Tablo 4.10 incelendiğinde, üstyapı tepe noktası rölatif yerdeğiştirme değerleri, farklı frekans içeriğine sahip yer hareketleri için, zemin ortamının mekanik davranışından bağımsız değişimler göstermektedir. Bunun nedeni yer hareketinin etkin frekans değerlerine bağlı olarak zemin ortamını ifade eden dinamik rijitlik değerlerinin elde edilmiş olmasıdır. Düzce kaydı için yapı-zemin etkileşimi her iki malzeme davranışı (doğrusal ve doğrusal olmayan) için de çok etkili sonuçlar verirken (lineer davranışta maksimum yerdeğiştirme değerinde %31 azaltma, lineer olmayan davranışta maksimum yerdeğiştirme değerinde %69 azaltma), Sakarya kaydı için yapılan analizlerde etkileşimin olumlu katkısı olmakla birlikte biraz daha azalmıştır (doğrusal davranış için %29 azaltma, doğrusal olmayan davranış için %47 azaltma). Çekmece yer hareketi kaydı etkisinde yapılan dinamik analizlerde ise lineer

elastik malzeme davranışını altında yapı-zemin etkileşiminin ele alındığı sistemde, etkileşimin olmaması durumuna göre yaklaşık aynı değerler elde edilmiş yani zemin ortamının doğrusal davranış sergilemesi durumu için yapı-zemin etkileşiminin olması bir etki yapmamıştır. Fakat aynı yer hareketi etkisi altında zemin ortamının doğrusal olmayan malzeme davranışı altında ele alındığı yapı-zemin etkileşimi probleminde üstyapıya ait görelî yatay yerdeğiştirme değerinde %74 azalma görülmüş yani zemin ortamının doğrusal olmayan davranış sergilemesi durumu için yapı-zemin etkileşiminin olması olumlu yönde çok büyük bir etki yapmıştır. Sonuç olarak yapı-zemin etkileşim probleminde yapı ve zemine ait mekanik özelliklerin yanında etki eden dinamik dış yükün frekans içeriğinin de sonuçlar üzerinde büyük etki yaptığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.10. Farklı zemin davranışları için üstyapının dinamik parametrelerinin yer hareketine bağlı değişimi

Deprem kaydı	Zemin davranışı	T [s]	U_0 [cm]
Düzce $a_{\max}=0.33g$ $f_{\max}=0.251$ Hz	Rijit	0.533	5.486
	Doğrusal	0.715	3.782
	Doğrusal olmayan	1.474	1.700
Sakarya $a_{\max}=0.29g$ $f_{\max}=0.562$ Hz	Rijit	0.533	3.889
	Doğrusal	0.734	2.782
	Doğrusal olmayan	1.337	2.060
Çekmece $a_{\max}=0.156g$ $f_{\max}=1.39$ Hz	Rijit	0.533	1.339
	Doğrusal	0.760	1.340
	Doğrusal olmayan	1.154	0.348

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Yapı-zemin dinamik etkileşimi probleminin altsistem yaklaşımı ile ele alınması ve üstyapının deprem etkisindeki davranışında zemin ortamının gerçekçi bir şekilde empedans fonksiyonları kullanılarak idealize edilmesi etkileşim probleminin çözümünü kolaylaştırmaktadır. Yapılan bu çalışmada, yüzeysel rijit şerit temel plağı için Adapazarı bölgesine ait yerel zemin koşullarının doğrusal olmayan mekanik özelliklerini içeren düşey ve yatay doğrultulardaki temel-zemin ara kesitinde tanımlanan empedans fonksiyonları zeminin Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik davranışı dikkate alınarak elde edilmiştir.

Doğrusal olmayan dinamik empedans fonksiyonları, temel-zemin sisteminin iki boyutlu düzlem şekildeğiştirme koşulları altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Burada sonlu eleman yönteminin seçilmesinin başlıca nedeni zemin malzemesinin mekanik özellikleri için elastik ötesi davranışın kolay tanımlanabilmesidir. Ayrıca kullanılan programda (Plaxis V10, 2D Dinamik), ayrıklaştırılan sonlu zemin ortamının sonsuzluğunu ifade eden geometrik sönümün ve malzeme sönümünün uygulanabilmesi için eklenen modüller yardımı ile zemin ortamında dalga yayılımının gerçeğe en yakın bir şekilde tanımlanması sağlanmıştır. Harmonik yük etkisi altında yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda şerit temeller için tanımlanmış olan mevcut statik empedans fonksiyonları kullanılarak Adapazarı bölgesi yerel zemin koşullarını ifade eden, yatay ve düşey doğrultularda lineer elastik ve elasto-plastik malzeme davranışları için deprem hareketinin etkin frekans içeriği dikkate alınarak dinamik rijitlikler geliştirilmiştir.

Adapazarı bölgesi zemin koşulları için geliştirilen dinamik empedans fonksiyonlarının yapı-zemin etkileşim probleminin çözümünde uygulamasını göstermek ve üstyapının deprem yer hareketi etkisindeki dinamik davranışını

inceleyebilmek için köprü ayağı örneği üzerinde sayısal uygulamalar yapılmıştır. İncelemeler doğrultusunda elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- a) Deprem etkisi altında üstyapının dinamik davranışına zemin ortamının mekanik davranışının etkisini saptamak amacı ile, yapıya ait dinamik karakteristikler yani periyot (T), maksimum taban kesme kuvveti (V_{maks}) ve tepe noktası görelî yatay yerdeğiştirme bileşenlerinin değişimleri incelenmiştir. Zemin ortamının farklı mekanik davranışlarını (rijit, lineer elastik ve nonlinear) ifade eden empedans fonksiyonları kullanılarak üstyapının 1999 Kocaeli depremi Düzce kaydı etkisinde dinamik analizleri yapılmıştır. Çözümler sonucunda, üstyapı tepe noktası görelî yerdeğiştirme ve maksimum taban kesme kuvveti değerlerinin, zemin ortamının doğrusal olmayan mekanik davranışı için tanımlanan dinamik rijitliklerin kullanıldığı durumda en az olduğu görölmüştür. Elde edilen bu sonuçlar yapı-zemin etkileşiminin olumlu katkısının olduğunu göstermektedir. Zemin mekanik davranışının üstyapı periyodunun değişimine etkisi incelendiğinde ise, lineer ve nonlinear malzeme davranışları için tanımlanan empedans fonksiyonlarının kullanılması halinde, yapının zemine rijit bağlı olması durumuna göre periyotta büyük artışlar ortaya çıkmıştır. Bu artış beklenen bir sonuçtur. Çünkü zemin rijitliğindeki azalmanın yapının titreşim periyodunu arttırdığı bilinmektedir. Lineer elastik zemin davranışı için elde edilen statik ve dinamik empedans değerlerinin etkisi incelendiğinde ise, dinamik rijitliklerin kullanılması halinde statik empedans fonksiyonlarının kullanılması durumuna göre maksimum taban kesme kuvveti ve görelî kat ötelemesi değerleri artmış, yapı periyodu ise azalmıştır.
- b) Bu çalışmada rijit şerit temel plağı için dönme rijitliği elde edilemediğinden dolayı bu değerin üstyapının dinamik davranışına etkisi zemin ortamını ifade eden statik rijitlikler kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde yapıya ait periyot, maksimum taban kesme kuvveti ve tepe noktası görelî yerdeğiştirme değerlerinin değişimi H_c/d_c parametresine bağlı olarak elde edilmiştir.

Yapı narinleştikçe, yani H_c/d_c (boyutsuz köprü yüksekliği) arttıkça, periyot ve görelî yerdeğiştirme değerleri için dönme rijitliğinin etkisi de artmaktadır. Analizler sonucunda, narin yapılarda dönme empedansının tanımlanmasının, yapının deprem etkisi altındaki dinamik davranışını çok büyük oranda etkilediği görülmüştür.

- c) Üstyapı periyodu değişiminin (rijitliğinin değişimi), yapının zemine rijit bağlı olması ve zemin ortamı mekanik özelliklerinin lineer ve nonlineer davranış göstermesi durumları için elde edilen empedans fonksiyonlarının kullanılması halinde etkisini görmek amacıyla ortak sistemin deprem hareketi altında dinamik analizleri yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, incelenen tüm periyot değerlerinde üstyapı tepe noktasına ait en küçük yerdeğiştirmeler zeminin doğrusal olmayan mekanik davranışını içeren empedans fonksiyonları ile elde edilmiştir. Ayrıca periyot değeri arttıkça lineer elastik malzeme davranışını tanımlayan empedans değerlerinin de olumlu katkısı olmuştur.
- d) Son olarak ise üstyapının dinamik davranışına; yapının zemine rijit bağlı olması ve temel-zemin arakesitinde lineer elastik ve nonlineer malzeme özellikleri için elde edilen dinamik empedans fonksiyonlarının kullanılması durumlarında, farklı frekans içeriğine sahip deprem hareketlerinin etkisini görmek amacıyla analizler yapılmıştır. İncelemeler sonucunda üstyapı tepe noktası yerdeğiştirme değerinde zemin ortamının mekanik davranışından bağımsız değişimler gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar uygulanan yer hareketinin frekans içeriğinin üstyapının dinamik davranışına etkisi göstermektedir. Ayrıca üstyapının dinamik davranışı farklı frekans içeriğine sahip deprem yer hareketleri altında, yapının zemine rijit bağlı olması, zemin ortamının lineer ve nonlineer malzeme davranış göstermesi halinde elde edilen empedans fonksiyonları kullanılarak yapılan analizlerde değişkenlik göstermiştir. Bu araştırmalar sonucunda, yapı - zemin etkileşim probleminde yapı ve zemine ait mekanik özelliklerin yanında, etki eden dinamik dış yükün

frekans içeriğinin de sonuçlar üzerinde büyük etki yaptığı ortaya konulmuştur.

Yapılan analizler ve elde edilen tüm sonuçlar doğrultusunda şerit temel plağı için daha sonraki çalışmalarda doğrusal olmayan zemin davranışı için dönme rijitliğinin hesaplanması önerilmektedir. Ayrıca bu çalışma, farklı geometriye (dikdörtgen, kare, dairesel) sahip temel plaklarına ait doğrusal olmayan empedans fonksiyonlarının da sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmesi için bir başlangıç olması dolayısıyla önem kazanmaktadır.

KAYNAKLAR

AHMAD, S., BHARADWAJ, A., Horizontal impedance of embedded strip foundations in layered soil, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 7, 1991.

APSEL, R. J., LUCO, J. E., Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: an integral equation approach, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 213-231, 1987.

AYDINOĞLU M.N., Yapı analizi ve tasarımı süresince statik ve dinamik yapı-zemin etkileşimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1994.

BATHE K.J., EDWARD L. W., Numerical methods in finite element analysis, Prentice Hall Inc, 1976.

BHARADWAJ, A., AHMAD, S., Rocking impedance of embedded strip foundations in soil, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, 1992.

BOL, E., Adapazarı zeminlerinin geotekniği, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.

BOWLES, J.E., Foundation analysis and design, 5. Edition, McGraw-Hill, 1996.

BRAY, J.D., ÖNALP, A., DURGUNOĞLU, H.T., STEWART, J., Ground failure and building performance in Adapazarı, Turkey, 2000.

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.

BU, S., Impedance functions of square foundations embedded in an incompressible half space, Eng. Analysis with Boundary Elements, 22: 1-11, 1998.

BU, S., LIN, C.H., Coupled horizontal-rocking impedance functions for embedded square foundations at high frequency factors, Journal of Earthquake Engineering, 3, No. 4, 561-587, 1999.

BUDYNAS, R.G. Advanced strength and applied stress analysis, Mcgraw-Hill, 1999.

CARRUBBA, P., MASSİMİNO, M.R., MAUGGERİ, M., Strain dependent impedance in shallow foundations, 12. World Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, 2000.

CHAPEL, F., Boundary element method applied to linear soil structure interaction on a heterogeneous soil, Erthq. Eng. and Struc. Dyn., 15: 815-829, 1987.

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

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

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

DENEME, İ.Ö., Elastodinamik yap-zemin etkileşimi problemlerinin sınır eleman metodu ile formülasyonu, Doktora Tezi, Adana,2007.

Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, 2007.

DGGT, Empfehlungen des arbeitskreises “baugrunddynamik, Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V., Berlin, 2002.

DOBRY, R., GAZETAS, G., Dynamic response of arbitrarily shaped foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 2, 1986.

DOBRY, R., GAZETAS, G., STOKOE, K.H., Dynamic response of arbitrarily shaped foundations: experimental verification, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 2, 1986.

DOBRY, R., Low and high strain cyclic material properties, Proc., NSF/EPRI Workshop on Dynamic Soil Properties and Site Characterization, Chapter 3, Bellevue, Washington, Vol. 1.,1991.

DOMINGUEZ, J., Boundary elements in dynamics, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1993.

DOMINGUEZ, J., ROESSET, J. M., Dynamic stiffness of rectangular foundations, MIT Research Report, R. 78-20, 1978.

FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, USA, 2000.

GAZETAS G., Analysis of machine foundation vibrations, State of the Art. Int J Soil Dyn Earthquake Eng, 2, 2–42, 1983.

GAZETAS G., TASSOULAS J. L., Horizontal damping of arbitrarily shaped embedded foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 458-475, 1987b.

GAZETAS G., TASSOULAS J. L., Horizontal stiffness of arbitrarily shaped embedded foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 440-457, 1987a.

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

HASHASH, Y.M.A., PARK D., Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis, Soil Dyn. and Earthquake Eng., 22, 611-624, 2002.

HUGHES T. J. R., The finite element method ; linear static and dynamic finite element analysis, Prentice Hall Inc, 1987.

İNAN, M., Cisimlerin mukavemeti, 1973.

KARABALIS, D.L., BESKOS, D.E., Dynamic response of 3-d embedded foundations by the boundary element method, Comp. Methods İn Applied Mech. And Eng. 56: 91-119, 1986.

KIRTEL, O., Sismik bariyer modellerinin tabakalı zemin ortamındaki dalga yayılışına etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2007.

Kıyı ve liman yapıları, demiryolları, hava meydanları inşaatlarına ilişkin deprem teknik yönetmeliği, 2008.

KOKUSHO, T., Nonlinear site response and strain-dependent soil properties, Current Science, Vol. 87, NO.10, 25 November 2004.

KRAMER, S.L., Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall, 1996.

KURTULUŞ, A. AND STOKOE, K.H., Zeminin doğrusal olmayan kayma modülünün arazide belirlenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 2007.

LUCO, J. E., Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium, Nuclear Eng. Design, 31: 204-217, 1974.

LUCO, J.E., Vibrations of a rigid disc on layered viscoelastic medium, Nuclear Engineering and Design, 36, 325-340, 1976.

LYSEMER, J., UDAKA, 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, University of California, Berkeley, USA, 1975.

LYSMER, J., KUHLEMEYER, R. L., Finite dynamic model for infinite media”, journal of the engineering mechanics division, 95, 859–875, 1969.

MITA A., LUCO J. E., Dynamic response of a square foundation embedded in an elastic half-space, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 8, 54-67, 1989.

MYLONAKIS, G., NIKOLAOU, S., GAZETAS, G., Footing under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 824-853, 2006.

NOVA, R., MONTRASIO, L., Settlements of shallow foundations on sand, Géotechnique, 41 (2), 2423-256, 1991.

ÖNALP A., SERT S., Geoteknik Bilgisi III: Bina Temelleri, Birsen Yayın Evi, İstanbul, 2010.

Plaxis 2D V10 Manuals, 2010.

POPOV, E.P. (Hilmi Demiray), Mukavemet, Katı Cisimlerin Mekanikine Giriş, Çağlayan Kitabevi, 1968.

PREISIG, M. AND JEREMIC, B., Nonlinear finite element analysis of dynamic soil-foundation-structure interaction, SFSI Draft Report, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Davis, USA, 2005.

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

SEED, H.B., IDRIS, I.M., Soil modulus and damping factors for dynamic response analysis, Rep. No. EERC 70-10, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California at Berkeley, Calif., 1970.

SERT, S., Aluviyal ortamda kazıklı yayılım temellerinin üç boyutlu analizi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2003.

SIEFFERT, J.G., Soil-structure dynamic interaction: Which results for the practical engineer?, EURO DYN'96, Rotterdam, 1996.

SPYRAKOS, C.C., CHAOJIN, X., Dynamic analysis of flexible massive strip-foundations embedded in layered soils by hybrid BEM-FEM, Computer and Structures, 82, 2541-2550, 2004.

ŞAFAK E., Time-domain representation of frequency-dependent foundation impedance function, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 65-70, 2006.

TÖNÜK, G., ANSAL, A., Zeminin doğrusal olmayan davranışına vaka analizleri ile bakış, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 2007.

TSAI, N.C., NIEHOFF, D., SWATTA, M., HADJAN, A.H., The use of frequency independent soil-structure interaction parameters, *Nuclear Engineering And Design*, 31: 168-183, 1974.

VELETOS, A.S., VERBIC, B., Vibration of viscoelastic foundations, *Earthquake Eng. Str. Dyn.*, 2: 87-102, 1973.

VISONE, C., MAGISTRIS F.S., Some aspects of seismic design methods for flexible earth retaining structures, *Workshop of ERTC12 - Evaluation Committee for the Application of EC8 Special Session XIV EC8SMGE*, Madrid, Patron Ed., Bologna, 2007.

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

WOLF, J.P., SONG, C., *Finite element modelling of unbounded media*, John Wiley & Sons, 1997.

Wolf. J.P., Simple physical models for foundation dynamics, *Developments in Geotechnical Engineering*, Volume 83, Pages 1–70, 1998.

YOUD, T.L., BRAY, J.D., ÖNALP, A., DURGUNOGLU, H.T., STEWART, J., *CPT Liquefaction Investigations*, Adapazari, Turkey, 2000.

ZHANG J., TANG Y., Evaluating radiation damping of shallow foundations on nonlinear soil medium for soil-structure interaction analysis of bridges, *US-Japan Bridge Engineering Workshop*, Seattle, WA, October 2006.

ZHANG J., TANG Y., Radiation damping of shallow foundations on nonlinear soil medium, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No. 1150, June 25-28, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

18.11.1984 tarihinde Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimi Elazığ'da tamamladı. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı. 2004 yılında lisans eğitimini tamamladı. Eylül 2004 tarihinde Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD Yapı Bilim Dalında yüksek lisans öğretimine başladı. 2007 yılında Yüksek Mühendis ünvanını aldı. 2007 yılından itibaren Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD Yapı Bilim Dalında doktora çalışmasını sürdürmektedir. Aralık 2005 tarihinde beri Sakarya Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2011 yılından beri evlidir.