

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZALTI MIŞ KAYMA MODÜLÜNE GÖRE TEMEL
TİTREŞİMLERİNİN EMPEDANS ANALİZİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ

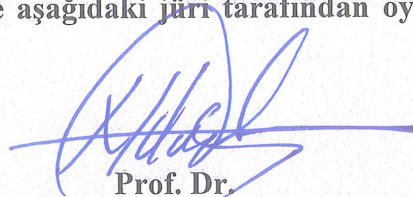
Yeşim TÜMSEK

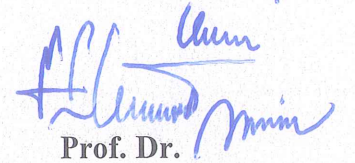
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 25.01.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Seyhan FIRAT
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Üye


Prof. Dr.
Erkan ÇELEBİ
Üye

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

**AZALTILMIŞ KAYMA MODÜLÜNE GÖRE TEMEL
TİTREŞİMLERİNİN EMPEDANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yeşim TÜMSEK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

Ocak 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AZALTI MIŞ KAYMA MODÜLÜNE GÖRE TEMEL
TİTREŞİMLERİNİN EMPEDANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yeşim TÜMSEK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 25.01.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Seyhan FIRAT
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Üye**

**Prof. Dr.
Erkan ÇELEBİ
Üye**

BEYAN

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

Yeşim TÜMSEK

25.01.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, değerli danışman hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye şükran ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca sevgileri ve ilgileri ile bana daima moral olan, sürekli anlayış ve fedakârlıklarda bulunan, maddi ve manevi her konuda beni destekleyen, başta rahmetli babaannem olmak üzere annem, babam, kardeşlerim ve aile dostumuz Leyla Hanıma minnettarlığımı belirtir sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu bilimsel çalışmanın ülkemizin ve insanlığın yararına olmasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xvii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. Konu ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	6

BÖLÜM 2.

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	9
2.1. Eskiye Dayanan Tarihiyle Yapı-Zemin Etkileşimi	10
2.2. Uluslararası Tavsiye Niteliğinde Başlıca Raporlar	14
2.3. Yapı-Zemin Etkileşim Probleminin Çözüm Yöntemleri	15
2.3.1. Direkt (doğrudan) çözüm yöntemi	15
2.3.2. Altsistem yaklaşım yöntemi	16
2.4. Yapı-Temel-Zemin Etkileşiminde Mekanik Düzen	17
2.5. Geoteknik Deprem Mühendisliği Kavramının Yapı-Temel-Zemin Etkileşim Probleminde Değerlendirilmesi	19
2.5.1. Deprem yer hareketi	20
2.5.2. Deprem sırasında oluşan dalgalar	20

2.5.3. Zemin ortamının incelenmesi	21
2.5.3.1. Yerel zemin koşulları	22
2.5.3.2. Zeminin dinamik yükler altındaki davranışı	24
BÖLÜM 3.	
YAPI-TEMEL-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN	
ALTSİSTEM YAKLAŞIMIYLA ANALİZİ İÇİN MATLAB	
PROGRAMLAMA DİLİNE DAYALI BASİT BİR ÇÖZÜM ÖNERİSİ	27
3.1. Yüzeysel ve Gömülü Rijit Temelerde Statik Rijitliklerin (K_x ve K_{yy}) Hesabı için Elde Edilen Çözüm Algoritması	31
3.2. Yüzeysel ve Gömülü Rijit Temelerde Dinamik Rijitliklerin (k_x ve k_{yy}) Hesabı için Elde Edilen Çözüm Algoritması	34
3.3. Yapı-Temel-Zemin Ortak Sisteminin Sönüm Oranının (β_0) Hesabı için Elde Edilen Çözüm Algoritması	36
3.4. Empedans Fonksiyonların Hesabında Kayma Şekil Değiştirmesine Bağlı Kayma Rijitliğinin Değişiminin ($G_{(i)}/G_{maks}$) Dikkate Alınmasıyla Önerilen Çözüm Algoritması	44
BÖLÜM 4.	
SAYISAL UYGULAMALAR	49
4.1. Örnek Köprü Ayağına Ait Temel-Zemin Etkileşim Modelinin Kurulması	50
4.1.1. Köprü ayağı modelinin İzmit bölgesinden seçilen dört farklı zemin türüne göre dinamik analizi	52
4.1.1.1. Kum ve killi zeminlerin farklı türlerinde temel gömülme derinliğinin periyot değişimine (\tilde{T}/T) etkisi	53
4.1.1.2. Farklı yerel zemin koşullarının ve temel gömülme derinliğinin yapı-temel-zemin ortak sisteminin sönümüne (β_0) etkisi	54

4.1.1.3. Temel gömülme derinliğinin zayıf zemin koşulları için seçilmiş depremlere ait ivme davranış spektrum eğrileri üzerindeki etkisi	55
4.1.1.3.1. Yüzeysel temel (D/B= 0) için davranış spektrumları	59
4.1.1.3.2. Gömülü temel (D/B= 0,25) için davranış spektrumları	64
4.1.1.3.3. Gömülü temel (D/B= 0,5) için davranış spektrumları	68
4.1.1.4. Kum ve killi zeminin iki farklı koşulunda temelin gömülme derinliğine bağlı elde edilen empedans fonksiyonları ($G_{(i)}= G_{maks}$)	75
4.1.1.5. Dört farklı zemin grubuna ait kayma modülü azalım eğrisinin ($G_{(i)}/G_{maks}$) değişimi dikkate alınmasıyla önerilen empedans fonksiyonların temelin gömülme oranına bağlı elde edilmesi	80
4.1.2. Köprü ayağı modelinde farklı plastisite indisine sahip sert ve yumuşak killi zeminler için Sakarya bölgesinde vaka analizi	102
4.1.2.1. Yapı-zemin etkileşim probleminde geometrik sönüm etkisinin önemi	103
4.1.2.1.1. Dinamik rijitliğe geçiş çarpanının (α_x, α_{yy}) titreşim frekansına (a_0) bağlı değişimi	103
4.1.2.1.2. Temel gömülme derinliğinin ötelenme (β_x) ve dönme (β_{yy}) titreşimlerine karşı gelen geometrik sönüme etkisi	104
4.2. Örnek Binaya Ait Sürekli Temel-Zemin Etkileşim Modelinin Kurulması	106
4.2.1. Bina temeli modelinde farklı plastisite indislerine sahip killi zemin için İstanbul bölgesinde vaka analizi	110

4.2.1.1. Farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı elde edilen empedans fonksiyonları ($G_{(i)}= G_{maks}$)	112
4.2.1.2. Katı ve yumuşak killi zemin koşuluna ait kayma modülü azalım eğrisinin ($G_{(i)}/G_{maks}$) değişimi dikkate alınmasıyla önerilen empedans fonksiyonların sürekli temelin gömülme oranına bağlı elde edilmesi	116
BÖLÜM 5.	132
SONUÇ VE ÖNERİLER	
KAYNAKLAR	136
EKLER	145
ÖZGEÇMİŞ	153

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ρ	: Birim hacim ağırlığı
a_0	: Boyutsuz frekans (Raissner) parametresi
DBYBHY	: Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik
k_x	: Dinamik ötelenme rijitliği
k_{yy}	: Dinamik dönme rijitliği
β_{yy}	: Dönme titreşimine karşı gelen radyasyon (geometrik) sönüm
α_{yy}	: Dönme titreşim modu için dinamik rijitlik dönüşüm katsayısı
$\tilde{\Delta}$: Esnek tabanlı yapının yaptığı yatay yerdeğiştirme
\tilde{T}/T	: Esnek tabanlı ve rijit tabanlı yapı sistemlerinin periyotları oranı
\tilde{T}	: Esnek tabanlı yapı sisteminin periyodu
FEMA	: Federal emergency management agency
$K_{x,emb}$: Gömülü rijit temelde statik ötelenme rijitliği
$K_{yy,emb}$: Gömülü rijit temelde statik dönme rijitliği
G_{maks}	: Kayma modülü
γ	: Kayma şekil değiştirmesi
$G_{(i)}$: Kayma şekil değiştirme büyüklüğüne bağlı değişen zemin kayma modülü
$d_{(i)}$: Kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün denklemi
MATLAB	: Matrix Laboratory
NEHRP	: National earthquake hazard reduction program
NIST	: National institute of standards and technology
NSF	: National science foundation
β_x	: Ötelenme titreşimine karşı gelen radyasyon (geometrik) sönüm
α_x	: Ötelenme titreşim modu için dinamik rijitlik dönüşüm katsayısı
PI	: Plastisite indisi

Δ	: Rijit tabanlı yapının yaptığı yatay yerdeğiştirme
G_{sec}	: Sekant kayma modülü
ST	: Sürekli temel
β_f	: Temel ortamında oluşan sönüm
B	: Temel yarı genişliği
L	: Temel yarı uzunluğu
η_{yy}	: Temelin dönme durumuna göre gömülü temel için düzeltme katsayısı
D/B	: Temelin gömülme oranı
η_x	: Temelin ötelenme durumuna göre gömülü temel için düzeltme katsayısı
U_f	: Temelin ötelenmesi
k	: Üstyapının yanal ötelenme rijitliği
m	: Yapı kütlesi
$m/(\rho_s 4BLh)$: Yapı kütlesinin zemin kütlesine oranı
h	: Yapı yüksekliği
YZDE	: Yapı zemin dinamik etkileşim
ω	: Yapının açısal frekansı
$h\theta$: Yapının dönmeden meydana gelen yerdeğiştirme miktarı
$h/(V_s T)$: Yapının zemine rijitlik oranı
F	: Yapıyı zorlayan kuvvet
β_i	: Yapısal sönüm
U_g	: Yer hareketinden dolayı temel hareketi
$K_{yy, sur}$: Yüzeysel rijit temelde statik dönme rijitliği
$K_{x, sur}$: Yüzeysel rijit temelde statik ötelenme rijitliği
β_0	: Yapı-temel-zemin ortak sistemin sönümü
ν	: Zemin Poisson oranı
h_1	: Zemin tabaka kalınlığı
T	: Zemine rijit bağlı sistemin periyodu
β_s	: Zeminin histerisiz (malzeme) sönümü
V_s	: Zeminin kayma dalga hızı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Yapı-temel-zemin etkileşim probleminin genel değerlendirilmesi ..	2
Şekil 2.1.	Üstyapının dış yük etkisi altında yaptığı deformasyon: a) rijit taban yaklaşımında ötelenme b) esnek taban yaklaşımında dönme ve ötelenmeler	10
Şekil 2.2.	Doğrudan çözüm yaklaşımı modeli	16
Şekil 2.3.	Altsistem yaklaşımı modeli	17
Şekil 2.4.	a) Yapı-zemin etkileşim probleminin geometrisi: b) Kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizi c) İki aşamalı eylemsizlik etkileşim analizi	18
Şekil 2.5.	Saha davranış analizinde deprem hareketi	20
Şekil 2.6.	Sismik dalga türlerinin yayılımı	21
Şekil 2.7.	Anakayadaki deprem hareketinin tabakalara büyütülerek iletilmesi	24
Şekil 2.8.	Zeminin dinamik yükler altındaki özellikleri	25
Şekil 2.9.	Kayma modülü azalım eğrilerinin deneysel analizi	25
Şekil 3.1.	Esnek taban yaklaşımıyla yapı temelinin oturduğu zemine bağlanma şekli ve yapısal davranışına ait parametreler	27
Şekil 3.2.	Yüzeysel ve gömülü temel geometrileri	30
Şekil 3.3.	Statik rijitlik katsayılarını hesaplayan akış şeması	33
Şekil 3.4.	Empedans fonksiyonlarını hesaplayan akış şeması	35
Şekil 3.5.	Yapı-temel-zemin ortak sistemin sönümünü hesaplayan akış şeması	41
Şekil 3.6.	Doğrusal olmayan zemin davranışını temsil eden kayma modülü azalım eğrisi	45
Şekil 3.7.	Zemin kayma modülünün değişimine bağlı empedans fonksiyonlarının elde edilmesini gösteren akış şeması	46

Şekil 4.1.	Örnek köprü ayağı modelinde yapı-temel-zemin ortak sisteminin genel yapısı	51
Şekil 4.2.	İzmit/Kocaeli bölgesi yer bulduru haritası	52
Şekil 4.3.	Çeşitli depremlere ait % 5 sönüme karşı gelen ivme davranış spektrum eğrileri	56
Şekil 4.4.	Kobe (1995) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu	57
Şekil 4.5.	Landers (1992) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu	57
Şekil 4.6.	Düzce (1999) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu	58
Şekil 4.7.	Erzincan (1992) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu	58
Şekil 4.8.	Düzce depremi (1999) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	59
Şekil 4.9.	Erzincan depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	61
Şekil 4.10.	Kobe depremi (1995) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	62
Şekil 4.11.	Landers depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	63
Şekil 4.12.	Düzce depremi (1999) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,25) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	64
Şekil 4.13.	Erzincan depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,25) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	65

Şekil 4.14.	Kobe depremi (1995) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,25) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	66
Şekil 4.15.	Landers depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,25) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	67
Şekil 4.16.	Düzce depremi (1999) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,5) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	68
Şekil 4.17.	Erzincan depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,5) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	70
Şekil 4.18.	Kobe depremi (1995) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,5) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	71
Şekil 4.19.	Landers depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0,5) sönüm parametrelerine bağlı değişimi	72
Şekil 4.20.	Erzincan (1992) depreminin gevşek kumlu zeminler için ivme spektrumunun artan sönüm değerine bağlı değişiminin rijit ve esnek yapılarda kesme kuvvetine etkisi	73
Şekil 4.21.	Erzincan (1992) depreminin yumuşak killi zeminler için ivme spektrumunun artan sönüm değerine bağlı değişiminin rijit ve esnek yapılarda kesme kuvvetine etkisi	74
Şekil 4.22.	İzmit bölgesinin dört farklı zemin koşullarında kare temelin gömülme derinliğine bağlı ötelenme dinamik rijitliğinin (k_x) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi	77
Şekil 4.23.	İzmit bölgesinin dört farklı zemin koşullarında kare temelin gömülme derinliğine bağlı dönme dinamik rijitliğinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi	79

Şekil 4.24.	Farklı plastisite indislerine göre dört farklı zemin koşulunda G/G_{maks} oranının kayma şekil değiştirmesine bağlı azalım eğrileri	81
Şekil 4.25.	Çok sıkı kumlu (Z1) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması	82
Şekil 4.26.	D/B oranına göre çok sıkı kumlu zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	83
Şekil 4.27.	Çok sıkı kumlu zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	85
Şekil 4.28.	Gevşek kumlu (Z3) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması	86
Şekil 4.29.	D/B oranına göre gevşek kumlu zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	87
Şekil 4.30.	Gevşek kumlu zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	88
Şekil 4.31.	Sert kil (Z1) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması	89
Şekil 4.32.	D/B oranına göre sert kil zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	90
Şekil 4.33.	Sert kil zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	92
Şekil 4.34.	Yumuşak kil (Z3) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması	93
Şekil 4.35.	D/B oranına göre yumuşak killi zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	94

Şekil 4.36.	Yumuşak killi zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	95
Şekil 4.37.	Dört farklı yerel zemin koşulunda $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik ötelenme rijitliğin (k_x) frekansa bağlı değişimi	97
Şekil 4.38.	Dört farklı yerel zemin koşulunda $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik dönme rijitliğin (k_{yy}) frekansa bağlı değişimi	99
Şekil 4.39.	Adapazarı/Sakarya bölgesi yer bulduru haritası	102
Şekil 4.40.	Dinamik rijitliğe geçiş çarpanının α_x ve α_{yy} boyutsuz frekans parametresine göre değişimi	104
Şekil 4.41.	Yüzeysel temelin ötelenme ve dönme titreşimine karşı gelen geometrik sönümün β_x ve β_{yy} boyutsuz frekans parametresine göre değişimi ($D/B=0$)	105
Şekil 4.42.	Gömülü temelin ötelenme ve dönme titreşimine karşı gelen geometrik sönümün β_x ve β_{yy} boyutsuz frekans parametresine göre değişimi ($D/B=1$)	105
Şekil 4.43.	Üç boyutlu yapı-temel-zemin modeli	107
Şekil 4.44.	Kat planı ve sürekli temel planının boyutlandırılması	108
Şekil 4.45.	Temel kalıp aplikasyon planı	109
Şekil 4.46.	Örnek 4 katlı bina modelinde yapı-temel-zemin ortak sisteminin genel yapısı	110
Şekil 4.47.	Kadıköy/İstanbul bölgesi yer bulduru haritası	111
Şekil 4.48.	İstanbul bölgesi için farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı ötelenme dinamik rijitliğinin (k_x) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi	114
Şekil 4.49.	İstanbul bölgesi için farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı dönme dinamik rijitliğinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi	115

Şekil 4.50.	Farklı plastisite indislerine sahip killi zemin ortamında G/G_{maks} oranının kayma şekil değiştirmesine bağlı azalım eğrileri	117
Şekil 4.51.	Katı killi ($PI= \% 16$) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması	118
Şekil 4.52.	D/B oranına göre katı killi zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	119
Şekil 4.53.	Katı killi zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	121
Şekil 4.54.	Yumuşak killi ($PI= \% 13$) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması	122
Şekil 4.55.	D/B oranına göre yumuşak killi zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	123
Şekil 4.56.	Yumuşak killi zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)	124
Şekil 4.57.	Katı ve yumuşak killi zeminlere oturan sürekli temellerin $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik ötelenme rijitliğinin (k_x) frekansa bağlı değişimi	126
Şekil 4.58.	Katı ve yumuşak killi zeminlere oturan sürekli temellerin $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik dönme rijitliğinin (k_{yy}) frekansa bağlı değişimi	128

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Yapı-zemin etkileşim probleminin çözümüne ilişkin kronoloji	11
Tablo 2.2.	Yerel zemin sınıfları	23
Tablo 2.3.	Zemin grupları	23
Tablo 2.4.	Zeminin dinamik yükler altındaki özellikleri	24
Tablo 2.5.	Zeminlerin plastisite indis değerine göre sınıflandırılması	26
Tablo 3.1.	Akış şemaları için kullanılan şekillerin işlevi	31
Tablo 4.1.	Köprü yapısıyla ilgili mekanik ve geometrik parametreler	52
Tablo 4.2.	İzmit/ Kocaeli bölgesinden seçilen zemin ortamının özellikleri	53
Tablo 4.3.	Kum ve killi zeminin farklı gruplarında temel gömülme derinliğinin periyot değişimine etkisi	54
Tablo 4.4.	Zemin koşullarının ve temel gömülme derinliğinin yapı-temel- zemin ortak sistemin sönümüne etkisi	54
Tablo 4.5.	Kum ve killi zeminin farklı koşullarında ötelenme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_x) temel gömülme derinliğine bağlı değişimi	76
Tablo 4.6.	Kum ve killi zeminin farklı koşullarında dönme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_{yy}) temel gömülme derinliğine bağlı değişimi	76
Tablo 4.7.	İzmit zemin profili için kayma modülü azalım eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan parametreler	81
Tablo 4.8.	Çok sıkı kumlu (Z1) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi	83
Tablo 4.9.	Gevşek kumlu (Z3) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi	86
Tablo 4.10.	Sert kil (Z1) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi	90

Tablo 4.11.	Yumuşak killi (Z3) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi	93
Tablo 4.12.	Dört farklı zemin türüne ait kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi (%)	101
Tablo 4.13.	Sakarya bölgesinde seçilen farklı kıvamlardaki killi zemin ortamının özellikleri	103
Tablo 4.14.	Sürekli temele sahip bina modelinin mekanik ve geometrik özellikleri	109
Tablo 4.15.	İstanbul bölgesine ait farklı kıvamlardaki killi zemin ortamının özellikleri	111
Tablo 4.16.	Farklı kıvamlardaki killi zeminde ötelenme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_x) temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi	112
Tablo 4.17.	Farklı kıvamlardaki killi zeminde dönme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_{yy}) temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi	112
Tablo 4.18.	Kadıköy zemin profili için kayma modülü azalım eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan parametreler	116
Tablo 4.19.	Katı killi (PI= % 16) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi	118
Tablo 4.20.	Yumuşak killi (PI= % 13) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi	122
Tablo 4.21.	Farklı plastisite indisine sahip killi zemin koşullarında kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi (%)	131

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yapı-temel-zemin dinamik etkileşimi, empedans fonksiyonları, deprem yer hareketi, yerel zemin koşulları, azaltılmış dinamik kayma modülü

Yapı-zemin ortak sisteminin dinamik analizinde yapısal davranışı doğrudan etkileyecek olan en önemli yönetici parametreler, zemin ortamının sonsuzluğunda kaybolan enerjiyi temsil eden radyasyon sönümü ve deprem yer hareketinin çevrimsel yükler altında zeminde oluşturacağı birim kayma şekil değiştirmesine karşı gelen azaltılmış dinamik kayma modülüdür. Söz konusu geoteknik parametreler yapının mesnetlendiği zemin ortamının rijitliğini doğrudan etkileyeceği için doğru tanımlanarak analitik çözümlere katılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, yerel zemin koşullarının üst yapının dinamik davranışına olan etkisi, temel-zemin arakesitinde tanımlanan ve yapı-zemin etkileşim probleminin altsistem yönteminde kullanılan empedans fonksiyonları (dinamik rijitlik parametreleri) yardımıyla incelenmiştir. Bu yöntemde zeminin ötelenme ve dönme titreşimine karşı gelen şekil değiştirme rijitlikleri, temel plağının boyutlarına, ortamın mekanik özellikleriyle birlikte malzeme ve radyasyon sönümüne bağlı ifade edilen temel-zemin etkileşim yüzeyinde tek bir noktada toplanmış yay rijitlik parametrelerine göre ele alınmaktadır.

Bu kapsamda sayısal analizler için temel ortamının zemin özellikleri deprem yönetmeliğinde tanımlanan zemin sınıfları gözetilerek belirlenmiş ve seçilen iki farklı rijit yapı örneği üzerinden parametrik araştırmalar temel geometrisi ve gömülme derinliği de dikkate alınarak yürütülmüştür. Dinamik yük kaynağının frekans içeriğine ve zayıf zeminin mekanik özelliklerine bağlı temel plağı titreşim hareketinin yapısal davranış üzerindeki etkileri, seçilmiş yönetici parametrelerle ilişkilendirerek gösterebilmek için empedans fonksiyonlarına dayalı bir çözüm algoritması MATLAB programlama dilinde geliştirilmiştir. Sayısal çözümlere titreşim frekansının etkisiyle birlikte zeminin birim kayma şekil değiştirmesine bağlı temel ortamının rijitlik kaybının etkisi de dahil edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin analizi için geliştirilen bu çözüm algoritması aktif deprem bölgelerinde zayıf zemin koşullarında inşa edilecek önemli mühendislik yapılarının deprem güvenliğinin sağlanması açısından yapı mühendislerine yol gösterici olacaktır.

IMPEDANCE ANALYSIS OF FOUNDATION VIBRATIONS ACCORDING TO REDUCED SOIL SHEAR MODULUS

SUMMARY

Keywords: Dynamic structure-foundation-soil interaction, impedance functions, earthquake ground motion, local soil conditions, reduced dynamic shear modulus

The most important governing parameters that will directly affect the structural behavior in the dynamic analysis of the structure-soil coupled system are radiation damping, which represents the energy lost in the infinite soil environment and the reduced dynamic shear modulus corresponding to the variation of the shear deformation that will occur in the soil under cyclic loads of earthquake ground motion. Since the geotechnical parameters directly affect the rigidity of the ground on which the building is supported, it is necessary to consider in the analytical solutions by defining them correctly.

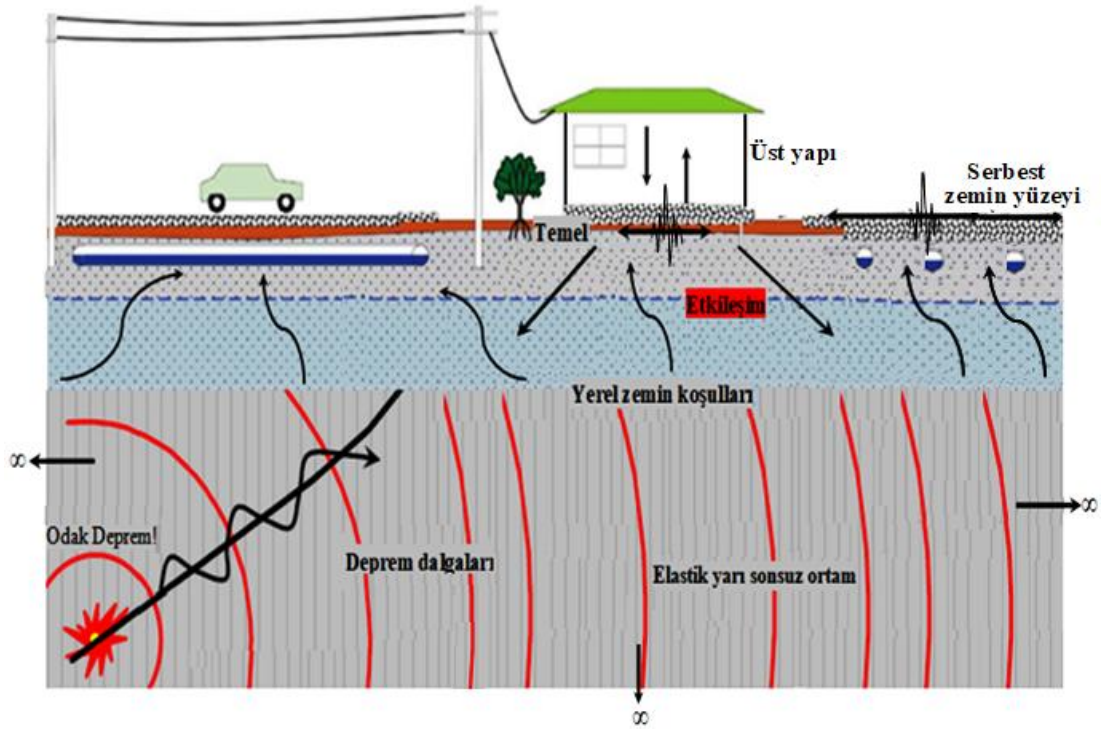
In this study, the effect of local soil conditions on the dynamic behavior of the superstructure was investigated by the impedance functions (dynamic stiffness parameters) defined in the foundation-soil interface and used in the substructure method of the soil-structure interaction problem. In this method, the deformation stiffness of the foundation medium corresponding to the rotational and lateral vibrations was evaluated according to the spring stiffness parameters concentrated at a single point on the foundation-soil interaction surface, which are expressed depending on the dimensions of the foundation plate and the mechanical properties of the soil medium including the material and radiation damping.

In this context, the geotechnical properties of the foundation medium for numerical analyses were determined by taking into consideration the soil classes defined in the earthquake regulations and parametric investigations on two different types of rigid structures chosen. The geometry of the foundation and the depth of the embedment were carried out by taking into account. A solution algorithm based on impedance functions for soil-structure interaction analysis was developed in the MATLAB programming language in order to indicate the effect of frequency contents of the dynamic load source and the mechanical parameters of the weak soil on foundation motion as well as the structural behavior. Furthermore, the stiffness loss of the foundation medium due to the effect of the increasing shear strain under dynamic loads was included in these numerical analyses. This solution algorithm developed for the analysis of structure-soil interaction problem will guide for the structural engineers in order to ensure earthquake safety of important engineering structures to be built under weak soil conditions in active earthquake zone.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen büyük ölçekli barajlar, nükleer güç santralleri, çok katlı rijit taşıyıcı sistemli konut binaları ve kule gibi masif yapıların günümüzde aktif deprem bölgelerinde ve zayıf zemin koşullarında kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmaktadır. Zemin ortamının üstyapıya oranla çok rijit olduğu durumlar dışında, statik ve dinamik dış etkilere karşı üstyapı ve zemin her ikisi de şekil değiştirebilen sistemler olarak birlikte davranış gösterirler. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir. Benzer şekilde, yer hareketi de zemin ile yapı arasındaki etkileşiminden dolayı değişikliğe uğramaktadır. Deprem sırasında yapının tabanında meydana gelen hareketle, aynı yerde yapı bulunmadığında meydana gelecek olan serbest yüzey hareketi arasında fark ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.1.). Böylelikle, depremin yapıya etkisinin karşılığı olarak, yapının da zemini ve dolayısıyla deprem hareketini etkilediği anlaşılmaktadır. Yapıların sismik yüklere karşı davranışında yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin analizinde, şekil değiştiren zemin ortamı yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunurken yapı da zemine kinematik ve dinamik bakımından etkimektedir. Böylece yapının olmadığı durumda, yalnızca zeminin kendi içindeki dinamik davranışının bir sonucu deprem verisi, artık yapının varlığından etkilenen daha karmaşık bir yer hareketi oluşmaktadır. Sismik analizlerde yapı-zemin dinamik etkileşimi probleminin çözüm sürecine katılarak yapıların deprem performansları daha ayrıntılı bir şekilde ele alınarak, depreme karşı tam güvenlik doğruluk düzeyi yüksek matematik modeller ve sayısal yöntemler kullanılarak sağlanabilmektedir.



Şekil 1.1. Yapı-temel-zemin etkileşim probleminin genel değerlendirilmesi

Bu çalışmada, yerel zemin koşullarının titreşim sırasında üst yapının dinamik davranışına olan etkisi, temel-zemin arakesitinde tanımlanan ve yapı-zemin etkileşim probleminin altsistem yaklaşımıyla analizinde kullanılan empedans fonksiyonlarına (dinamik rijitlik parametreleri) bağlı incelenmiştir. Bu yöntemde zeminin ötelenme ve dönme titreşimine karşı gelen şekil değiştirme, malzeme ve radyasyon sönümüne bağlı enerji tüketme özellikleri, temel plağının geometrik özelliklerini de hesaba katan temel-zemin etkileşim yüzeyinde tek bir noktada toplanmış yay rijitlik parametrelerine göre ele alınmaktadır.

Sayısal analizlerde temel ortamının zemin özellikleri deprem yönetmeliğinde tanımlanan zemin sınıfları gözetilerek belirlenmiş ve seçilen iki farklı rijit yapı örneği üzerinden parametrik araştırmalar hızlı ve doğru bir şekilde yürütülmüştür. Dinamik yük kaynağının frekans içeriğine ve zayıf zemin özelliklerine bağlı titreşim hareketinin temel vasıtasıyla yapısal davranış üzerindeki etkileri, seçilmiş yönetici parametrelerle ilişkilendirerek gösterebilmek için empedans fonksiyonlarına dayalı bir çözüm algoritması MATLAB programlama dilinde bir kod olarak yazılmıştır. Ayrıca olası şiddetli depremlerin neden olacağı kayma şekil değiştirmelerine bağlı

değişen zemin dinamik kayma modülünün empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi çözüm algoritmasına dahil edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin analizi için geliştirilen bu çözüm algoritması aktif deprem bölgelerinde zayıf zemin koşullarında inşa edilecek önemli mühendislik yapılarının deprem güvenliğinin sağlanması açısından yapı mühendislerine sismik analiz sürecinin değerlendirilmesinde yol gösterici olacaktır.

1.2. Konu ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar

Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde taşıma kapasitesi zayıf zeminler üzerine inşa edilecek yapıların dinamik davranışları, bilgisayar teknolojisiyle birlikte gelişen sayısal yöntemlere dayalı çözüm teknikleri kullanılarak incelenmektedir. Yerel zemin koşullarının yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği yapı-temel-zemin etkileşim problemlerinde doğrudan çözüm veya altsistem yaklaşımı kullanılarak depreme karşı tam güvenlik doğruluk düzeyi yüksek matematik modellerle sağlanabilmektedir. Yapı-zemin dinamik etkileşimi probleminin analitik yaklaşımlarına yönelik literatürde inşaat mühendisliği pratiğine aktarılmış birçok bilimsel çalışma yapılmıştır.

Kausel [2] bu çalışmasında, yapı-zemin etkileşiminin disiplinler arası bir faaliyet alanı oluşturduğunu ve bu faaliyet alanında zeminle yapı mekaniği, zeminle yapı dinamiğine dayalı deprem mühendisliği, jeofizikle zemin mekaniği, hesaplamalı ve sayısal çözüm yöntemleriyle kesiştiğini belirtmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin ilk izleri 19. yüzyılın sonlarında ortaya çıktığı daha sonra 20. yüzyılın ilk yarısında kademeli olarak geliştiği ve ikinci yarısında da özellikle güçlü bilgisayarların, modelleme araçlarının tekniklerinin sonlu elemanlar gibi çözüm yaklaşımlarının ortaya çıkmasıyla nükleer güç santrallerinde veya açık deniz platformlarında, yapıların deprem güvenliğinin artırılması ihtiyacıyla hızlı bir şekilde gelişmekte olduğunu ifade etmiştir. Kausel bu çalışmasıyla günümüzde çok iyi bilinen yapı-zemin etkileşimiyle ilgili son gelişmelerin ortaya çıkmasına katkı sağlayacak öncü çalışmaların bazılarını gözden geçirerek özetlemiştir. Mühendislik analizlerinde

yaygın olarak kullanılan statik temel rijitlikler ve anahtar formüller yapı-zemin etkileşim etkileri için statik çözümler içeren kısa bir değerlendirmeyi kapsamaktadır.

Menglin vd. [6] çalışmalarında birçok araştırmacıya referans olarak komşu yapıların birbiriyle etkileşiminde dikkate alacak şekilde yapı-zemin-yapı dinamik etkileşiminin durumunu ve tarihini sistematik bir şekilde çok sayıda yapılmış çalışmalara dayalı olarak sunmuşlardır. Başlangıç aşamasında olan bu çalışma yapı-zemin etkileşimi için geliştirilecek modellerin ileri derecede basit yaklaşımlarını içerebildiği kadar kendi doğasındaki karmaşıklığı da ele almaktadır. Yapı-zemin etkileşim alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayar programlarının özetiyle bu çalışmada bir başlangıç oluşturmuşlardır. Ayrıca bu programların uygulanabilirliği zayıf ve güçlü yanları ile tartışılmıştır. Mevcut problemler ve gelecek araştırma eğilimleri yapı-zemin etkileşimi alanında incelenmiştir.

Pais ve Kausel [50] tarafından yapılan bu çalışmada ise eğilme, burulma, yatay ve düşey titreşim modları için statik rijitliğin gömülme derinliği ile birlikte değişimi gösterilmiştir. Düşey, burulma ve eğilme rijitliklerin frekansa bağlı değişimi verilmiştir. Bağlaşık rijitlik terimlerin frekansa bağlı değişimi yani eğilme ve ötelenmenin birbiri ile etkisi elde edilmiştir. Pais ve Kausel'in yaklaşık olarak geliştirmiş olduğu çözüm yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırılmıştır. Temelin geometrik özelliklerine bağlı olarak gömülü ve yüzeysel temellerin statik ve dinamik rijitliklerine ait terimler düşey, yatay, eğilme ve burulma titreşim modları için ayrı ayrı elde etmişlerdir.

Stewart vd. [59] çalışmalarında, kuvvetli deprem yer hareketi verilerini kullanarak yapı-zemin etkileşiminin yapısal davranış üzerindeki etkilerini farklı zemin ve yapı koşulları için değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları kullanarak BSSC ve ATC yönetmeliklerinde kullanılan yapı-zemin etkileşimi ile geliştirilmiş olan basitleştirilmiş analitik çözümleri kalibre etmişlerdir. Sismik yapısal davranışın yapı-zemin etkileşiminin eylemsizlik etkilerini ortaya çıkarılması için bu geliştirilen çözüm yöntemleri California ve Taiwan'daki 57 farklı bölgedeki kuvvetli yer hareketi için kullanmışlardır. Altsistem yapı-zemin etkileşimini değerlendirdiği

basitleştirilmiş modelde empedans fonksiyonlarını, gömülü temeller için üniform olmayan zemin profilleri içeren zemin bölgesi için farklı temel şekillerini, temelin deforme olabilen yani esnek temellerde ve kazıklar için ayrı ayrı gözden geçirmişlerdir. Böylelikle bu çalışmalarında çözüm yöntemi ortaya koymuşlardır. Bu çözüm yönteminde etkili olan parametrelerin zemin koşulları, yapı-zemin karakteristikleri ve zemine rijit bağlı yapının 1. mod parametreleri olduğunu belirtmişlerdir. Zemin koşullarına ait özellikler; zemin kayma dalga hızı malzeme sönümü, poisson oranı ve yapı-temel karakteristikleri; gömülme derinliği v.b. belirtmişlerdir.

Darendeli [62] bu çalışmasında, zemin türü ve yükleme koşullarının dinamik zemin özellikleri üzerine etkileri (normalleştirilmiş kayma modülü ve malzeme sönüm eğrileri açısından sunulmuş) son on yılda Texas Austin Üniversitesinde toplanan veriler temel alınarak incelemiştir. Verilerin toplanmasında kullanılan laboratuvar test cihazları ve veritabanında yer alan numunelerin özelliklerinin genel bir tanımına ilişkin bilgiler sunmuştur. Lineer olmayan zemin davranışını kontrol eden parametreler ve bu çalışmanın seyri sırasında gözlemlenen genel eğilimlere dayanan normalleştirilmiş kayma modülü azaltma ve malzeme sönüm eğrilerinin denklemleri, grafik çözümleri, çizimleri ve tabloları vermiştir. Yaygın olarak kabul edilen ampirik eğrilerle önerdiği eğrileri karşılaştırmıştır.

Çelebi vd. [65] çalışmalarında homojen yarı-sonsuz zemine oturan rijit dikdörtgen temel plağının yüzeysel ve gömülü durumları için geniş frekans aralığında empedans fonksiyonlarını (dinamik rijitlik) elde etmişlerdir. Altsistem yaklaşımı içerisinde dikdörtgen rijit temelin yatay, düşey, eğilme ve burulma titreşim modlarına karşı gelen rijitlik ve sönüm katsayılarının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi hesaplamışlardır. Çeşitli kontrol parametrelerine bağlı kapsamlı parametrik araştırma ve sistematik hesaplamalar yürüterek temel-zemin sisteminin dinamik davranışını incelemişlerdir.

Mylonakis vd. [66] çalışmasında ise kinematik etkileşim etkilerini ve eylemsizlik etkileşim etkilerini değerlendirmiştir. Temel girdi hareketini tanımlayabilmek için basitleştirilmiş zemin tepki analizi ve basitleştirilmiş kinematik etkileşim analizi yapmışlardır. Kinematik etkileşim transfer fonksiyonun kullanımı başlıklarını incelenmiş ve yapı-zemin etkileşiminde eylemsizliği temellerde yay ve söndürücülerle değerlendirmişlerdir. Rijit blok temele oturan tek serbestlik dereceli bir yapının yatay sismik davranışı değerlendirilmiş ve dinamik empedansları dinamik yay ve söndürücüler için çizelge ve grafikler verilmiştir. Bu çalışmada dinamik empedans fonksiyonları, temel şekline bağlı olarak yani dairesel sürekli dikdörtgen ve rastgele geometriye sahip temeller için, derin ve düzgün dağılımlı zeminler veya çok tabakalı zeminlerde yüzeysel, gömülü ve kazık temeller için yani gömülme durumu da dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Zeminin heterojen durumunu dinamik rijitlik üzerindeki etkileri ayrıca değerlendirilmiştir. Zeminin doğrusal olmayan etkisi empedans fonksiyonları üzerinde değerlendirilmiş ve modellenen köprü ayağın altındaki temelin deprem davranışı parametrik olarak yapı-zemin etkileşimi ile birlikte incelenmiştir. Homojen yarı uzaya gömülü eliptik veya dikdörtgen şekilli temellerin rijitlikleri için yatay, düşey, eğilme ve burulma titreşim modlarına karşı gelen statik ve dinamik rijitlikler elde etmişlerdir.

1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada, deprem yer hareketiyle titreşime zorlanan yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşimini ve özellikle yerel zemin koşullarının üstyapıların ve temellerinin sismik davranışı üzerindeki etkilerini, sayısal yöntemlerden yararlanarak inşaat mühendislerinin pratik mühendislik hayatlarında özel yapıların depreme dayanıklı tasarımı için kullanabileceği basit bir çözüm algoritması geliştirmektir. Yapı-zemin etkileşim birlikteliğinin sayısal araçlarla idealleştirilmesinde, altsistem yaklaşımı (empedans fonksiyonları) kullanılarak, zemin davranışının yapısal tepki üzerindeki etkileri yönetici anahtar parametrelere bağlı değerlendirilerek tartışılmıştır.

Yapı-temel-zemin dinamik etkileşim probleminin altsistem yaklaşımıyla analizi için MATLAB programlama diline dayalı basitleştirilmiş çözüm önerilerin sunulduğu bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, yapı-temel-zemin etkileşim problemi tanıtılmış ve daha sonra konuya ilişkin yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır.

İkinci bölümde, öncelikle yapı-temel-zemin dinamik etkileşim probleminin çözümüne ilişkin tarihi sistematik bir şekilde birçok araştırmacıya referans olarak sunulmuştur. Depremselliği yüksek bölgelerde inşa edilecek önemli yapıların dinamik analizinde yerel zemin koşullarının hesap yöntemine katılması konusunda tavsiye niteliğinde yayınlanan başlıca raporlar verilmiştir. Yapı-zemin birlikteliğinin sayısal araçlarla idealleştirilmesinde kullanılan doğrudan çözüm yöntemi ve altsistem yaklaşımı tanıtılmıştır. Yapı-temel-zemin ortamlarının birbirleriyle etkileşimleri arasında ki kinematik ve eylemsizlik mekanizmaları ifade edilmiştir. Geoteknik deprem mühendisliği kavramının yapı-temel-zemin etkileşim probleminde değerlendirilmiştir. Ayrıca zeminin dinamik yükler altındaki davranışı irdelenmiştir.

Üçüncü bölümde, yapıların dinamik davranışına temel-zemin etkileşiminin katkısını altsistem yaklaşımında kullanılan empedans fonksiyonlarıyla gösterebilmek için MATLAB programlama dilinde geliştirilen çözüm algoritmasının yöntemi verilmiştir. Sayısal analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan anahtar parametreler, formüller verilmiş ve daha sonra çözüm akış şemaları gösterilmiştir.

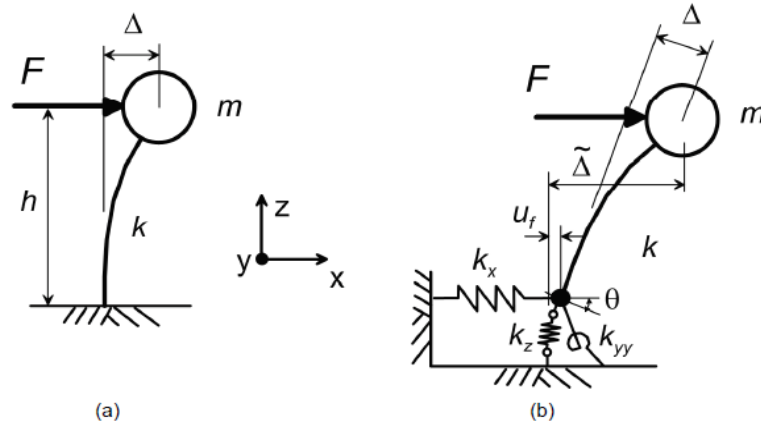
Dördüncü bölümde ise sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen çözüm algoritmasının etkinliğini ve yeterliliğini sayısal uygulamalarda vurgulamak için betonarme bir köprü ayağı ve bina temeli örnek model olarak seçilmiştir. Farklı bölgelere (Kocaeli, Sakarya ve İstanbul) ait vaka analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kullanılan temelin yüzeysel ($D/B= 0$) ve gömülü ($D/B= 0,25$ ve $0,5$) olma durumu dikkate alınmıştır. İyi ve kötü derecelendirilmiş zeminlere oturan temellerin serbest titreşim hareketine temelin gömülme derinliğinin etkisi

gözlemlenmiştir. Farklı yerel zemin koşullarının ve temel gömülme derinliğinin yapı-temel-zemin ortak sisteminin sönümüne etkisi incelenmiştir. Temel gömülme derinliğinin zayıf zemin koşulları için seçilmiş depremlere (Kobe 1995, Landers 1992, Düzce 1999 ve Erzincan 1992) ait ivme davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geometrik sönümün yapı-zemin etkileşim problemlerinin analizlerine katılmasının önemi özellikle temelin ötelenme ve eğilme titreşimleri açısından vurgulanmıştır. Yapı temelini oturduğu farklı yerel zemin koşulları dikkate alınarak ötelenme ve eğilme titreşimleri için frekanstan bağımsız statik rijitliklerin değişimi değerlendirilmiştir. Titreşim kaynağı frekansının rijitlik parametrelerine etkisi hesaba katılacak şekilde empedans fonksiyonların analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise zeminin kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin empedans fonksiyonlar üzerindeki etkisi çözüm sürecine dahil edilmiştir. Farklı zemin türlerine oturan temellerin gömülme oranına bağlı dinamik rijitliklerinin (empedans fonksiyonlarının) değişimleri sabit zemin kayma rijitliğine ($G_{(i)} = G_{maks}$) ve azaltılmış zemin kayma rijitliğine ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) göre geliştirilen MATLAB kodu çerçevesinde karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.

Beşinci bölümde ise, yapı-temel-zemin etkileşim probleminin analizini analitik olarak basit bir şekilde ele alan MATLAB çözüm algoritmasıyla elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Aktif deprem bölgelerinde ve zayıf zemin koşullarında inşa edilmesi zorunluluğu olan yapıların sismik yükler altındaki davranışlarında yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin etkisi oldukça büyüktür. Mühendislik çalışmaların deprem hesabı için uygulamakta olduğu geleneksel yöntemlerde, yapının oturduğu zemin ortamının şekil değiştirmedeği ve sonsuz rijit kabul edilmesi durumunda olduğu bunun sonucunda yapı, temelinden zemine rijit bağlı bir sistemin deprem yer hareketinde yapının varlığından etkilenmeyen yatay bir rijit öteleme olarak ele alındığı (Şekil 2.1.a.) varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin ihmal edilebilir seviyede olduğu durumlar için söz konusu olabilir. Ancak günümüzde deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde taşıma kapasitesi zayıf zeminler üzerine inşa edilen rijit taşıyıcı sistemli masif yapıların deprem hesabında, zeminin şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan bir dinamik sistem olarak ele alınması zorunluluğu taşımaktadır. Zeminin yapıya etkisinin karşılığı olarak yapıda zemini hem kinematik hem de dinamik bakımdan etkilemesi üstyapı ile zemin arasındaki karşılıklı etki probleminin yapı-zemin etkileşim konusunu oluşturan esnek taban yaklaşımıdır (Şekil 2.1.b.) [1]. Böylece statik ve dinamik dış etkilere karşı üstyapı ve zemin her ikisi de şekil değiştirebilen sistemler olarak birlikte davranış göstermektedir. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapıyla beraber analiz edilmelidir. Sismik analizlerde yapı-zemin dinamik etkileşimi problemini çözüm sürecine katarak doğruluk düzeyi yüksek matematik modeller ve sayısal yöntemler kullanılmasıyla depreme karşı tam güvenilirlik sağlanabilmektedir.



Şekil 2.1. Üstyapının dış yük etkisi altında yaptığı deformasyon: a) rijit taban yaklaşımında ötelenme b) esnek taban yaklaşımında dönme ve ötelenmeler (NIST GCR, 2012)

2.1. Eskiye Dayanan Tarihiyle Yapı-Zemin Etkileşimi

Başlangıç noktası 19. yüzyıla uzanan ve bununla birlikte takip eden yıllarla 20. yüzyılın ilk yarısında kademeli olarak gelişen yapı-zemin etkileşim problemi nükleer güç santralleri, açık deniz petrol platformları, asma köprüler, yüksek binalar, barajlar, viyadükler vb. rijit ve büyük ölçekli masif yapılarda uyarlanmış sismik güvenliğinin geliştirilmesi için güçlü bilgisayar araçlarıyla ele alınarak hızla ilerlemektedir.

Modern çağın başlangıcı olan yapı-zemin etkileşimi 1904'lerde Güney Avustralya'da Adelaide Üniversitesi'nde matematik profesörü olan Sir Horace Lamb ileriye doğru önemli bir atılım yaparak dinamik yüke maruz kalan homojen yarı uzay ortam üzerinde temel çözümler oluşturmuştur [2, 3]. Bycroft ise 1956'da yarı-sonsuz elastik boşlukta ve elastik bir tabaka üzerinde rijit dairesel ve dikdörtgen temellerin titreşiminde analitik çözümler sunmuştur [4]. Bazı temel denklemler ile yapı-zemin etkileşiminin temel kurallarına ilişkin çözümleri 1967 yılına dayalı özgün çalışmalardan biri olan R. A. Parmelee tarafından yapılmıştır [5]. Hızla gelişen yapı-zemin etkileşim konusu birçok bilim insanının ilgi odağı olmuştur. Yapılan araştırmalar göz önüne alınarak gelişen teknolojiler aracılığıyla yapı-zemin dinamik etkileşiminin çözüm yaklaşımlarına yönelik çalışmaların yapıldığı ve birçok değerli bilim insanının katkılarıyla günümüze kadar gelmektedir. Yapı-temel-zemin dinamik etkileşim probleminin çözümüne ilişkin tarihi (Tablo 2.1.) sistematik bir şekilde birçok araştırmacıya referans olarak sunulmuştur [2, 6].

Tablo 2.1. Yapı-zemin etkileşim probleminin çözümüne ilişkin kronoloji

Kronoloji	Bilimsel çalışmayı yapan	Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin çözümüne yönelik çalışma konuları
1904	Lamb, H.	Elastik cisim yüzeyinde titreşimlerin yayılımı [3].
1936	Mindlin, R. D.	Yarı-sonsuz katı içinde uygulanan bir kuvvet [7].
1937	Reissner, E.	Elastik yarı uzayın serbest ve zorlanmış burulma titreşimleri [8].
1953	Sung, T.Y.	Yarı-sonsuz katıda periyodik yüzey yüklerinden dolayı meydana gelen titreşimler [9].
1956	Bycroft, G.N.	Yarı sonsuz elastik uzayda ve elastik tabaka üzerinde rijit bir dairesel levhanın zorlanmış titreşimleri [4].
1962	Barkan, D. D.	Temellerin ve zeminlerin dinamiği [10].
1963	Thomson, W.T., Kobori, T.	Elastik yarı uzayda dikdörtgen temellerin dinamik şekil değiştirmeleri [11].
1966	Lysmer, J., Richart, F. E.	Düşey yüklere karşı temellerin dinamik davranışı [12].
1967	Gibson, R. E.	Homojen olmayan elastik yarı uzayda gerilmeler ve yerdeğiştirmeleri ilgilendiren bazı sonuçlar [13].
1967	Parmelee, R. A.	Bina-temel etkileşim etkileri [5].
1967	Whitman, R. V., Richart, F. E.	Dinamik olarak yüklenmiş temellerin tasarım aşamaları [14].
1969	Seed, H. B., Idriss, I. M.	Dinamik davranış analizleri için kayma modülü ve sönüm faktörleri [15].
1969	Newmark, N. M.	Simetrik yapıların burulması [16].
1969	Richardson, J. D.	Yarı sonsuz elastik ortamda rijit cisimlerin zorlanmış titreşimleri [17].
1969	Whitman, R. V.	Zemin dinamiğinin günümüzdeki durumu [18].
1969	Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. L.	Sonsuz ortamın sonlu dinamik modeli [19].
1970	Hradilek, P. J., Luco, J.E.	Dinamik yapı-zemin etkileşimi [20].
1970	Richart, F. E., Hall, J. R., Woods, R.D.	Temel ve zeminlerin titreşimleri [21].
1971	Luco, J. E., Westman, R. A.	Dairesel temellerin dinamik davranışı [22].
1971	Veletsos, A. S., Wei, Y. T.	Temellerin eğilme ve ötelenme titreşimleri [23].
1972	Lysmer, J., Wass, G.	Yapıların sonsuz düzlemde kayma dalgaları [24].
1973	Roesset, J.M., Whitman, R.V. Dobry, R.	Temel etkileşimi altında yapıların modal analizi [25].
1974	Kausel, E.	Tabakalı ortamdaki dairesel temellerin zorlanmış titreşimleri [26].
1974	Luco, J. E.	Tabakalı ortamda rijit temeller için empedans fonksiyonları [27].
1974	Veletsos, A. S., Meek, J. W.	Bina-temel sisteminin dinamik davranışı [28].
1974	Chopra, A. K. Gutierrez, J. A.	Çok katlı binaların temel etkileşimini içeren deprem tepki analizi [29].
1975	Seed, H. B.	Deprem davranışı için yapı-zemin etkileşim analizi [30].
1976	Apsel, R. J., Luco, J. E.	Rijit gömülü temellerin burulma davranışı [31].
1976	Bielak, J.	Yapı-zemin etkileşimi için modal analiz [32].
1976	Gazetas, G., Roesset, J. M.	Tabakalı zemin üzerinde sürekli temellerin zorlanmış titreşimi [33].
1976	Kausel, E.	Yapı-zemin etkileşimi [34].

Tablo 2.1. (Devamı)

1977	Seed, H. B., Whitman, R. V., Lysmer, J.,	Nükleer güç santrallerinin tasarımında yapı-zemin etkileşim etkileri [35].
1977	Aydinoglu, M. N., Cakiroglu, A.	Bir grup yapı ile zemin arasında dinamik etkileşim [36].
1978	Dominguez, J.	Dikdörtgen temellerin dinamik rijitliği [37].
1978	Dominguez, J.	Gömülü temellerin gelen dalgalara tepkisi [38].
1979	Savidis, S. A., Richter, T.	Yarı uzay yüzeyinde elastik plakların dinamik davranışı [39].
1980	Roesset, J. M.	Yapı zemin etkileşimi: Mevcut analiz yöntemleri ve araştırmanın durumu [40].
1982	Kausel, E., Peek, R.	Tabakalı zemin içindeki dinamik yükler için bir kesin çözüm [41].
1982	Rücker, W.	Yarı uzayda gelişi güzel şekilli rijit temellerin dinamik davranışı [42].
1983	Gazetas, G.	Makine temellerinin titreşimlerinin analizi [43].
1984	Karabalis, D. L., Beskos, D. E.	Sınır elemanlar yöntemiyle üç boyutlu rijit yüzeyel temellerin dinamik davranışı [44].
1984	Pecker, A.	Zemin dinamiği [45].
1985	Wolf, J. P.	Yapı-zemin dinamik etkileşimi [46].
1986	Triantafyllidis, T.	Yarı uzayda rijit dikdörtgen temellerin dinamik rijitliği [47].
1986	Haupt, W.	Zemin dinamiği temelleri ve uygulaması [48].
1987	Lin, H.T., Roesset, J. M., Tassoulas, J. L.	Komşu temeller arasında dinamik etkileşim [49].
1988	Pais, A., Kausel, E.	Rijit temellerin dinamik rijitlikleri için yaklaşık formüller [50].
1991	Karabalis, D. L., Mohammadi, M.	Frekans tanım aralığında sınır eleman yöntemi ile üç boyutlu temel-zemin-temel dinamiği [51].
1992	Wang, S., Schmid, G.	Sınır eleman yöntemi ve sonlu eleman yöntemi ile yapı-zemin-yapı dinamik etkileşimi [52].
1993	Beskos, D. E.	Yapı-zemin dinamik etkileşiminin de sınır eleman yönteminin uygulamaları [53].
1994	Karabalis, D. L., Huang, C. F. D.	Üç boyutlu temel-zemin-temel etkileşimi [54].
1994	Wolf, J. P.	Basit fiziksel modeller kullanarak temel plağın titreşimlerinin analizleri [55].
1995	Sieffert, J. G., Cevaer, F.	Empedans fonksiyonların el kitabı [56].
1996	Karabalis, D. L., Mohammadi, M.	Tabakalı zemin ortamında üç boyutlu dinamik temel-zemin-temel etkileşimi [57].
1998	Karabalis, D. L., Mohammadi, M.	Tabakalı zemin üzerinde üç boyutlu dinamik temel-zemin-temel etkileşimi [58].
1999	Stewart, J. P., Seed, R. B., Fenves, G. L.	Binalarda sismik yapı-zemin etkileşimi I: Analitik yönleri [59].
2000	Mylonakis, G., Gazetas, G.	Sismik yapı-zemin etkileşimi: Faydalı veya zararlı mı? [60]
2001	Lehmann, L., Antes, H.	Simetrik Galerkin sınır eleman yönteminin (SGSEY) uygulanmasıyla yapı-zemin-yapı dinamik etkileşimi [61].
2001	Darendeli, M. B.	Malzeme sönümü ve kayma modülü azalmanın yeni eğrilerinin geliştirilmesi [62].
2003	Stewart, J. P., Kim, S., Bielak, J., Dobry, R., Power, S. M.	NEHRP tasarım yönetmeliğindeki yapı-zemin etkileşim çözüm süreçlerinde iyileştirmeler [63].

Tablo 2.1.(Devamı)

2006	Broc, D.	Yapı zemin etkileşimi: teorik ve deneysel sonuçlar [64].
2006	Çelebi, E., Fırat, S., Çankaya, İ.	Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları [65].
2006	Mylonakis, G., Nikolaou, S., Gazetas, G.	Sismik yükler altındaki temeller: Köprü ayaklarında çözüm ve tasarım problemlerinin vurgulanması [66].
2007	Livaoglu, R., Dogangun, A.	Sıvı-yapı-zemin etkileşimini dikkate alındığı yükseltilmiş su tanklarının sismik davranışı üzerinde gömülü temellerin etkisi [67].
2008	Semblat, J., Kham, M. Bard, P.	Alüvyal havzalardaki sismik dalga yayılımı ve zemin-şehir etkileşiminin etkileri [68].
2008	Pala, M., Caglar, N., Elmas, M., Cevik, A., Saribiyik, M.	Sinir ağları ile binaların yapı-zemin dinamik etkileşim analizi [102].
2008	Pitilakis, D., Dietz, M., Muir Wood, D., Clouteau, D., Modaressi, A.	Sarsma tablası testlerinde dinamik yapı-zemin etkileşiminin sayısal çözümü [69].
2010	Han, Y. C.	Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak titreşim araçlarının temeli için dinamik analiz [70].
2011	Aydınoğlu, M. N.	Zayıf zeminlerde yapılan binalarda dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi için uygulamaya yönelik bir hesap yöntemi [71].
2012	Rayhani, M., El Naggar, M.H.	Tabakalı zeminlerde sismik yapı-zemin etkileşiminin fiziksel ve sayısal modellenmesi [72].
2013	Pitilakis, D., Moderessi-Farahmand-Razavi, A., Clouteau, D.	Yüzeysel temellerin eşdeğer lineer dinamik empedans fonksiyonları [73].
2013	Celebi, E., Kırtel, O.	Trenin ürettiği titreşimlerin azaltılması için ince duvarlı hendek bariyerlerin perdeleme performansının hesaplanması için doğrusal olmayan 2 boyutlu sonlu eleman modelinin geliştirilmesi [74].
2013	Givens, M. J.	Test yapılarının ve ölçüm cihazı yerleştirilmiş binaların dinamik yapı-zemin etkileşiminin değerlendirilmesi [75].
2013	Gazetas, G., Anastasopoulos, I., Adamidis, O., Kontoroupi T.	Temellerin doğrusal olmayan eğilme titreşimleri için geliştirilen rijitlik katsayıları [76].
2014	Galvin, P., Romero, A.	Sonlu ve sınır elemanları ile yapı-zemin etkileşiminin analiz edildiği MATLAB programı için bir teknik iyileştirme [77].
2014	Adamidis, O., Gazetas, G., Anastasopoulos, I., Argyrou, C.	Dairesel ve sürekli temellerin eğilme titreşimlerinde sönüm ve eşdeğer lineer rijitlik [78].
2015	Pitilakis, D., Karatzetzou, A.	Tarihi esnek yığma temellerin dinamik rijitliği [79].
2015	Ntritsos, N., Anastasopoulos, I., Gazetas, G.	Statik ve çevrimsel drenajsız kare gömülü temellerin davranışı [80].
2016	Durante, M. G., Di Sarno, L., Mylonakis, G., Taylor, C. A., Simonelli, A. L.	Zemin-kazık-yapı etkileşimi: Sarsma tablası testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar [81].
2016	Tümsek, Y., Çelebi, E.	Yapı-zemin etkileşim probleminde geometrik (radyasyon) sönüm etkisi[92].
2016	Givens, M.J., Mylonakis, G., Stewart, J.P.	Yapı-zemin etkileşim uygulamalarında temel sönümü için modüler analitik çözümler [82].
2017	Çetinkaya, M. Y., Çelebi, E., Kırtel, O.	Yapı-temel-zemin etkileşim probleminin Adapazarı bölgesi için empedans fonksiyonları yardımıyla analizi [83].
2017	Karatzia, X., Mylonakis, G.	Homojen olmayan zeminde kazık temeller için yatay rijitlik ve sönüm [84].
...

2.2. Uluslararası Tavsiye Niteliğinde Başlıca Raporlar

Bugünkü bilgilerimiz çerçevesinde, yapı-zemin etkileşimine ait çalışmaların başlangıç noktası 19. yüzyıla uzandığını görmekteyiz. California’da Los Angeles’ın kuzeyindeki San Fernando Vadisinde 1971’de meydana gelen San Fernando depreminin oluşturduğu büyük hasar, mühendisliğin gelişmesinde önemli derecede etken olmuştur. Sismik güvenliğinin geliştirilmesi için yapı-zemin etkileşim probleminin dikkate alınması ve standartlarda uygulanabilirliğinde ilk çalışma 1973’de ATC (Applied Technology Council) tarafından başlatılmıştır. Deprem mühendisliğinin gelişmesi doğrultusunda pek çok projeye imza atan ve çalışmalarına yoğun biçimde devam eden ATC’nin ilk önemli çalışması ATC 3-06 projesi olarak bilinen ve 1978’de yayınlanan çalışmadır (Applied Technology Council, “Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings”).

Etkili deprem riskini azaltmak için Amerika Birleşik Devletleri kongresi tarafından 1977’de kurulan NEHRP araştırma ve uygulama kurulu (National Earthquake Hazard Reduction Program) yaygın olarak kullanılmaktadır. NEHRP analiz prosedürü, yapı-zemin etkileşim problemini içeren bir komite (A. S. Veletsos, M. S. Agbabian, J. Bielak, P. C. Jennings, F. E. Richart ve J. M. Roesset) tarafından binalar için deprem yönetmeliği (ATC 1978) geliştirildi [63]. Yetkisi 1977 den bugüne uzanan NEHRP, deprem azaltma çabalarına katkıda bulunacağı dört ana acentesi bulunmaktadır:

- a. Federal Emergency Management Agency (FEMA)
- b. National Institute of Standards and Technology (NIST)
- c. National Science Foundation (NSF)
- d. United States Geological Survey (USGS)

Depremselliği yüksek bölgelerde inşa edilecek önemli yapıların dinamik analizinde yerel zemin koşullarının hesap yöntemine katılması konusunda tavsiye niteliğinde yayınlanan başlıca raporlar verilmiştir:

- a. NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA Publication 273)
- b. ASCE American society of civil engineers, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356)
- c. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440)
- d. NEHRP Recommended seismic provisions (FEMA P-750)
- e. Soil-Structure Interaction for Building Structures (NIST GCR 12-917-21)

Bu çalışma kapsamında, yapı-temel-zemin etkileşim probleminin altsistem yaklaşımı analizi için anahtar formüller yaygın olarak kullanılan NIST GCR 12-917-21 raporundan alınmıştır [1]. Yapı-zemin birlikteliğinin kendi doğasındaki karmaşıklığı ele alınarak inşaat mühendislerinin pratik mühendislik hayatlarına katkı sağlayacak altsistem yaklaşımıyla empedans fonksiyonlarının kullanımına dayalı basitleştirilmiş çözüm algoritması geliştirilmiştir.

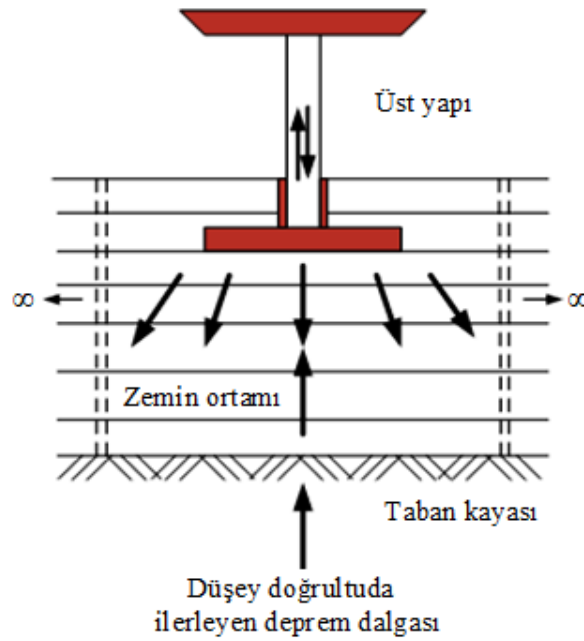
2.3. Yapı-Zemin Etkileşim Probleminin Çözüm Yöntemleri

Yerel zemin koşullarının yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinde doğrudan çözüm yöntemi veya altsistem yaklaşımı kullanılarak geliştirilen matematik model, yapısal ve geoteknik parametrelere bağlı ele alınmaktadır.

2.3.1. Direkt (doğrudan) çözüm yöntemi

Üstyapı ile zeminin tek bir ortak sistem olarak idealleştirildiği ve taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında analiz edildiği yöntem “Direkt (doğrudan) çözüm yöntemi” adı verilmektedir (Şekil 2.2.). Bu yöntemde zemin ortamının sonsuzluğunu ifade edebilmek için bu ortamın dış sınırlarına geçirgen sınırlar (yapay sınır koşulları) uygulanmaktadır. Böylelikle temelden yansıyor ve üst yapıdan geri dönerek yayılan deprem dalgalarının, geçirgen sınırlardan tekrar yansıyor zemin ortamına geri dönmesi önlenmektedir. Ancak dalgaların sınırlardan geri yansımaması yani sonsuzluğa doğru yetersiz radyasyon oluşumu ve çözüm sürecinin karmaşıklığı gibi etkenler bu yöntemin kullanılmasında dezavantaj

oluşturmaktadır. Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin doğrudan çözüm yaklaşımı ile ele alındığı sistemlerde sonlu elemanlar yöntemi, sınır elemanlar yöntemi veya hibrit yöntemler (sonlu ve sınır elemanların ortak kullanımı) kullanılmaktadır. Yapı-zemin dinamik etkileşimi probleminin direkt (doğrudan) çözüm yaklaşımına yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur [44, 51, 52, 53, 61, 74, 77].

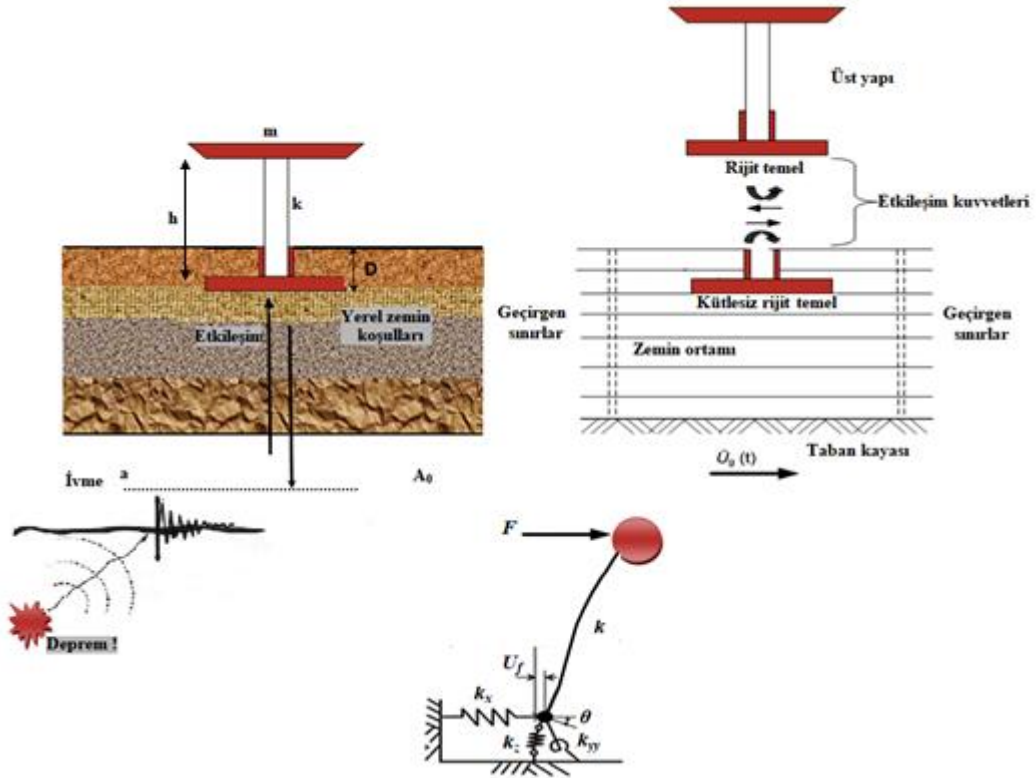


Şekil 2.2. Doğrudan çözüm yaklaşımı modeli

2.3.2. Altsistem yaklaşım yöntemi

Yapı zemin etkileşim problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan altsistem yaklaşımında yapı ve zemin ortamı iki ayrı sistem olarak ele alınmaktadır. Altsistem yaklaşımında, üstyapı hareket denklemi ile altyapı hareket denklemi yapı-zemin arakesitinde birleştirilmektedir. Bu yaklaşımda, rijit temelin oturduğu zemin ortamının şekil değiştirme özelliği ötelenme ve dönme empedans fonksiyonlarına bağlı ifade edilmektedir (Şekil 2.3.). Temelin gömülme derinliğine (D) bağlı değişen dinamik rijitlik, ötelenme titreşim modu (k_x) ve dönme titreşim modunu (k_{yy}) kapsamaktadır. Üst yapıyı temsil eden köprü ayağı; yapı yüksekliği (h), yapı kütlesi (m) ve yanal ötelenme rijitliği (k) parametrelerini ele almaktadır. Rijit kütlesiz temel plağının oturduğu zemin; lineer elastik, homojen, izotrop, ve yarı sonsuz bir ortam

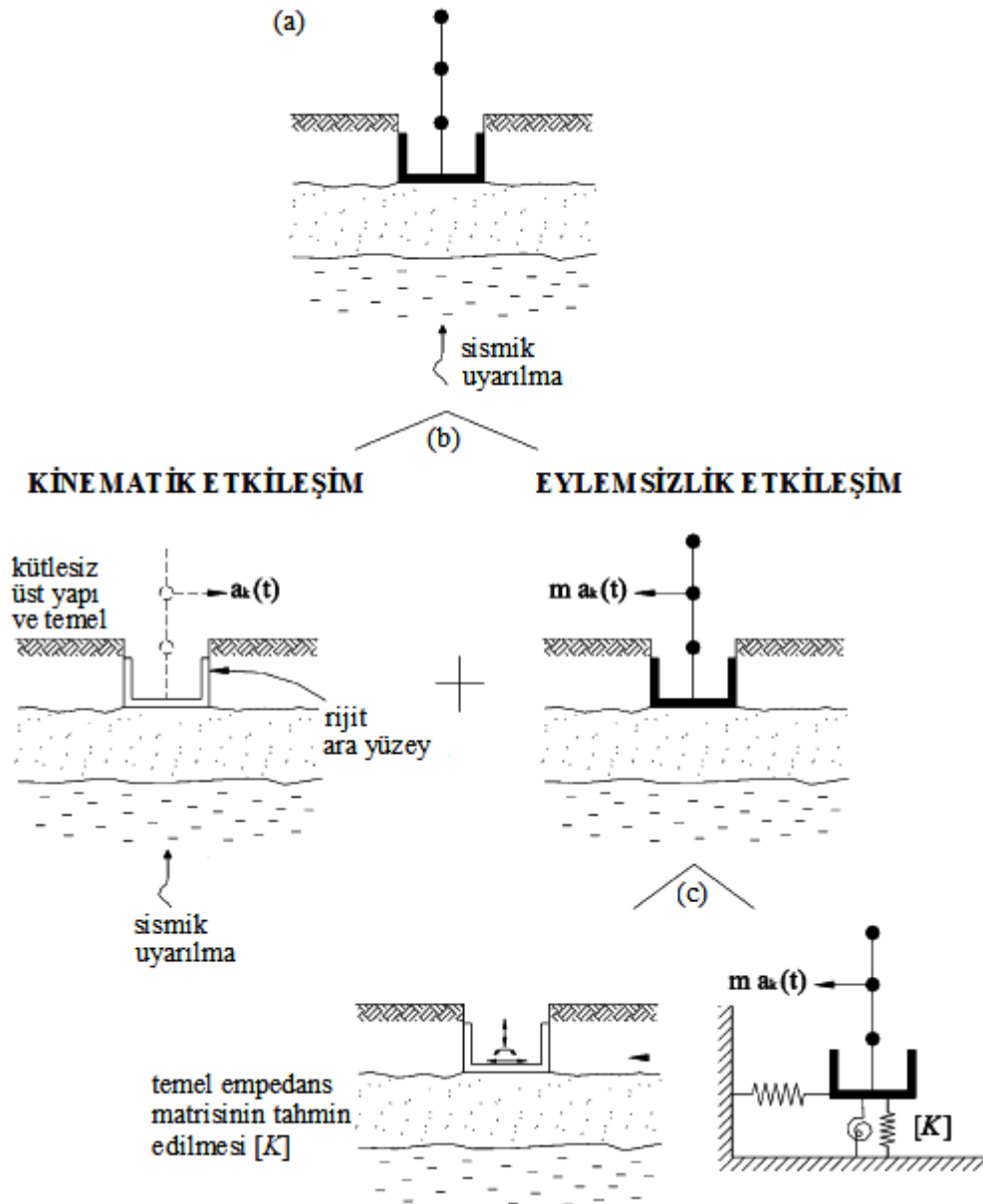
olarak kabul edilmiştir. Deprem hareketi dalgalar halinde zemin ortamına yayılarak yapı temeline ulaşmasıyla temelin ötelenmesi (U_f) meydana gelmektedir. Altsistem yaklaşımının kullanıldığı birçok çalışma literatür de mevcuttur [50, 60, 65, 66, 83, 85].



Şekil 2.3. Altsistem yaklaşımı modeli

2.4. Yapı-Temel-Zemin Etkileşiminde Mekanik Düzen

Yapı-zemin etkileşim sistemi, zemin özellikleri, yapı rijitliği, yapı kütlesi ve seçilen temel tipi unsurlarını içermektedir. Bu unsurlar üstyapının kesitlerine gelen kuvvetleri, yerdeğiştirmeleri ve periyotları önemli derecede etkilemektedir. Yapı-temel-zemin sisteminin birbiriyle etkileşimleri arasında iki mekanizma mevcuttur. Bu mekanizmalar kinematik etkileşim ve eylemsizliğe bağlı etkileşim olarak ifade edilmektedir. Yapı-temel-zemin ortamlarının birbirleriyle etkileşimleri arasındaki mekanik düzen Şekil 2.4.'de verilmiştir [66].



Şekil 2.4. a) Yapı-zemin etkileşim probleminin geometrisi b) Kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizi c) İki aşamalı eylemsizlik etkileşim analizi (Mylonakis ve ark., 2006)

Yapıların sismik yüklere karşı davranışında yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin analizinde, şekil değiştiren zemin ortamı yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunurken yapı da zemini kinematik ve dinamik bakımından etkimektedir

Kinematik etkileşim, serbest alan hareketinin temel-zemin ara yüzeyinde bulunan her bir noktada farklı özellik göstermesidir. Serbest alan hareketinin değişkenlik göstermesine neden olan etkiler; temelin gömülme derinliği, yapının geometrisi ve

buna bağlı olarak temel biçimi, rijitliği ve deprem dalgalarının yapıya geliş açısından kaynaklandığı söylenebilmektedir.

Eylemsizlik etkileşiminde ise titreşim etkisindeki bir yapıda burulma, eğilme ve kesme kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvet ve momentler temel-zemin etkileşim arakesitinde yerdeğıştirme ve dönme meydana getirmektedir. Tüm yapısal sistemin şekil değiştirmesine önemli katkı sağlayan bu yerdeğıştirmeler histerisiz zemin sönümü ve geometrik sönüm vasıtasıyla enerji tüketimine yol açar ve bu durum sistemin sönümünü önemli derecede etkilemektedir [83].

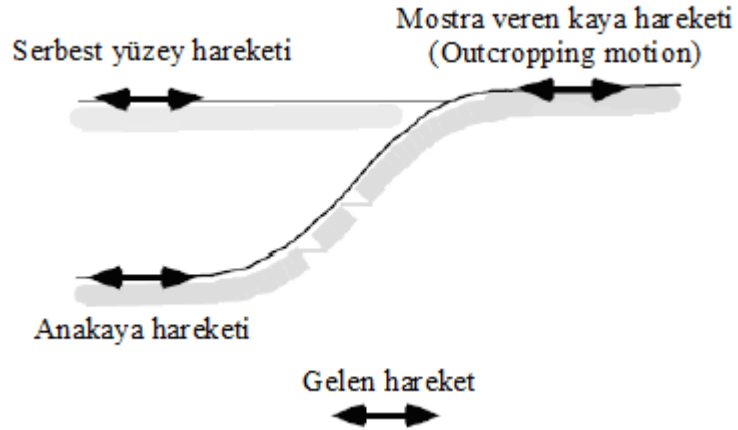
2.5. Geoteknik Deprem Mühendisliği Kavramının Yapı-Temel-Zemin Etkileşim Probleminde Değerlendirilmesi

Yapı-temel-zemin etkileşim problemi disiplinler arası bir faaliyet alanı oluşturmaktadır. Bu faaliyet alanında zeminle yapı mekaniği, zeminle yapı dinamiğine dayalı deprem mühendisliği, hesaplamalı ve sayısal çözüm yöntemleriyle keşismektedir. İlk çalışmalarını 1916-1925 yılları arasında olan Karl Von Terzaghi, modern zemin mekaniğinin kurucusu olarak kabul edilmektedir. Geoteknik mühendisliğinin gelişim süreci bir Türk bilim insanı olan Ord. Prof. Dr. A. Hamdi Peynircioğlu'nun çalışmasıyla ve birçok değerli bilim insanının katkılarıyla günümüze kadar gelmektedir.

Zeminlerin ve yapıların dinamik yüklere (dalga hareketi, deprem, rüzgâr, titreşimli makine yüklemeleri v.b.) karşı davranışları geoteknik deprem mühendisliğinde önemli bir yer tutmaktadır. Böylelikle mühendislik uygulaması yapılacak her hangi bir arazi çalışmasında detaylı geoteknik incelemeler yapılmalıdır. Bu çalışmada, geoteknik deprem mühendisliği kavramının yapı-temel-zemin dinamik etkileşim probleminde değerlendirilmiştir.

2.5.1. Deprem yer hareketi

Yapı-temel-zemin etkileşim problemine etki edecek bir diğer kritik husus ise sismik yüklerdir. Fay yırtılması sonrası oluşan P ve S dalgaları sırasıyla sahadaki zeminleri, temel elemanlarını ve üzerinde yer alan yapıyı sarsmaktadır. Bu sarsıntıya yüzey dalgalarının eklenmesiyle gerçek deprem talebi belirlenmektedir. Deprem şiddetinin artması, süresinin uzaması, titreşimin frekans içeriğinin değişmesi temel zeminlerinin bu deprem yükleri altındaki davranışının değişmesine neden olmaktadır. Saha davranış analizinde kullanılan deprem yer hareketi; serbest yüzey hareketi (zemin yüzeyindeki hareket), anakaya hareketi, (zemin profilinin tabanındaki hareket) mostra veren kaya hareketi (anakayanın yer yüzeyine çıktığı bir bölgedeki hareket) ve gelen hareket olarak kullanılan terimler Şekil 2.5.'de gösterilmiştir [100].



Şekil 2.5. Saha davranış analizinde deprem hareketi (Kramer, 1996)

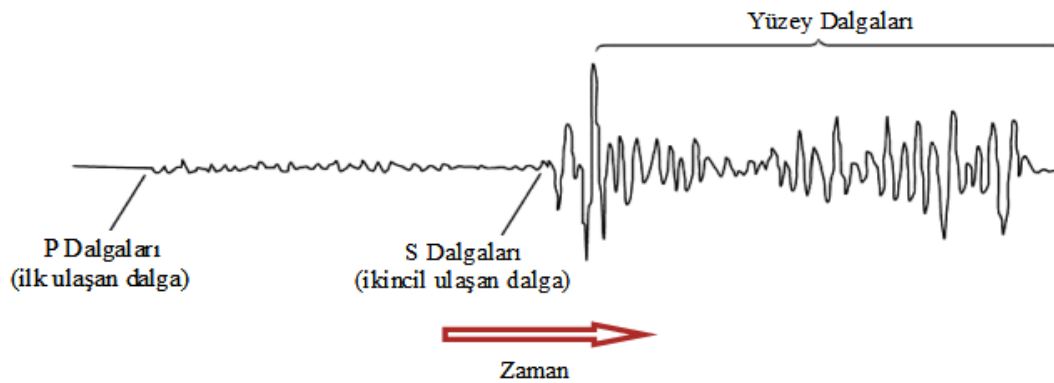
Depreme karşı yapı-zemin etkileşim problemini modellerken zemin tabakalarının davranışı ve depremin frekans içeriği göz önüne alınarak ayrıntılı davranış analizi yapılmalıdır.

2.5.2. Deprem sırasında oluşan dalgalar

Deprem ya da patlatma anında yer içerisinde çok büyük miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu enerji ortamın özelliklerine bağlı olarak yer içerisinde elastik dalgalar şeklinde yayılmaktadır. Sismik (deprem) dalgalar olarak bilinen bu

elastik dalgalar, depremi oluşturan kırılma ve faylanma nedeniyle kaynaktan uzaklaşacak şekilde yayılırlar ve bu esnada oluşan dalga türleri; cisim dalgaları ve yüzey dalgalarıdır. Cisim dalgaları; P (Primary veya Pressure) ve S (Secondary veya Shear) dalgalarını, yüzey dalgaları ise Rayleigh ve Love dalgalarını kapsamaktadır.

Yer içerisinde en hızlı yayılan ve deprem kayıt aletleri tarafından ilk algılanan P dalgaları, ortam üzerinde herhangi bir şekil bozukluğu oluşturmadan katılar, sıvılar ve gazlar içerisinde kolayca yayılabilmektedir. Deprem kayıtlarında ikincil olarak görülen ve şekil değişimine neden olan S dalgaları, şekil değişimine direnci olan ortamlardan geçerek yayılmaktadır. Genellikle mühendislik pratiğinde S dalgalarının oluşturduğu yatay yer hareketi ele alınmaktadır. Yüzey dalgaları cisim dalgalarına göre daha yavaş yayılırlar ancak Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi genlikleri daha büyüktür. Cisim dalgalarına göre daha fazla hasara neden olan yüzey dalgaları, daha fazla yer hareketi oluşturmaktadır. Ayrıca yüzey dalgaları daha yavaş hareket ettiği içinde etkisi daha uzun sürer ve cisim dalgalarından daha düşük frekans içeriğine sahiptir. Böylelikle yüzey dalgaları düşük frekansa ve büyük genliklere sahip olmalarından birçok depremde yapılara zarar vermektedir. Yüzey dalgaları kapsayan ve hızı daha fazla olan Love ve genliği daha büyük olan Rayleigh dalgaları vardır.



Şekil 2.6. Sismik dalga türlerinin yayılımı

2.5.3. Zemin ortamının incelenmesi

Zemin ortamının üstyapıya oranla çok rijit olduğu durumlar dışında, statik ve dinamik dış etkilere karşı üstyapı ve zemin her ikisi de şekil değiştirebilen sistemler

olarak birlikte davranış göstermektedir. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir.

2.5.3.1. Yerel zemin koşulları

Sismik yüklere karşı yapılarda oluşan hasarların önemli bir kısmının yerel zemin koşullarının dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır. Bu koşullar yapıya gelen deprem kuvvetinin genlik, frekans içeriği ve süre gibi özelliklerini değiştirebilmektedir. Yerel zemin koşullarının deprem hareketine maruz yapının dinamik davranışı üzerindeki etkileri yapı-zemin-temel açısından inceleyebilmek için bu çalışmada zemin bölgesinin mekanik özellikleri dikkate alınmıştır.

Yerel zemin koşullarının yapı davranışına etkileri:

- a. Üstyapı temeli altındaki zemin, anakayadaki deprem etkisini değiştirir ve bu etkinin büyümesi olarak gözlemlenmektedir.
- b. Zemin etkisiyle yapının dinamik özellikleri değişmektedir (periyot ve mod biçimleri).
- c. Yapıdaki titreşim enerjisinin büyük bir kısmı, temelin zemine mesnetlenme koşulunun rijit olmaması nedeniyle zemindeki malzeme sönümü ve sonsuz zeminde yayılma etkisiyle sönmesidir.

Türkiye Deprem Yönetmeliği, depreme karşı dayanıklı yapı tasarımında yerel zemin koşullarının etkisini dikkate almak için en üst zemin tabakası kalınlığına bağlı dört yerel zemin sınıfını (Z1, Z2, Z3 ve Z4) göz önüne almaktadır (Tablo 2.2.). Ayrıca zemin grupları, çeşitli parametrelere bağlı sınıflandırılması Tablo 2.3.'de verilmiştir [86].

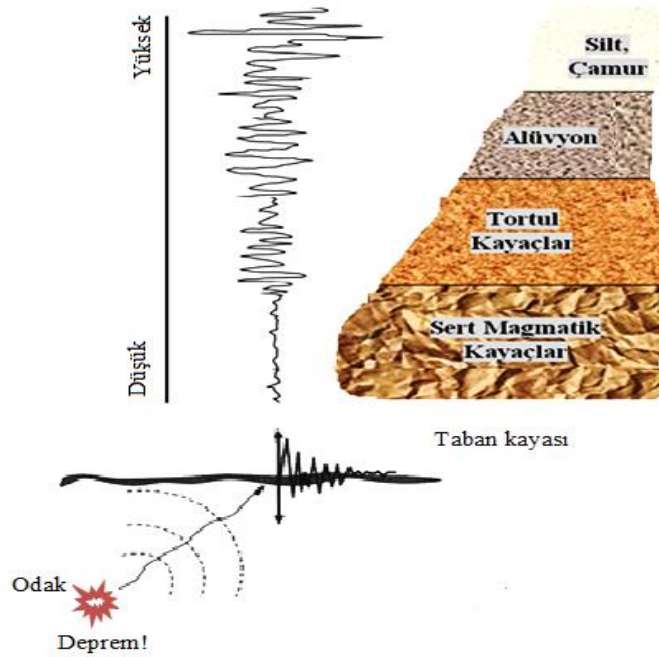
Tablo 2.2. Yerel zemin sınıfları (DBYBHY, 2007)

Yerel zemin sınıfı	Zemin grubu ve en üst zemin tabakası kalınlığı (h_1)
Z1	(A) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (B) grubu zeminler
Z2	$h_1 > 15$ m olan (B) grubu zeminler $h_1 \leq 15$ m olan (C) grubu zeminler
Z3	$15 < h_1 \leq 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 \leq 10$ m olan (D) grubu zeminler
Z4	$h_1 > 50$ m olan (C) grubu zeminler $h_1 > 10$ m olan (D) grubu zeminler

Tablo 2.3. Zemin grupları (DBYBHY, 2007)

Zemin grubu	Zemin grubu tanımı	Stand. penetr. (N/30)	Relatif sıkılık (%)	Serbest basınç direnci (kPa)	Kayma dalgası hızı (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayalar ve ayrışmamış sağlam metamorfik kayalar, sert çimentolu tortul kayalar....	—	—	> 1000	> 1000
	2. Çok sıkı kum, çakıl.....	> 50	85—100	—	> 700
	3. Sert kil ve siltli kil.....	> 32	—	> 400	> 700
(B)	1. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayalar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayalar.....	—	—	500— 1000	700— 1000
	2. Sıkı kum, çakıl.....	30— 50	65— 85	—	400— 700
	3. Çok katı kil ve siltli kil....	16— 32	—	200— 400	300— 700
(C)	1. Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar.....	—	—	< 500	400— 700
	2. Orta sıkı kum, çakıl.....	10— 30	35— 65	—	200— 400
	3. Katı kil ve siltli kil.....	8— 16	—	100— 200	200— 300
(D)	1. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları.....	—	—	—	< 200
	2. Gevsek kum.....	< 10	< 35	—	< 200
	3. Yumuşak kil, siltli kil.....	< 8	—	< 100	< 200

Yerel zemin koşulları anakayadaki deprem etkisini değiştirir ve bu etkinin kötü derecelendirilmiş zemin koşullarında büyüdüğü gözlemlenmektedir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Anakayadaki deprem hareketinin tabakalara büyütülerek iletilmesi

Yapıların sismik analizi için yapı-zemin birlikteliğinin düşünülmesi zayıf zemin koşullarında önem kazanmaktadır.

2.5.3.2. Zeminin dinamik yükler altındaki davranışı

Artan rijitlik ile birlikte artış gösteren kayma dalga hızı yoğunluk artışıyla da azalmaktadır. Kayma dalga hızı, geoteknik deprem mühendisliğinde ve zemin dinamiğinde kullanılan önemli bir parametredir. Kayma dalga hızı (V_s), kayma modülüne (G) ve birim hacim ağırlığına (ρ) bağlıdır (Denklem 2.1).

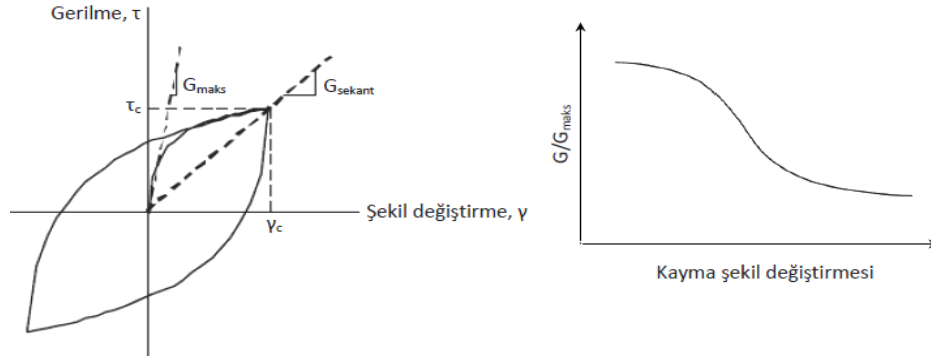
$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\text{maks}}}{\rho}} \quad (2.1)$$

Zeminin dinamik yükler altındaki özellikleri Tablo 2.4.'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Zeminin dinamik yükler altındaki özellikleri

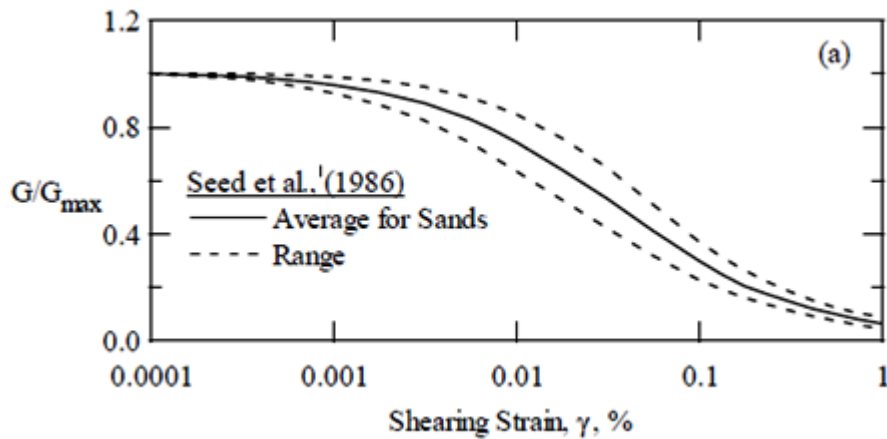
Gerilme-şekil değiştirme özellikleri	Kayma mukavemeti özellikleri
Dinamik kayma modülü	Tekrarlı gerilme genliği
Sönüm oranı	Çevrim sayısı

Deprem hasarlarının yapısı ve dağılımı zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışından etkilendiği için zeminin dinamik yükler altındaki davranışı Şekil 2.8.'de gösterilmiştir [100]. Sekant kayma modülü (G_{sec}), eşdeğer lineer malzeme (zeminin gerçek nonlinear davranışına ait bir yaklaşım) parametresi olarak tanımlanır.

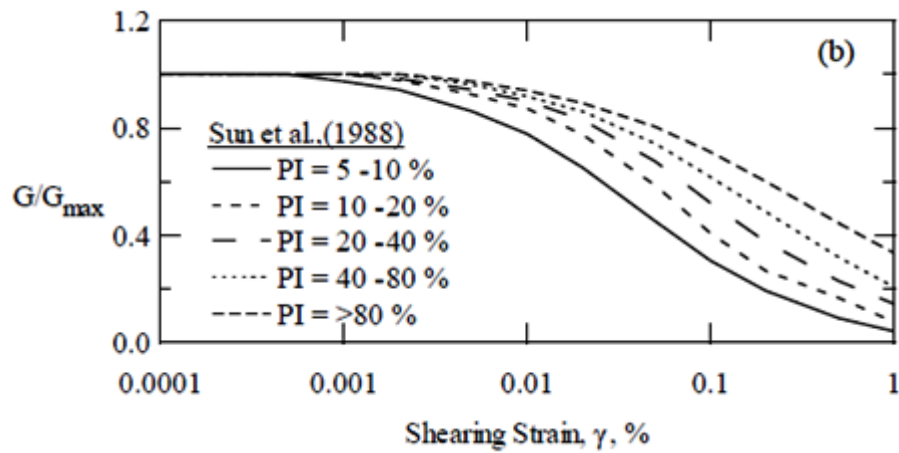


Şekil 2.8. Zeminin dinamik yükler altındaki özellikleri (Kramer, 1996)

Zemin davranışı, zeminin içerdiği su miktarına bağlı olarak değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Su muhtevası arttıkça mukavemette azalma ve zeminlerde şişme meydana gelmektedir. Azalan su muhtevası ise zemin hacmini azaltır ve zeminin plastik bir davranış göstermesini sağlamaktadır. Zeminin plastik özellik gösterdiği su muhtevası olan plastisite indisi, çalışma konusunun önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yaygın olarak kabul edilen ampirik kayma modülü azalım eğrilerin plastisite indislerine göre zeminlerin davranışları Şekil 2.9.'da verilmiştir [15].



Şekil 2.9. Kayma modülü azalım eğrilerinin deneysel analizi (Seed ve ark., 1970)



Şekil 2.9. (Devamı)

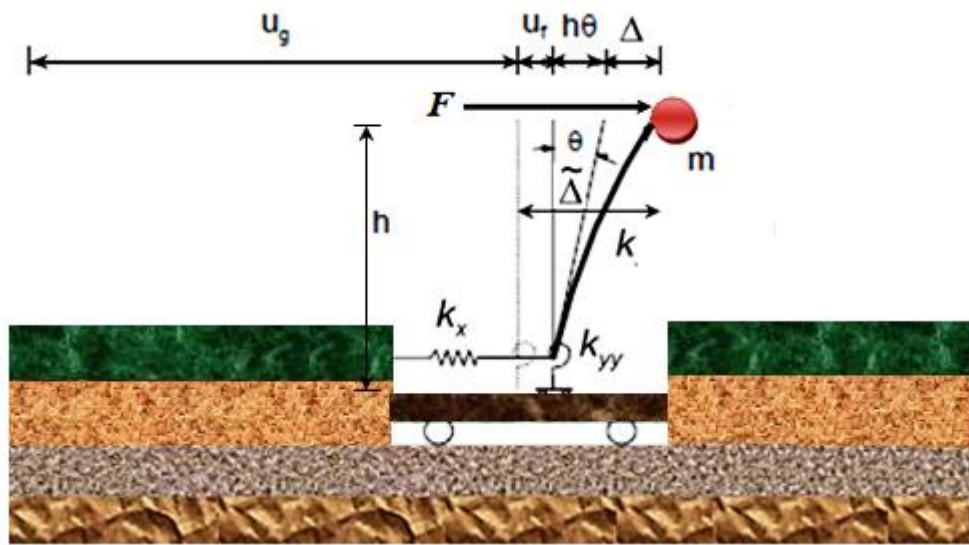
Farklı plastisite indislerine göre sınıflandırılan zemin türleri Tablo 2.5.'de verilmiştir [101].

Tablo 2.5. Zeminlerin plastisite indis değerine göre sınıflandırılması (Bozkurtoğlu ve ark., 2010)

Burmister, 1951		
Plastisite indisi PI (%)	Plastisite derecesi	Tanım
0	Plastik değil	Silt
1-5	Önemsiz derecede plastisiteli	Killi silt
5-10	Düşük plastisiteli	Silt ve kil
10-20	Orta plastisiteli	Kil ve silt
20-40	Yüksek plastisiteli	Siltli kil
> 40	Çok yüksek plastisiteli	Kil
Leonars, 1962		
Plastisite indisi PI (%)	Plastisite derecesi	Kuru dayanım
0 – 5	Plastik değil	Çok düşük
5 – 15	Az plastik	Düşük
15 – 40	Plastik	Orta
> 40	Çok plastik	Yüksek
Anon, 1979		
Plastisite sınıfı	Plastisite indisi PI (%)	Plastisite derecesi
1	< 1	Plastik değil
2	1 – 7	Az plastik
3	7 – 17	Orta plastik
4	17 – 35	Yüksek plastik
5	> 35	Çok yüksek plastik

BÖLÜM 3. YAPI-TEMEL-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN ALTSİSTEM YAKLAŞIMIYLA ANALİZİ İÇİN MATLAB PROGRAMLAMA DİLİNE DAYALI BASİT BİR ÇÖZÜM ÖNERİSİ

Deprem hesabında kullanılan yapı temellerinin rijit ve zemine ankastre olarak bağlı kabul edildiği geleneksel hesap yönteminde, zeminin şekil değiştirmesi sonucu temelin dönmesi ve ötelenmesi ihmal edilmektedir. Ancak zemin ortamının şekil değiştirmesi söz konusu olduğundan gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi ve zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir. Esnek taban yaklaşımıyla yapı temelini oturduğu zemine bağlanma şekli ve yapısal davranışına ait parametreler Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Bu yaklaşıma göre zemin ortamının şekil değiştirmesi söz konusu olduğundan temelin dönmesi ve ötelenmesi sonucunda üstyapının toplam yer değiştirmesinin değiştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.1. Esnek taban yaklaşımıyla yapı temelini oturduğu zemine bağlanma şekli ve yapısal davranışına ait parametreler

Zemin ortamının şekil değiştirme yeteneği ve zemin sonsuzluğunda kaybolan enerjiyi temsil eden geometrik sönüm, dinamik karakterde ilgili doğrultuda yaylarla gösterilmektedir. Bu eşdeğer yayları tanımlayan ve temel-zemin arakesitinde yazılan fonksiyonlara empedans fonksiyonları denilmektedir.

Zemin ortamının üstyapıya oranla çok rijit olduğu durumlar dışında, statik ve dinamik dış etkilere karşı üstyapı ve zemin şekil değiştirebilen sistemler olarak birlikte davranış göstermektedir. Sismik analizlerde yapı-zemin dinamik etkileşimi probleminin çözüm sürecine katılarak yapıların deprem performansları daha ayrıntılı bir şekilde alınmasıyla depreme karşı tam güvenlik sağlanabilmektedir. Serbest yüzey deprem yer hareketiyle zorlanan yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini ve zeminin üst yapıların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini altsistem yaklaşımıyla yapı temeli-zemin arakesitinde tanımlanan empedans fonksiyonlarına bağlı analiz edilmektedir.

Empedans fonksiyonların bağlı olduğu özellikler:

- a. Zemin özelliklerinin bir fonksiyonu olan kayma modülü (G), poisson oranı (ν), yoğunluk (ρ) ve kayma dalga hızıdır (V_s).
- b. Temelin yüzeysel veya gömülü olma durumuyla birlikte temelin geometrik oluşumunun da bir fonksiyonudur.
- c. Titreşim frekansına bağlıdır.

Bu çalışma kapsamında, yüzeysel ve gömülü temel olarak tasarlanan 2 boyutlu betonarme köprü ayağı ve bina temeli modellerinin yapı-zemin birlikteliği sayısal araçlarla idealleştirilerek, altsistem yaklaşımı (empedans fonksiyonları) esas alınmasıyla geoteknik mühendislik parametrelerine bağlı incelenmiştir. Analiz çalışmalarında incelenen parametreler Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST GCR, 2012) raporundan alınmıştır [1]. Ayrıca geoteknik temel zemin etüt raporlarından alınan zemin değerlerinin Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğine (DBYBHY, 2007) uygun olma koşulunda dikkate alınmıştır [86].

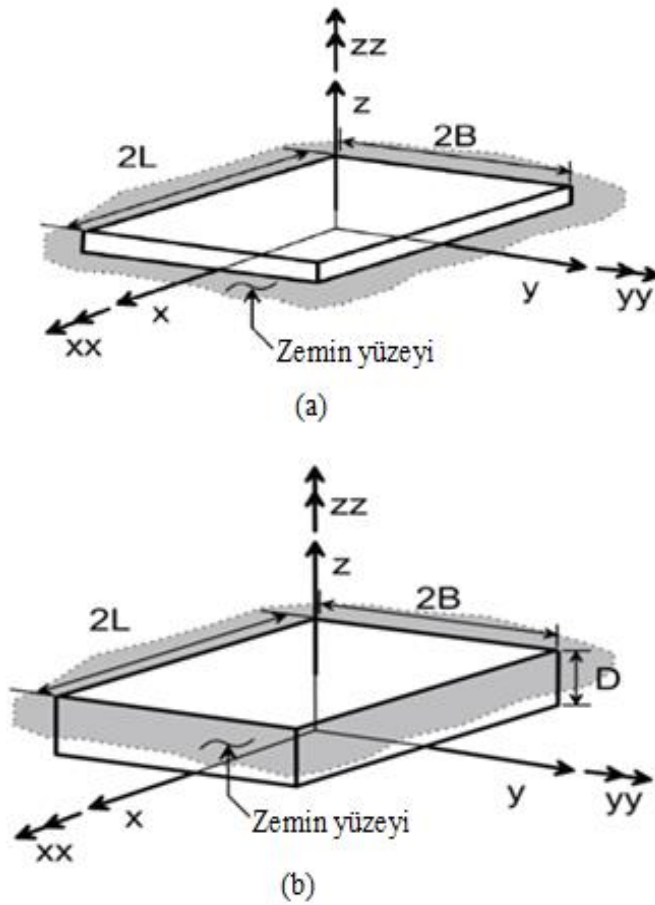
Yapıların dinamik davranışına temel-zemin etkileşiminin katkısını altsistem yaklaşımında kullanılan empedans fonksiyonlarıyla gösterebilmek için MATLAB programlama dilinde bir çözüm algoritması geliştirilmiştir [87]. Bu analiz algoritmasının etkinliğini ve yeterliliğini sayısal uygulamalarda vurgulamak için betonarme bir köprü ayağına ve bina temeli örnek model olarak seçilmiştir.

- a. Farklı bölgelere (İzmit/Kocaeli, Sakarya ve İstanbul) ait vaka analizleri gerçekleştirilmiştir.
- b. Temel zemin etüt raporlarından alınan parametreler, örnek köprü ayağı temelinin oturduğu zemin koşulları İzmit ve Sakarya bölgelerine ait bina temeli modelinde ise İstanbul bölgesindeki yerel zemin koşullarına aittir.
- c. Sayısal analizlerin bütün aşamalarında temel gömülme derinliğinin (D/B) farklı yerel zemin koşulları üzerindeki etkisi dikkate alınarak gerçekleştirildi.
- d. Zemin koşulların ve temel gömülme derinliğinin yapı-zemin etkileşim sisteminin sönüm oranları ve periyot uzaması oranlarına etkisi tablolar halinde sunulmuş ve değerlendirildi.
- e. Analizlerde Kobe (1995), Landers (1992), Düzce (1999) ve Erzincan (1992) depremlerine ait % 5 sönüme karşı gelen ivme davranış spektrum eğrileri dikkate alınmıştır.
- f. Yapının zeminle birlikteliği sonucunda şekil değiştirebilen ortamın malzeme ve geometrik sönümünün katkıları da dikkate alan sönüm parametresine bağlı davranış spektrum eğrileri elde edilerek yapının maruz kaldığı spektral ivmenin değişimi, geleneksel hesap yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.
- g. Geometrik sönümün yapı-zemin etkileşim problemlerinin analizlerine katılmasının önemi özellikle temelin ötelenme ve eğilme titreşimleri açısından vurgulanmıştır.
- h. Yapı temelini oturduğu farklı yerel zemin koşulları ($G_{(i)} = G_{maks}$) dikkate alınarak ötelenme ve eğilme titreşimleri için frekanstan bağımsız statik rijitliklerin değişimi değerlendirilmiştir.
- i. Yapı temeli-zemin arakesitinde tanımlanan empedans fonksiyonlarının analizinde, ötelenme (k_x) ve dönme (k_{yy}) titreşim modlarının boyutsuz frekans

parametresinin $0 \leq a_0 \leq 3$ aralığına göre değişimi $G_{(i)} = G_{\text{maks}}$ durumu göz önüne alınarak elde edilmiştir.

- j. Kayma modülü azalım eğrilerinin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi farklı zemin türleri için elde edilmiştir.
- k. Zeminin kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin empedans fonksiyonlar üzerindeki etkisi çözüm sürecine dahil edilmiştir.

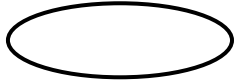


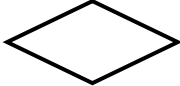

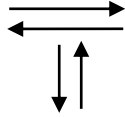


Bu çalışmada Pais ve Kausel'in yaklaşımı ile elastik bir yarı-uzaya oturan köprü ayağı ve bina modellerine ait rijit temelin gömülme derinliğine (D/B) bağlı temel-zemin ara kesitindeki empedans fonksiyonların çözümü yapılmaktadır [50]. Yüzeysel ve gömülü temel geometrileri ($L \geq B$) Şekil 3.2.'de verilmiştir [1]. Ayrıca elastik bir yarı-uzaya oturan rijit temellerin empedans fonksiyonlarının hesabı için ampirik bağıntılar literatürde mevcuttur [50, 66, 103].



Şekil 3.2. Yüzeysel ve gömülü temel geometrileri (NIST, 2012)

Parametrik analizlerin gerçekleştirilmesi için çözüm algoritmasında kullanılan akış şemalarının şekilleri ve ifadeleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Akış şemaları için kullanılan şekillerin işlevi

Şekil	Şekil adı ve işlevi
	Elips: Algoritmanın başladığını ve sona erdiğini belirtmek için kullanılır.
	Paralel Kenar: Programa veri girişi işlemlerini gösterir.
	Dikdörtgen: Hesaplama veya sayısal değerlerin değişkenlere atama yapmak için kullanılır.
	Eşkenar Dörtgen: Mantıksal ifadeler için karar verme ve karşılaştırma işlemleri yapar.
	Altıgen: Program içinde belirli blokların ard arda tekrar edileceğini gösterir.
	Oklar: Diyagramın akış yönünü gösterir.
	Yazıcı çıktısı: Programa ait sonuçların ekrana yazdırılması
	Bağlantı: Diyagramın çizilemediği durumlarda kullanılır.

3.1. Yüzeysel ve Gömülü Rijit Temelerde Statik Rijitliklerin (K_x ve K_{yy}) Hesabı için Elde Edilen Çözüm Algoritması

Frekanstan bağımsız ($a_0 = 0$) olan statik rijitlikler (K_j); zemin kayma modülü (G), temel yarı uzunluğu (L), temel yarı genişliği (B), poisson oranı (ν) ve m katsayısının bir fonksiyonudur (Denklem 3.1). Burada j ise ötelenme (x, y, z) ve dönme (xx, yy, zz) modlarını belirtmektedir. Ötelenme ve dönme modu için m katsayısı sırasıyla 1 ve 3 olarak alınmaktadır [50].

$$K_j = GB^m f(B/L, \nu) \quad (3.1)$$

Yüzeysel rijit temellerin ötelenme davranışı için statik rijitlik fonksiyonu Denklem 3.2’de eğilme davranışı için Denklem 3.3’de verilmiştir.

$$K_{x, sur} = \frac{GB^m}{2 \cdot \nu} \left[6,8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0,65} + 2,4 \right] \quad (3.2)$$

$$K_{yy, sur} = \frac{GB^m}{1-\nu} \left[3,73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2,4} + 0,27 \right]$$

(3.3)

Temelin gömülü olması durumu için bir düzeltme katsayısı tanımlanmıştır. Bu düzeltme katsayısı temelin geometrik parametrelerine ve gömülme derinliğine bağlı bir fonksiyondur (Denklem 3.4).

$$\eta_j = f(B/L, D/B) \quad (3.4)$$

Denklem 3.5 ve 3.6’da ötelenme ve dönme titreşimlerine karşı gelen düzeltme terimleri sırasıyla verilmiştir.

$$\eta_x = \left[1,0 + \left(0,33 + \frac{1,34}{1+(L/B)} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0,8} \right] \quad (3.5)$$

$$\eta_{yy} = \left[1,0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1,6}{0,35 + (L/B)^4} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

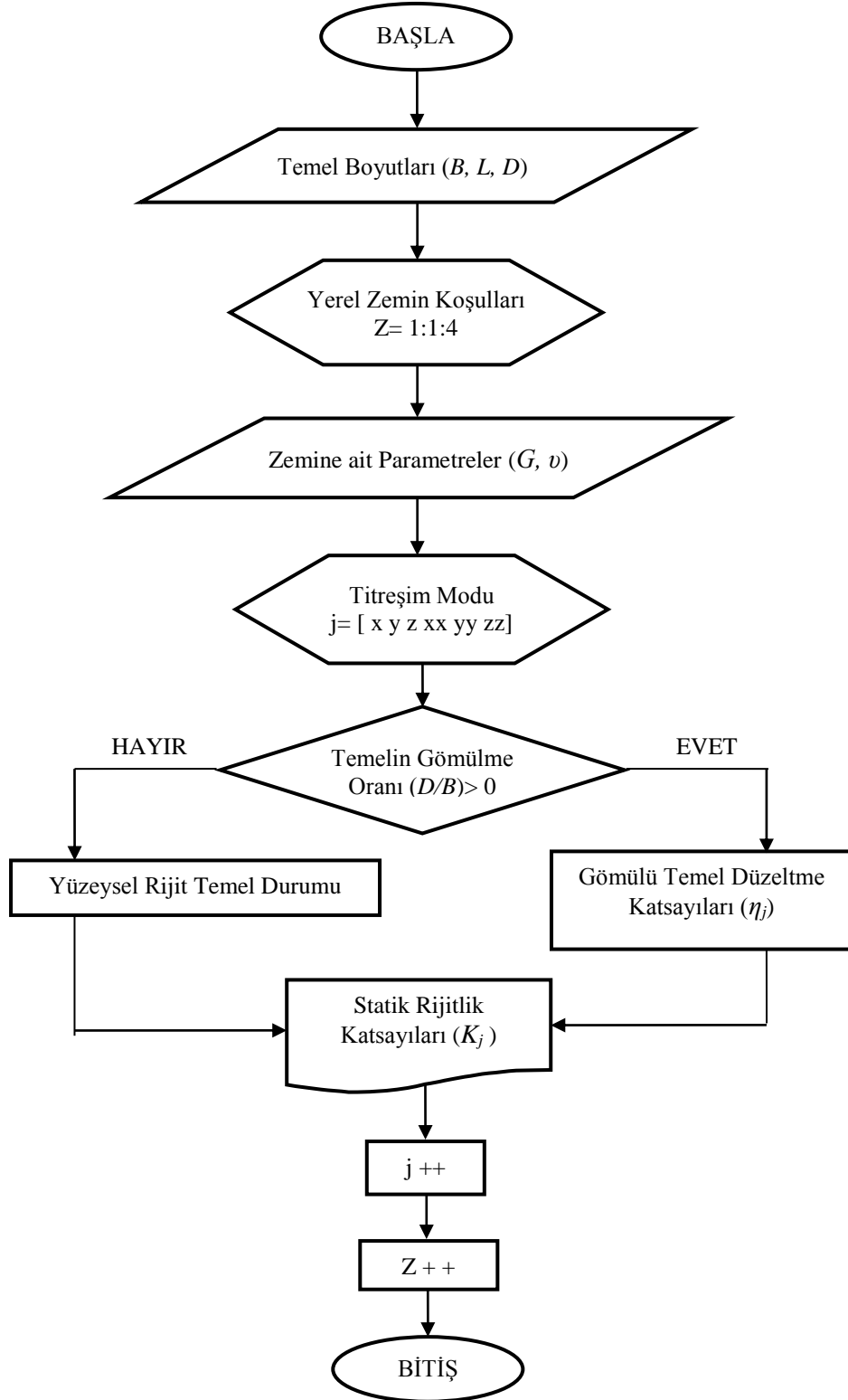
Gömülü rijit temellerde Denklem 3.7’de ötelenme statik rijitlikleri Denklem 3.8’de dönme statik rijitlik hesabı verilmiştir.

$$K_{x, emb} = K_{x, sur} \times \eta_x \quad (3.7)$$

$$K_{yy, emb} = K_{yy, sur} \times \eta_{yy} \quad (3.8)$$

Temel-zemin arakesitinin dinamik rijitliğini temsil eden empedans fonksiyonunun

statik rijitlik terimlerini elde edilmesinde MATLAB programlama dilinde kullanılmak üzere geliştirilen çözüm algoritması Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Statik rijitlik katsayılarını hesaplayan akış şeması

Statik rijitlik katsayılarını hesaplayan MATLAB kodu Ek A'da verilmiştir.

3.2. Yüzeysel ve Gömülü Rijit Temelerde Dinamik Rijitliklerin (k_x ve k_{yy}) Hesabı için Elde Edilen Çözüm Algoritması

Yapı temeli-zemin arakesitinde tanımlanan dinamik rijitlik (k_j); temel yarı uzunluğu (L), temel yarı genişliği (B), zemin kayma modülü (G), zemin Poisson oranı (ν) ve dinamik düzeltme katsayısı α_j 'nin bir fonksiyonudur (Denklem 3.9).

$$\alpha_j = f(B/L, a_0) \quad (3.9)$$

Statik rijitliğin dinamik düzeltme katsayısı olan α_j boyutsuz frekans parametresi a_0 'a bağlıdır (Denklem 3.10).

$$a_0 = \frac{\omega B}{V_s} \quad (3.10)$$

Denklem 3.11 ve 3.12'de ötelenme ve dönme titreşimlerine karşı gelen dinamik düzeltme terimleri sırasıyla verilmiştir.

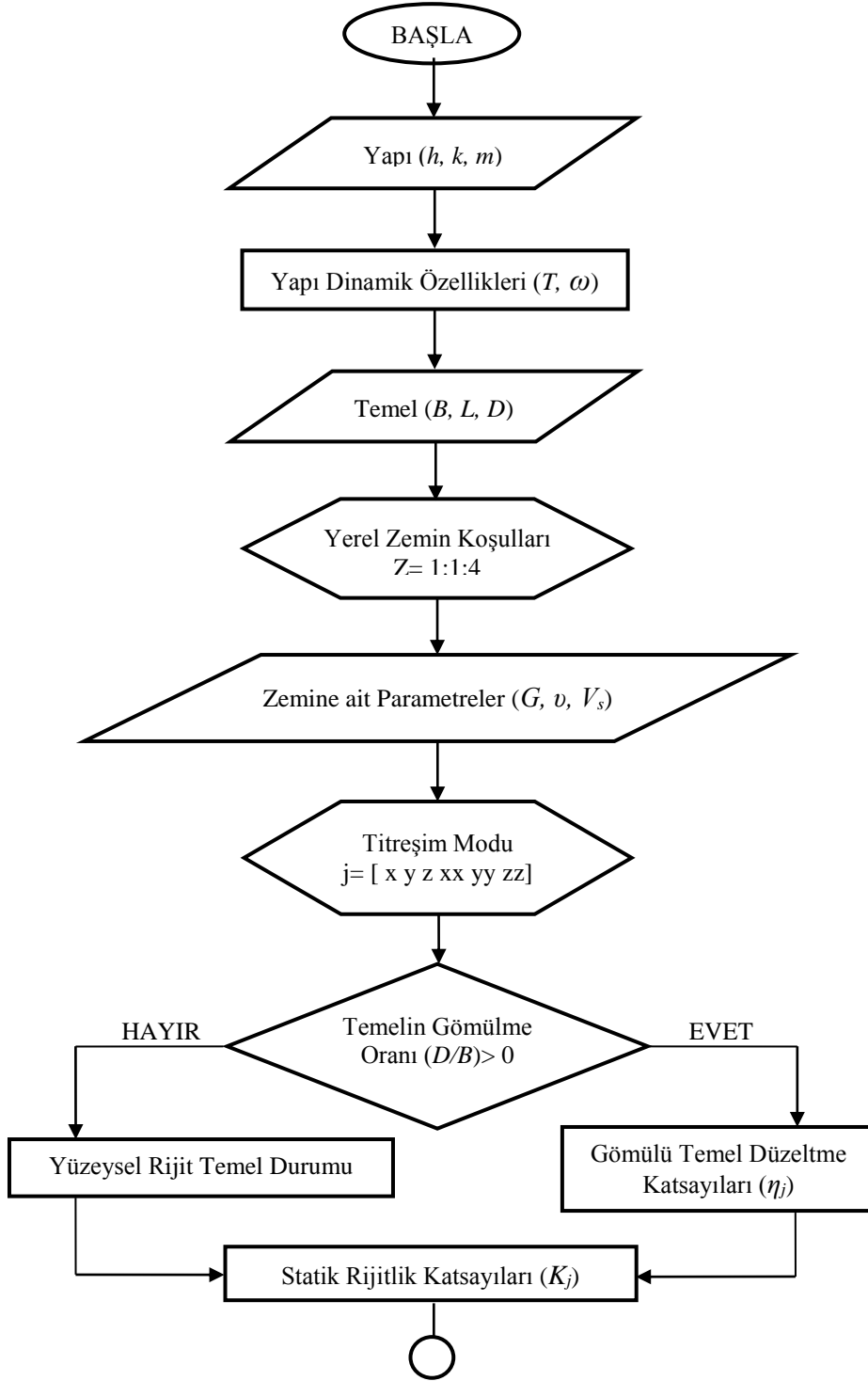
$$\alpha_x = 1,0 \quad (3.11)$$

$$\alpha_{yy} = 1,0 - \left[\frac{0,55a_0^2}{\left(0,6 + \frac{1,4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right] \quad (3.12)$$

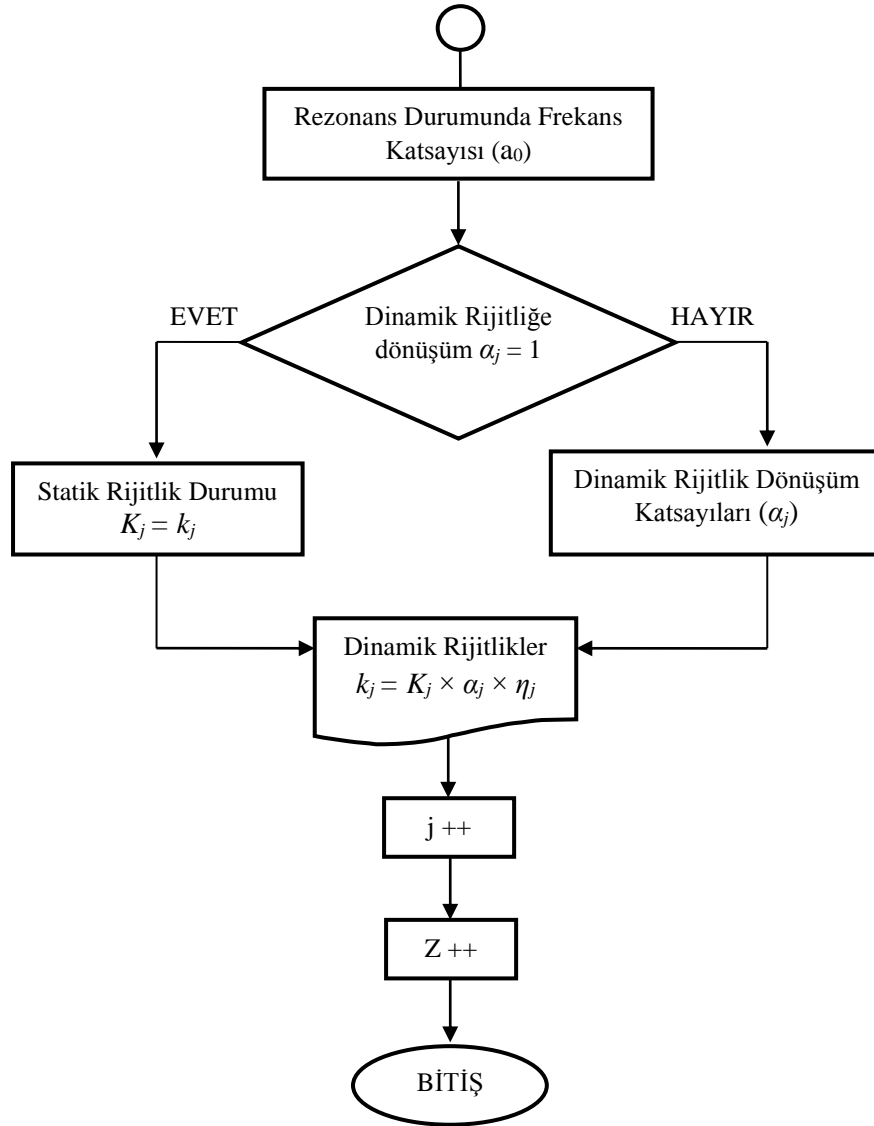
Titreşim frekansına bağlı tanımlanan dinamik rijitlik fonksiyonu, statik rijitlik (K_j), gömülü temel düzeltme (η_j) ve dinamik düzeltme (α_j) katsayılarından ibarettir (Denklem 3.13).

$$k_j = K_j \times \alpha_j \times \eta_j \quad (3.13)$$

Altsistem yöntemine dayalı geliştirilen MATLAB çözüm algoritmasında, ötelenme ve dönme titreşim hareketine karşı gelen empedans fonksiyonlarının terimlerini elde etmek için oluşturulan akış şeması Şekil 3.4.'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Empedans fonksiyonlarını hesaplayan akış şeması



Şekil 3.4. (Devamı)

Empedans fonksiyonlarını hesaplayan çözüm algoritmasının MATLAB kodu Ek B’de verilmiştir.

3.3. Yapı-Temel-Zemin Ortak Sisteminin Sönüm Oranının (β_0) Hesabı için Elde Edilen Çözüm Algoritması

Yapı-zemin dinamik etkileşimi problemlerinde, eylemsizlik etkileşiminden dolayı, geleneksel hesap yönteminde yapılan rijit temel kabulünden farklı olarak temelin

ötelenme ve dönme titreşimleri söz konusudur. Bu ötelenme ve dönme davranışından dolayı yapı-zemin sisteminin periyodunda değişimler meydana gelmektedir.

Rijitliği k ve kütlesi m olan rijit taban yapısının statik kuvvet etkisinde yaptığı yer değiştirme Denklem 3.14'de verilmiştir.

$$\Delta = \frac{F}{k} \quad (3.14)$$

Yapı dinamiğinden bilinen rijit tabanlı yapı sistemin periyodu Denklem 3.15'de verilmiştir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.15)$$

Zemin ortamının şekil değiştirmesi söz konusu olduğunda temelin dönmesi ve ötelenmesi sonucunda üst yapının toplam yer değiştirmesinin değiştiği gözlemlenir (Denklem 3.16).

$$\tilde{\Delta} = \frac{F}{k} + U_f + \theta h \quad (3.16)$$

Esnek taban yapısının periyodu Denklem 3.17'de verilmiştir.

$$\tilde{T} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k} + \frac{m}{k_x} + \frac{mh^2}{k_{yy}}} \quad (3.17)$$

Denklem 3.18, esnek taban yapısının rijit taban yapısına göre periyot oranını gösteren bir ifadedir [28].

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_x} + \frac{kh^2}{k_{yy}}} \quad (3.18)$$

Tek bir kütleli sistemin davranışına indirgenen hesap modeli için elde edilen yapı-zemin etkileşimli periyot ifadesi çok serbestlik dereceli toplu kütleli sistemler için uygulanmak istendiğinde, hakim moda karşı gelen rijitlik ve yükseklik dikkate alınmalıdır. Pratik uygulamalarda efektif modal yükseklik tüm yapı yüksekliğinin 2/3 olarak hesaplara katılmaktadır [1].

Yapı-zemin etkileşimli sistemin dinamik davranışını incelemesinde periyot uzamasını (\tilde{T}/T) kontrol eden boyutsuz anahtar parametreler aşağıda verilmiştir [88, 89]:

- a. Yapının zemine rijitlik oranı, $\frac{h}{V_s T}$
- b. Yapı yüksekliği-temel genişliği oranı, $\frac{h}{B}$
- c. Temel genişliğinin uzunluğuna oranı, $\frac{B}{L}$
- d. Yapı kütleliğin zemin kütleliğine oranı, $\frac{m}{\rho_s 4BLh}$
- e. Zemin poisson oranı, ν
- f. Dış yükün frekans içeriği

$\frac{h}{V_s T}$ oranı zemin koşullarının yapının davranışı üzerinde etkisi hakkında fikir veren bir gösterge parametresidir. Bu parametre arttıkça önem kazanır ve yaklaşık olarak 0.05 ile 0,1 veya daha büyük değerler için önemlidir [59, 90, 91]. Yapı kütleliğin zemin kütleliğine oranının etkisi küçüktür ve bu oran ($\frac{m}{\rho_s 4BLh}$) 0,1-0,2 arasında alınmaktadır [91].

Çözüm akışında, temel dinamik rijitliği (k_j), statik rijitlik (K_j), dinamik rijitlik düzeltme katsayısı (α_j), gömülü düzeltme katsayısı (η_j) ve rezonans durumunda frekans katsayısına (a_0) ait parametreler Bölüm 3.1. ve 3.2.'de detaylı olarak ifade edilmiştir.

Denklem 3.19 ve 3.20’de verilen ötelenme ve dönme fiktif titreşim periyotlarıdır.

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}} \quad (3.19)$$

$$T_{yy} = 2\pi \sqrt{\frac{mh^2}{k_{yy}}} \quad (3.20)$$

Yapıyı titreştiren enerjinin zeminin sonsuzluğu nedeniyle kaybolmasını tanımlayan β_x ve β_{yy} x doğrultusundaki ötelenme y ekseninde dönme sonucunda oluşan geometrik (radyasyon) sönümleridir [92].

Zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen fiktif zemin sönümü (geometrik sönümü) elde etmek için Denklem 3.21 ($\Psi \leq 2,5$) dikkate alınmalıdır [1].

$$\Psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)} \quad (3.21)$$

Pais ve Kausel’e göre $L \geq B$ temel boyutları için önerilen yüzeysel temel radyasyon sönümleri Denklem 3.22 ve 3.23’de gösterilmiştir [50].

$$\beta_x = \left[\frac{4\left(\frac{L}{B}\right)}{\frac{K_{x,sur}}{GB}} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right] \quad (3.22)$$

$$\beta_{yy} = \left[\frac{\left(\frac{4\Psi}{3}\right)\left(\frac{L}{B}\right)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1,8}{1+1,75\left(\frac{L}{B}-1\right)}\right) + a_0^2 \right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right] \quad (3.23)$$

Pais ve Kausel’e göre $L \geq B$ temel boyutları için önerilen gömülü temel radyasyon sönümleri Denklem 3.24 ve 3.25’de belirtilmiştir [50].

$$\beta_x = \left[\frac{4 \left(\frac{L}{B} + \left(\frac{D}{B} \right) (\psi + L/B) \right)}{(K_{x,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right] \quad (3.24)$$

$$\beta_{yy} = \left[\frac{\left(\frac{4}{3} \right) \left[\left(\frac{L}{B} \right)^3 \left(\frac{D}{B} \right) + \psi \left(\frac{D}{B} \right)^3 \left(\frac{L}{B} \right) + \left(\frac{D}{B} \right)^3 + 3 \left(\frac{D}{B} \right) \left(\frac{L}{B} \right)^2 + \psi \left(\frac{L}{B} \right)^3 \right] a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3} \right) \left[\left(\frac{1,8}{1+1,75 \left(\frac{L}{B} - 1 \right)} \right) + a_0^2 \right]} + \frac{\left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{L}{B} + \psi \right) \left(\frac{D}{B} \right)^3}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3} \right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right] \quad (3.25)$$

Dış yük etkisindeki esnek tabanlı bir yapıda artan periyot oranına ek olarak temel-zemin etkileşimiyle ortaya çıkan bir sönüm meydana gelir ve bu sönüme temel sönümü (β_f) adı verilmektedir (Denklem 3.26). Temel sönümü, zeminin birim şekil değiştirmesine bağlı olarak meydana gelen histerisiz (malzeme) sönüm (β_s) ve zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen fiktif zemin sönümü diğer bir adıyla geometrik sönümü (β_x ve β_{yy}) kapsamaktadır. Sayısal uygulamalarda histerisiz sönüm, iyi derecelendirilmiş zemin koşullarında 0,02 kötü derecelendirilmiş yerel zeminlerde ise 0,05 alınmıştır. Temel geometrik sönümünün doğrusal viskoz olduğu kabulüne göre Wolf'un önerisi dikkate alınarak hesaplanılmaktadır [46]. Temel sönümünde verilen n_s , n_x ve n_{yy} katsayılarının doğrusal viskoz yapı sönümü için 3 aksi durumlarda 2 alınması tavsiye edilmektedir [75].

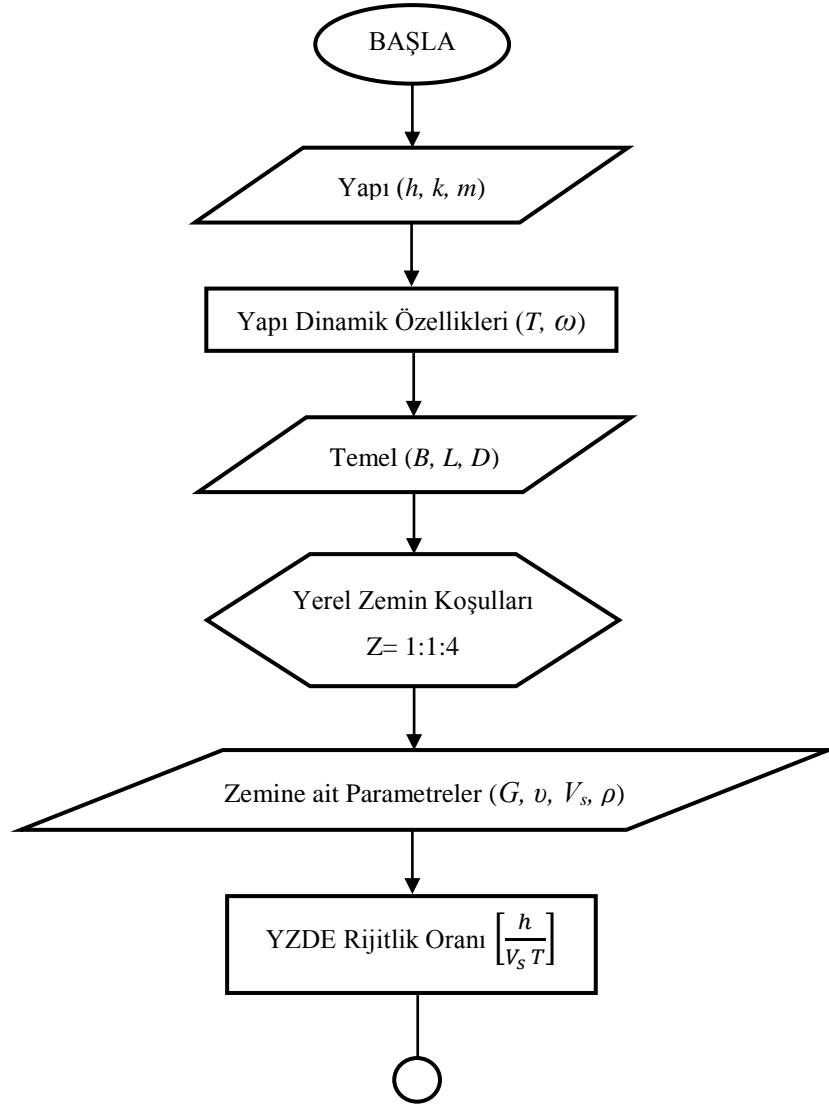
$$\beta_f = \left[\frac{\left(\frac{\bar{T}}{T} \right)^{n_s} - 1}{\left(\frac{\bar{T}}{T} \right)^{n_s}} \right] \beta_s + \frac{1}{\left(\frac{\bar{T}}{T_x} \right)^{n_x}} \beta_x + \frac{1}{\left(\frac{\bar{T}}{T_{yy}} \right)^{n_{yy}}} \beta_{yy} \quad (3.26)$$

Temel sönümünün (β_f) yapısal sönüme eklenmesi ile birlikte elde edilen yapı-temel-zemin ortak sisteminin sönümü (β_0) Denklem 3.27'de belirtilmiştir [23].

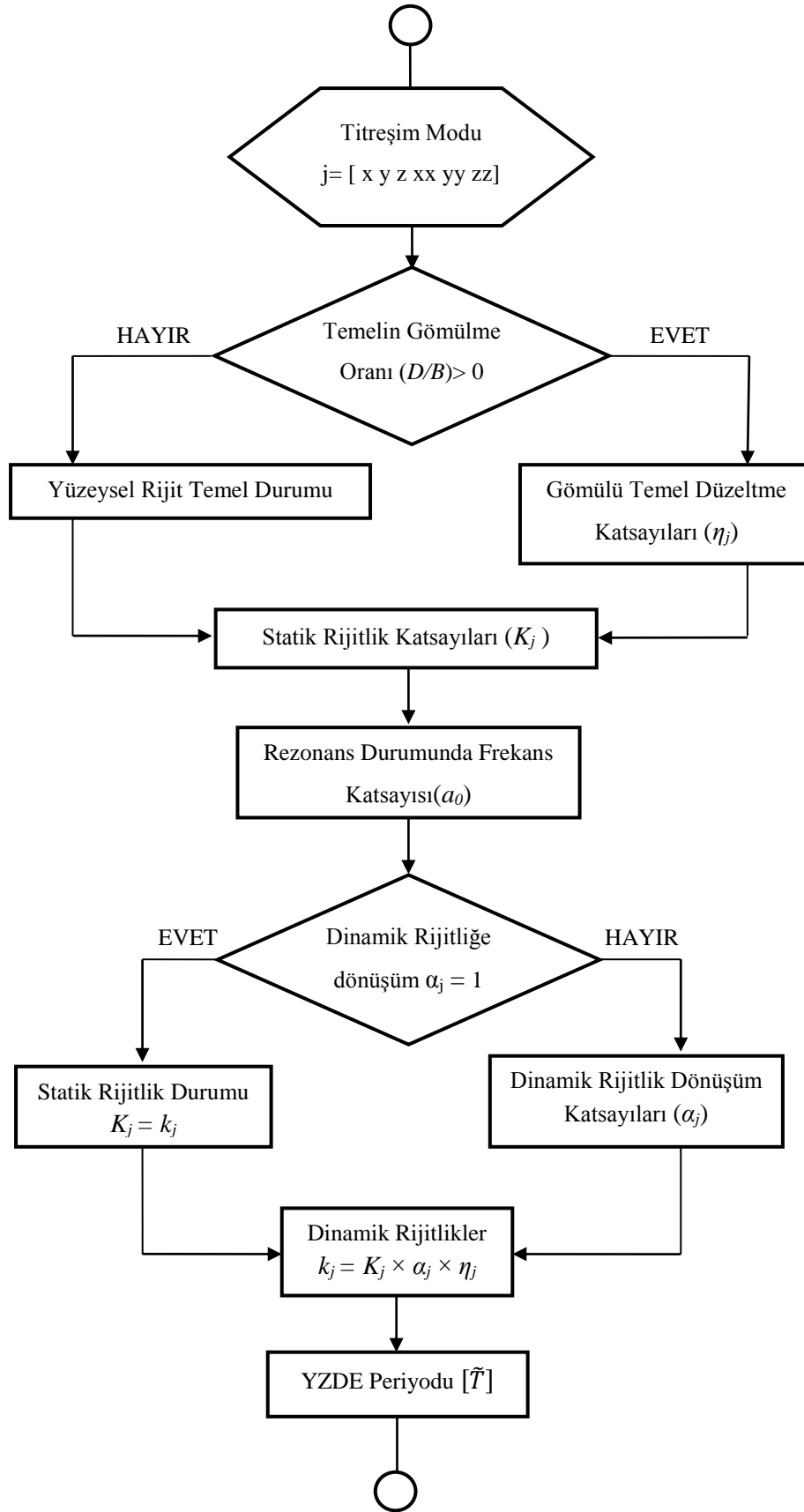
$$\beta_0 = \beta_f + \frac{1}{\left(\frac{\bar{T}}{T} \right)^n} \beta_i \quad (3.27)$$

Ayrıca, bahsi geçen denklemlerde β_i yapısal sönümü göstermektedir. Sayısal uygulamalarda bu sönüm oranı % 5 olarak dikkate alınmıştır.

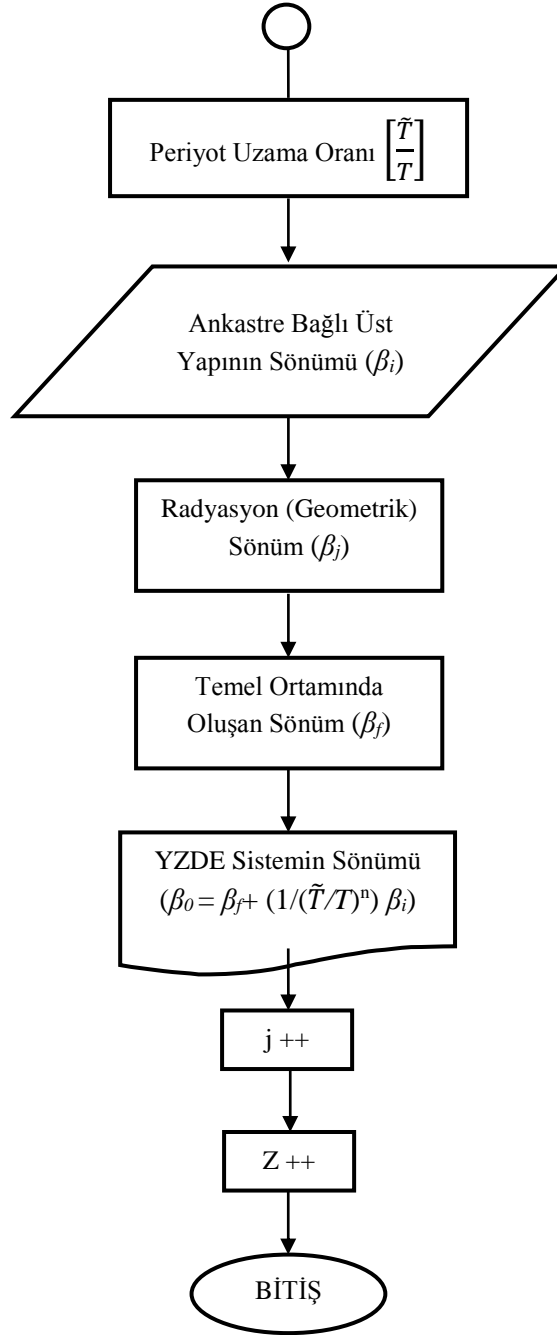
Yapı-temel-zemin ortak sistem sönümünün elde edilmesinde MATLAB yazılımı kullanılarak geliştirilen çözüm algoritması Şekil 3.5.'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Yapı-temel-zemin ortak sistemin sönümünü hesaplayan akış şeması



Şekil 3.5. (Devamı)



Şekil 3.5. (Devamı)

Akış şemalarına göre MATLAB’te daha önce yazılan kod geliştirilmiştir. Bu çözüm algoritmasına ait MATLAB kodu Ek C’de verilmiştir.

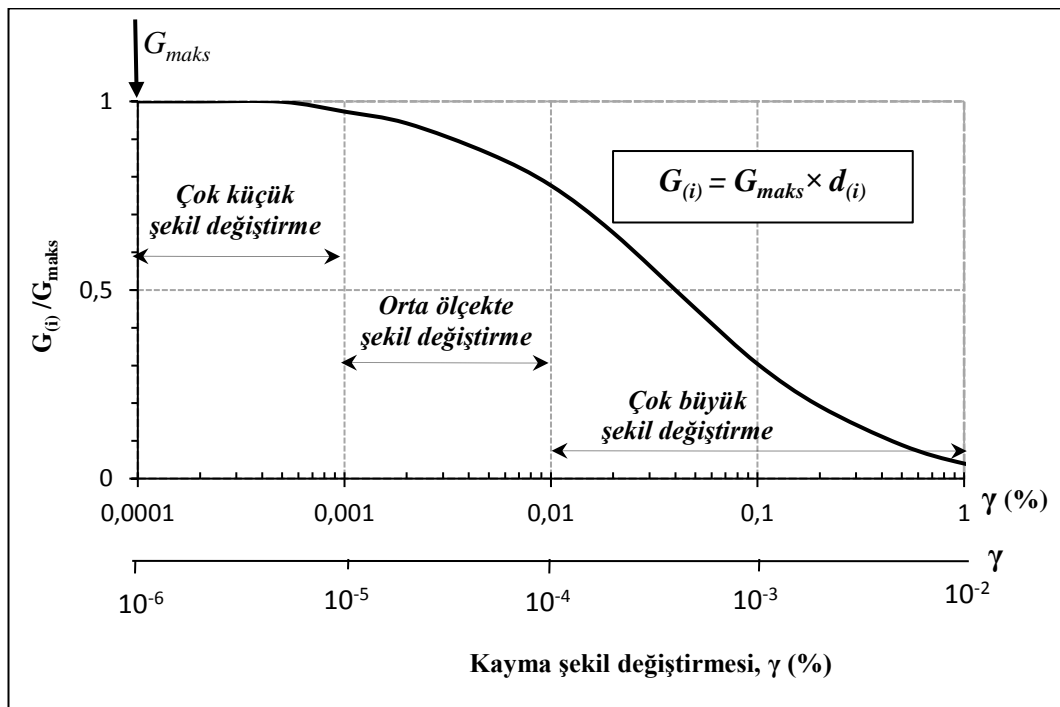
3.4. Empedans Fonksiyonların Hesabında Kayma Şekil Değiştirmesine Bağlı Kayma Rijitliğinin Değişiminin ($G_{(i)}/G_{maks}$) Dikkate Alınmasıyla Önerilen Çözüm Algoritması

Temel-zemin arakesitinin dinamik rijitliğini temsil eden empedans fonksiyonunu ve statik rijitlik terimlerinin çözüm algoritmaları daha önceki çalışmalarda temel zemin etüt raporlarından alınan maksimum kayma dalga hızına (G_{maks}) göre hesap edilmiştir. Ancak geoteknik mühendislik raporlarından alınan kayma modülü parametreleri küçük kayma şekil değiştirmelerine bağlı elde edildiği için gerçeği tam anlamıyla yansıtmamaktadır [62]. Aslında depremin talep ettiği kayma modülü daha küçük olduğu ve zeminin doğrusal olmayan davranışıyla kayma modülünün değişken olduğu anlamına gelmektedir. Böylelikle kayma şekil değiştirmesine bağlı kayma rijitliğinin değişimi, temel-zemin etkileşim problemlerinde dikkate alınmasıyla empedans fonksiyonlarının önemli derecede azalım oluştuğu görülmektedir. Kayma şekil değiştirme büyüklüğüne bağlı değişen zemin kayma modülünün, empedans fonksiyonların hesabında etkisini gösterebilmek önerilen çözüm algoritmasına ilave bir hesap modülü eklenerek yazılan MATLAB kodu geliştirilmiştir [87].

Sayısal analizlerde Kocaeli, Sakarya ve İstanbul bölgeleri için hazırlanmış temel zemin etüt raporlarından alınan zemin tabaka kalınlıkları (h_1), kayma dalga hızları (V_s), birim hacim ağırlıkları (ρ) ve plastisite indeks (PI) parametreleri kayma şekil değiştirmesine bağlı kayma modülü azalım eğrilerini elde etmek için kullanılmıştır. Kayma modülü azalım eğrisinin değişimi, SHAKE91 tabanlı EZ-FRISK programında (Seed, Idriss 1970 ve Sun et al 1988) elde edilmiştir [15, 93]. Farklı yerel zemin koşulları için elde edilen kayma rijitliğinin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalım eğrisini MATLAB programında yazılan kodda tanımlatabilmek, ancak söz konusu eğrinin kayma şekil değiştirme referans aralıklarına göre parçalı doğrusallaştırılmasıyla mümkün olmuştur. Kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır. Kayma şekil değiştirmesinin referans aralığına (logaritmik) göre lineerleştirilen azalım eğrisinden elde edilen denklemler (Denklem 3.28) basit bir çözüm algoritması içerisinde plastisite indeksine göre farklılık gösteren zemin durumları için MATLAB kodu oluşturulmuştur.

$$d_{(i)} = (G_{(i)} / G_{maks})_{deneysel} \quad (3.28)$$

Kayma modülü oranı zeminin çok küçük birim şekil değiştirme aralığında önemli derecede değişmezken ($\gamma > \% 10^{-4}$), artan birim şekil değiştirme değerleriyle birlikte ciddi derecede azaldığı Şekil 3.6.'da verilen eğrilerden açık bir şekilde anlaşılmaktadır [103].



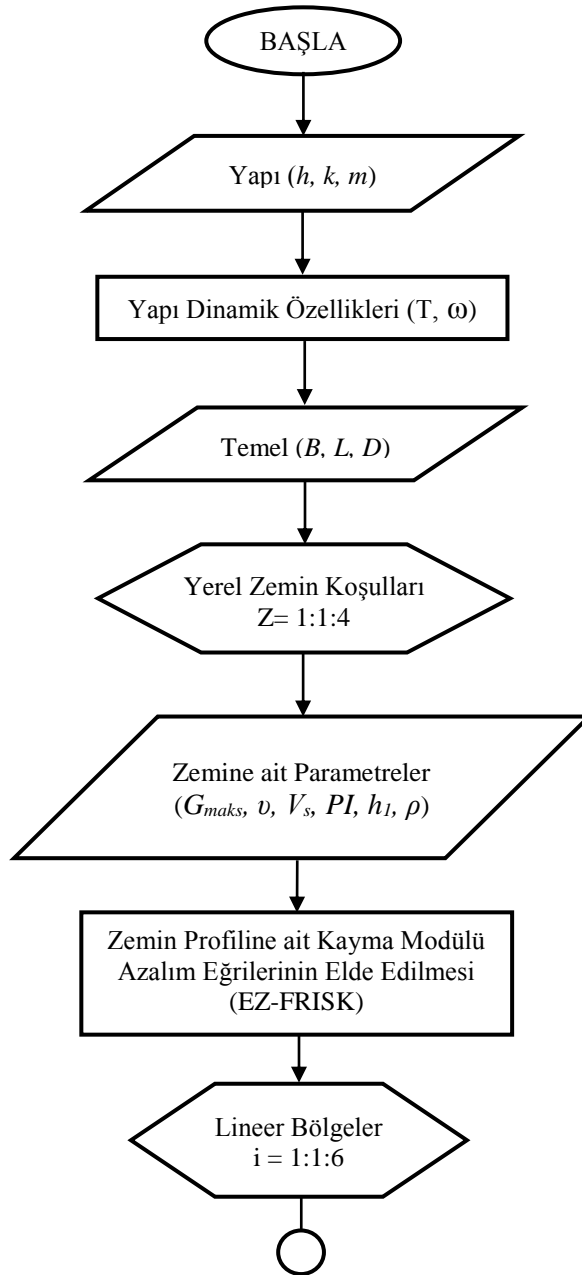
Şekil 3.6. Doğrusal olmayan zemin davranışını temsil eden kayma modülü azalım eğrisi

Depremi talep ettiği kayma şekil değiştirmesi tahmin edilerek hesaplanacak olan zemin kayma rijitliği göz önünde bulundurularak empedans fonksiyonları yapı-zemin etkileşim probleminde kullanılmalıdır. Şekil 3.6'da gösterilen kayma rijitliği azalım eğrisi çok büyük şekil değiştirme aralığında ötelenme ve dönme titreşim modları için tanımlanan empedans fonksiyonlarını önemli derecede etkileyecektir.

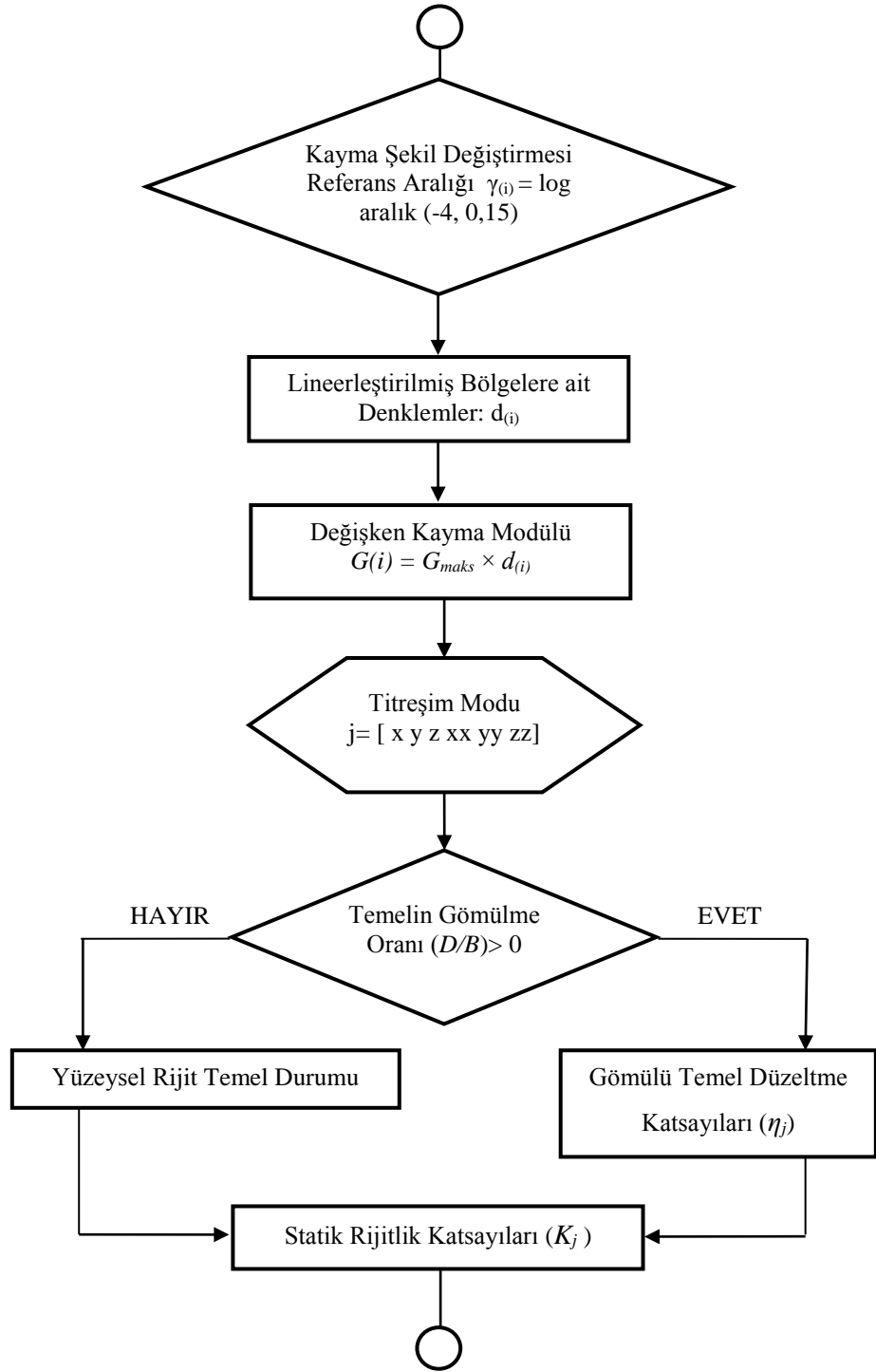
MATLAB programında yazılan kodda elde edilen sonuçlar ile SHAKE91 tabanlı EZ-FRISK programında elde edilen sonuçlar arasında fark edilebilir bir değişiklik görülmediği ve bu doğrultuda hiçbir teknik hatanın olmadığı da söz konusudur. Kayma modülü azalım eğrisinin değişimi statik ve dinamik rijitliklerin hesabına

katılarak empedans fonksiyonlarının yapı-temel-zemin etkileşimi probleminde daha gerçekçi bir şekilde kullanımı sağlanmıştır.

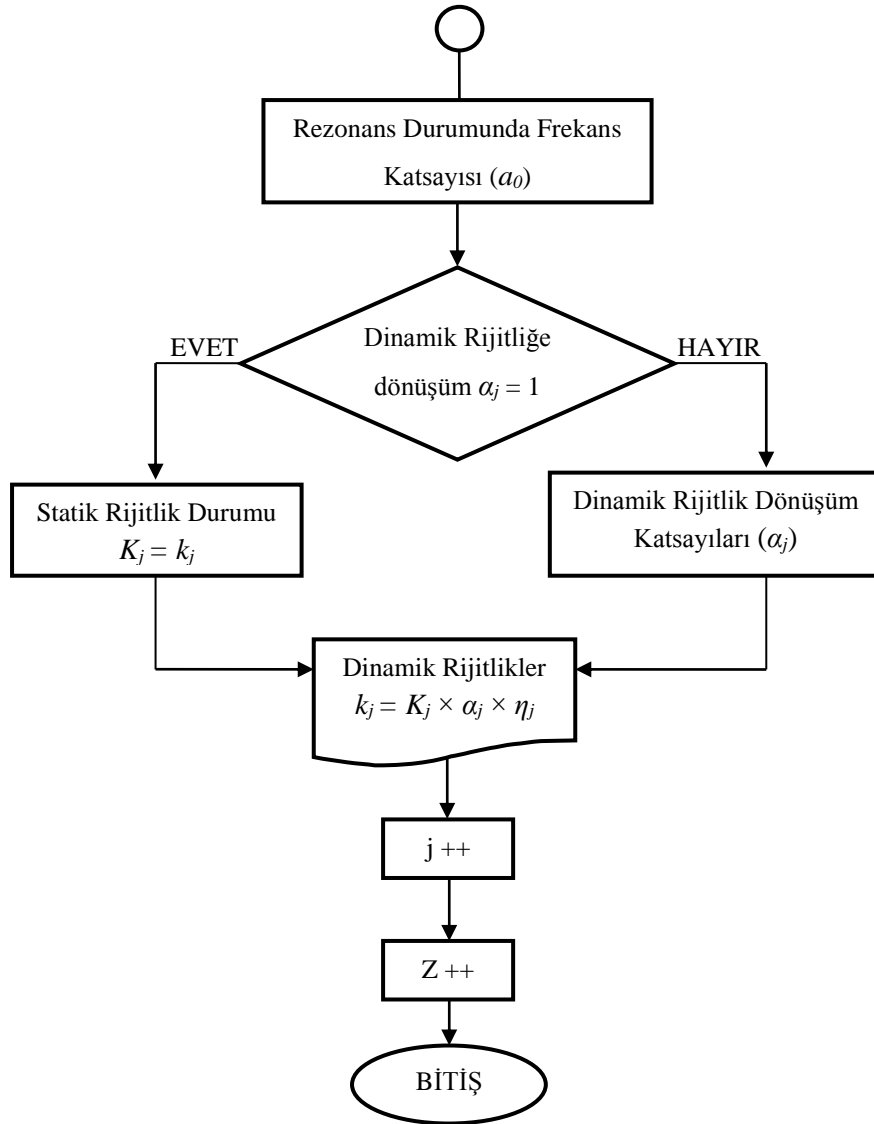
Kayma şekil değiştirmelerine bağlı değişen zemin dinamik kayma modülünün empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi çözüm algoritmasına dahil edilerek yazılan MATLAB kodu Ek D’de verilerek önerilen çözüm akış şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Zemin kayma modülünün değişimine bağlı empedans fonksiyonlarının elde edilmesini gösteren akış şeması



Şekil 3.7. (Devamı)



Şekil 3.7. (Devamı)

BÖLÜM 4. SAYISAL UYGULAMALAR

Tezin bu bölümünde deprem yer hareketiyle titreşime zorlanan yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşimini ve özellikle farklı zemin koşullarının üstyapıların ve temellerinin sismik davranışı üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için örnek köprü ayağına ve binaya ait temel-zemin etkileşim modeli üzerinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Sayısal analizleri gerçekleştirebilmek için inşaat mühendislerinin pratik mühendislik hayatlarına katkı sağlayacak altsistem yaklaşımında empedans fonksiyonlarının kullanımına dayalı bir çözüm algoritması MATLAB programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Köprü ayağı ve bina temellerine ait örnek modellerin zeminle etkileşimleri geometrik ve geoteknik yönetici parametrelere bağlı incelenerek elde edilen sayısal sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil değiştirebilen zeminlerde kurulu yapıların depreme dayanıklı tasarımında kullanılan hesap modelleri için ihtiyaç duyulan geoteknik veriler zemin etüt raporlarından alınmaktadır. Zeminin kayma rijitliğini temsil eden kayma modülü laboratuvar koşullarında küçük kayma şekil değiştirmelerine bağlı elde edildiğinden dolayı olası depremin talep ettiği kayma şekil değiştirmesine karşı gelen azaltılmış kayma modülü analiz sürecine tam anlamıyla katılamamakta ve empedans fonksiyonlarında kullanılan dinamik rijitlik terimlerine bağlı çözümlerden elde edilen sonuçlar tam olarak gerçeği yansıtmamaktadır. Olası şiddetli depremlerin yerel zemin koşullarında zemin sınıfına bağlı olarak oluşturacağı kayma şekil değiştirmelerinin büyük olması zeminin kayma rijitliğini önemli derecede azaltacaktır. Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin altsistem yaklaşımıyla çözümünde temel-zemin arakesitinde kullanılan empedans fonksiyonlarının azaltılmış rijitlik terimlerine bağlı ifade edilerek çözüm algoritmasına katılması bu

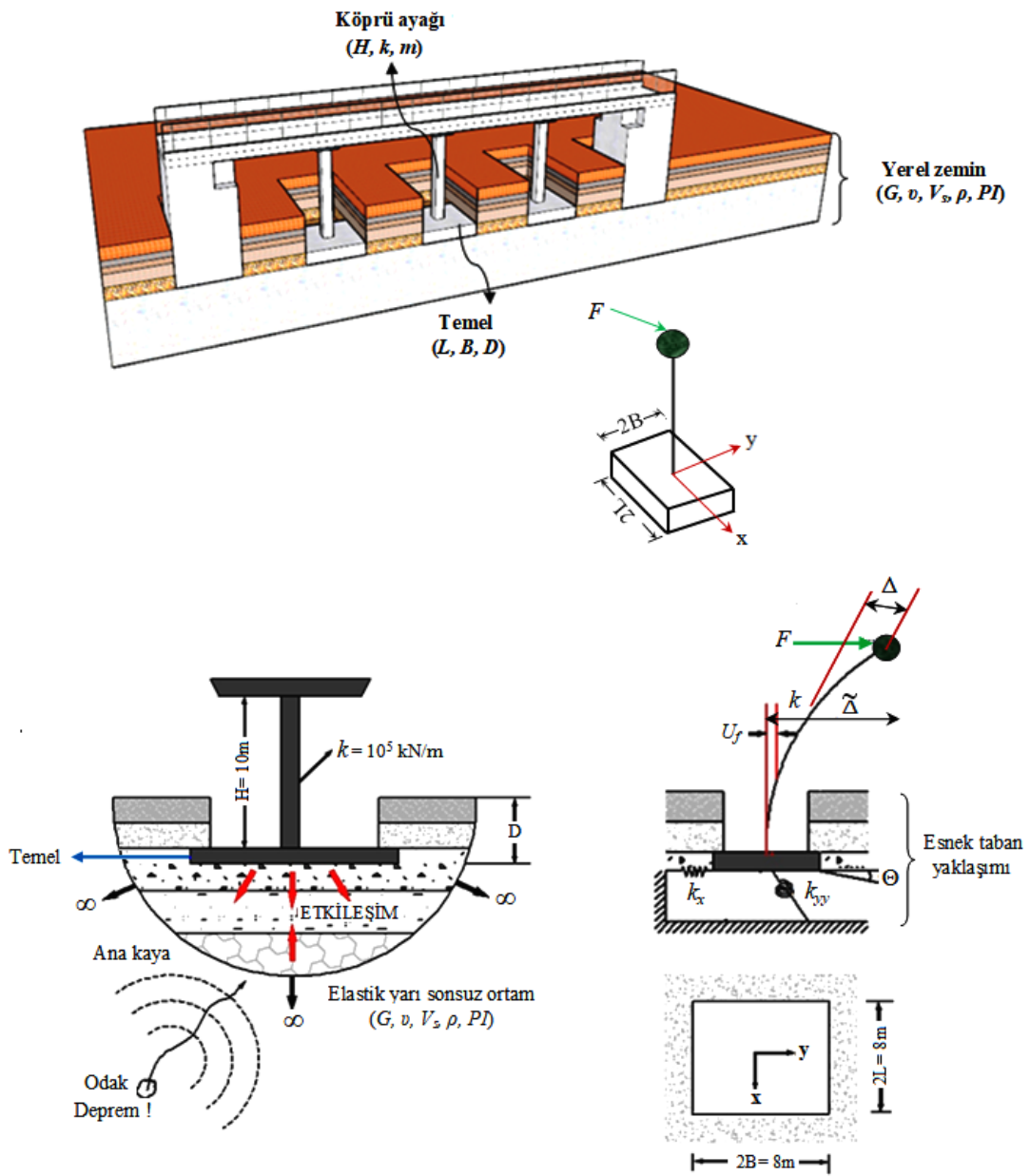
çalışmanın katma değerini artırmıştır. Örnek yapı temellerinin oturduğu zeminle etkileşimi, kayma rijitliği azalım eğrilerine ve gömülme derinliğine bağlı değerlendirilmiştir.

4.1. Örnek Köprü Ayağına Ait Temel-Zemin Etkileşim Modelinin Kurulması

Sismik yüklere maruz kalan yapı, temel çevresindeki zeminin deformasyonundan etkilenerek dinamik özellikleri değişmektedir. Deprem yönetmeliğinde verilen zemin gruplarına göre tanımlanmış yerel zemin sınıflarına uygun zeminler İzmit/Kocaeli bölgesinden seçilerek, köprü ayağının farklı deprem yer hareketleri altındaki titreşim davranışı empedans fonksiyonlarına bağlı geliştirilen çözüm algoritması kapsamında incelenmiştir. Ayrıca köprü ayağı modelinde farklı plastisite indisine sahip sert ve yumuşak kil olarak tanımlanan zeminler Sakarya bölgesinden seçilerek yapı-zemin etkileşim probleminde geometrik sönüm etkisinin önemi vurgulanmaktadır. Yapı temelini oturduğu farklı özellikli zeminler için statik ($a_0=0$) ve dinamik empedans fonksiyonları arazi deneylerinden elde edilen zemin kayma modülüne göre elde edilerek yorumlanmıştır. Dinamik empedans fonksiyonları boyutsuz frekans parametresine bağlı $0 \leq a_0 \leq 3$ aralığında dikkate alınmıştır. Kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen zemin kayma modülünün empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi MATLAB programında yazılan kodun çözüm algoritmasına dahil edilmiştir. Geliştirilen bu algoritmayla yapı-temel-zemin etkileşimi farklı yerel zemin koşullarına ait kayma modülü azalım eğrilerine göre incelenmiştir.

Üst yapı açısından tek serbestlik dereceli sistem olarak sayısal uygulamada değerlendirilen betonarme köprü ayağı modelinin zeminle etkileşimi altsistem yaklaşımı içerisinde empedans fonksiyonlarına bağlı analiz edilmiştir (Şekil 4.1.). Temelin gömülme oranına (D/B) bağlı değişen dinamik rijitlik, x doğrultusundaki ötelenme (k_x) ve y ekseninde dönme (k_{yy}) modlarını kapsamaktadır. Üst yapıyı temsil eden köprü ayağı; yapı yüksekliği (H), yapı kütlesi (m) ve yanal ötelenme rijitliği (k) parametrelerine bağlı ele alınmaktadır. Örnek köprü ayağına ait kare temelin geometrik boyutları sırasıyla temel yarı genişliği (B) ve temel yarı uzunluğu (L) olarak ifade edilir. Zemin tepki analizi çalışmalarında yerel zemin; lineer elastik,

homojen, izotrop, ve yarı sonsuz bir ortam olarak kabul edilmiştir. Rijit kütleli temel plağının oturduğu zeminin dikkate alınan özellikleri; kayma modülü (G), Poisson oranı (ν), kayma dalga hızı (V_s), birim hacim ağırlığı (ρ) ve plastisite indisi (PI) parametrelerini kapsamaktadır. Ana kayada meydana gelen deprem hareketi zayıf zeminin büyütme etkisiyle yayılarak temel plağının ötelenmesine (U_f) ve dönmesine (θ) neden olur. Bu etki üst yapıda kendi şekil değiştirmesine (Δ) bağlı ötelenmenin yanında ilave ötelenme ($\theta h + U_f + \Delta = \tilde{\Delta}$) oluşturur.



Şekil 4.1. Örnek köprü ayağı modelinde yapı-temel-zemin ortak sisteminin genel yapısı

Sayısal uygulamalarda kullanılan betonarme köprü ayağı modeline ait mekanik ve geometrik özellikler Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Köprü yapısıyla ilgili mekanik ve geometrik parametreler

Parametre	Sembol	Birim	Büyükük
Yapısal ağırlık	W	kN	500
Yanal ötelenme rijitliği	k	kN/m	100000
Yapının yüksekliği	H	m	10
Temel genişliğinin yarısı	B	m	4
Temel uzunluğunun yarısı	L	m	4
Zemine rijit bağlı sistemin periyodu	T	s	0,14
Açısal frekans	ω	rad/s	44,74

4.1.1. Köprü ayağı modelinin İzmit bölgesinden seçilen dört farklı zemin türüne göre dinamik analizi

Yerel zemin koşullarının yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin hesaba katıldığı bu sayısal uygulamada altsistem yaklaşımı kullanılarak geliştirilen köprü ayağı modeli için ihtiyaç duyulan geoteknik mühendislik parametreleri (Şekil 4.2.) zemin etüt raporundan alınmıştır [94].



Şekil 4.2. İzmit/ Kocaeli bölgesi yer bulduru haritası (Rapor, 2013)

Sayısal analizlerde Türkiye Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan zemin sınıfları da dikkate alınarak kum ve killi zeminlerin farklı türlerine ait parametreler (Tablo 4.2.) kullanılmıştır.

Tablo 4.2. İzmit/ Kocaeli bölgesinden seçilen zemin ortamının özellikleri

Zemin Grubu	Zemin Türü	Yerel zemin sınıfı	ρ [kN/m ³]	G [kN/m ²]	V_s [m/s]	ν	PI [%]	h_1 [m]
A	Çok sıkı kum	Z1	18,7	950100	713	0,31	-	6
D	Gevşek kum	Z3	13,9	16800	110	0,459	-	4,5
A	Sert kil	Z1	18,7	942600	710	0,31	26	3
D	Yumuşak kil	Z3	16,4	11800	85	0,41	7	2

4.1.1.1. Kum ve killi zeminlerin farklı türlerinde temel gömülme derinliğinin periyot değişimine (\tilde{T}/T) etkisi

Yapı-zemin dinamik etkileşimi problemlerinde eylemsizlik etkileşiminden dolayı, geleneksel hesap yönteminde yapılan rijit temel kabulünden farklı olarak temelin ötelenmesi ve dönmesi söz konusudur. Bu ötelenme ve dönme hareketi sonucunda yapı sisteminin periyodunda değişimler meydana gelmektedir. Köprü ayağı temelinin oturduğu zeminin dört farklı durumu dikkate alınarak temelin gömülme derinliğine bağlı değişen empedans fonksiyonların etkisi sayısal analizlerde incelenmiştir. İyi derecelendirilmiş çok sıkı kum ve sert kil zeminlere (Z1) oturan yapı-temel sisteminin titreşim davranışı ile kötü derecelendirilmiş gevşek kumlu ve yumuşak killi zeminlere (Z3) oturan yapının titreşim davranışı karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Örnek köprü ayağının zeminle etkileşimli periyodunun (\tilde{T}) zemine rijit bağlı sistemin periyoduna (T) oranı (\tilde{T}/T) temelinin gömülme derinliğine bağlı elde edilmiştir. Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminde ifade edilen periyot uzaması oranının (\tilde{T}/T) kum ve killi zeminin farklı gruplarında temel gömülme derinliğine bağlı değişimi Bölüm 3.3'de gösterilen akış şemasına göre MATLAB'te yazılan kod ile elde edilen sonuçlar değerlendirilerek Tablo 4.3.'de sunulmuştur.

Tablo 4.3. Kum ve killi zeminin farklı gruplarında temel gömülme derinliğinin periyot değişimine etkisi

Zemin grubu	Yerel zemin sınıfı	Periyot uzama oranları [\tilde{T}/T]		
		Temelin gömülme oranı		
		D/B=0	D/B=0,25	D/B=0,5
Çok sıkı kum (A)	Z1	1,016	1,012	1,009
Gevşek kum (D)	Z3	1,755	1,603	1,475
Sert kil (A)	Z1	1,016	1,012	1,009
Yumuşak kil (D)	Z3	2,124	1,91	1,727

Çok sıkı kum ve sert kilden oluşan zeminlere oturan temellerin serbest titreşim hareketine temelin gömülme derinliğinin etkisi olmadığı açıkça görülmektedir. Deprem yönetmeliği tarafından gevşek kum ve yumuşak kil olarak tanımlanan D grubu zeminlere oturan söz konusu yapının serbest titreşim hareketi temel-zemin etkileşiminden dolayı önemli derecede değişmiştir. Temelin gömülme oranının artması gevşek kumlu zeminlerde % 19, yumuşak killi zeminlerde % 23 etkileşimli periyodu azaltmıştır.

4.1.1.2. Farklı yerel zemin koşullarının ve temel gömülme derinliğinin yapı-temel-zemin ortak sisteminin sönümüne (β_0) etkisi

Yapı-zemin ortak sisteminin sönümü (β_0), üst yapının sönümüyle temel ortamının sönümünden ibarettir. Parametrik analizler deprem yönetmeliğine uygun tanımlanan farklı zemin sınıfları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Köprü ayağının dinamik davranışı gömülme derinliğine bağlı olarak altsistem yaklaşımıyla incelenmiştir. Çözüm algoritmasına ait MATLAB kodu (Ek C) ile yapı-zemin ortak sisteminin sönüm değeri elde edilerek Tablo 4.4.'de sunulmuştur.

Tablo 4.4. Zemin koşullarının ve temel gömülme derinliğinin yapı-temel-zemin ortak sistemin sönümüne etkisi

Zemin grubu	Yerel zemin sınıfı	β_0 [%]		
		Temelin gömülme oranı		
		D/B=0	D/B=0,25	D/B=0,5
Çok sıkı kum (A)	Z1	0,0495	0,0497	0,05
Gevşek kum (D)	Z3	0,283	0,294	0,307
Sert kil (A)	Z1	0,0495	0,0497	0,05
Yumuşak kil (D)	Z3	0,522	0,551	0,579

Gömülme derinliğinin sistem sönümü üzerindeki etkisi, iyi derecelendirilmiş Z1 zemin grubunda sınıflandırılan çok sıkı kum ve sert kil için çok fazla olmamıştır. Fakat Z3 zemin grubu için öngörülen gevşek ve yumuşak killi zeminde gömülme derinliği önemli derecede sistemin sönüm değerini etkilemiştir. Bu değişim gevşek kumlu zemin için gömülme derinliği yaklaşık olarak % 8-10 civarında sistemin sönümünü arttırmaktadır. Yumuşak kil zemin için ise gömülme derinliği yaklaşık olarak %10-12 civarında sönüm değerini arttırmaktadır. Ayrıca zemin türünün yumuşak kil olması durumu gevşek kumla karşılaştırıldığında, killi zeminde yapı zemin etkileşimli sönüm etkisi daha fazla olduğu görülmektedir.

4.1.1.3. Temel gömülme derinliğinin zayıf zemin koşulları için seçilmiş depremlere ait ivme davranış spektrum eğrileri üzerindeki etkisi

Belirli bir deprem hareketi altındaki tek serbestlik dereceli yapılara ait maksimum deplasmanların sönüm oranı ve doğal periyoda bağlı olarak gösterimine yerdeğiştirme davranış spektrumu adı verilir. Elde edilen bu spektral deplasman değerleri açısız frekansın karesi (ω^2) ile genişletilerek spektral ivme değerlerine (Denklem 4.1) dönüştürülür.

$$S_a = \omega^2 S_d \quad (4.1)$$

Yer hareketinden dolayı yapıda meydana gelecek kesme kuvveti (Denklem 4.2), davranış spektrumunda yapı periyoduna karşılık gelen spektral ivme değerine bağlı olarak elde edilmektedir.

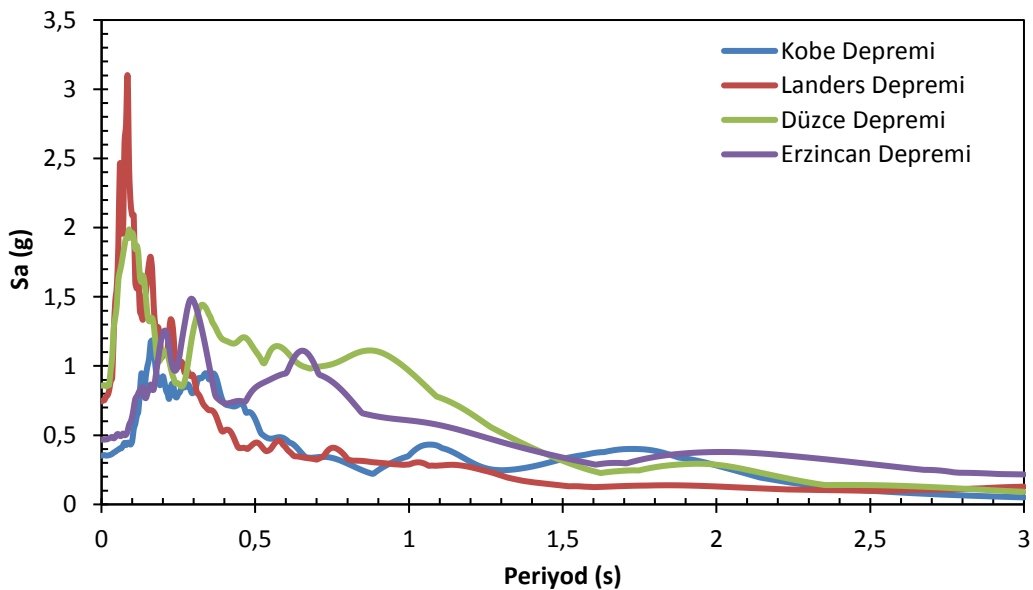
$$F = m S_a \quad (4.2)$$

Yapı temellerinin rijit ve zemine ankastre olarak bağlı kabul edildiği geleneksel hesap yönteminde, yapıya etki eden deprem yükleri, yapısal sönüm oranına bağlı olarak çizilen davranış spektrumları üzerinden elde edilir. Bu hesap yönteminde, zemin koşullarının sistemin sönüm oranı ve periyodu üzerindeki etkileri dikkate alınmaz. Ancak bu yaklaşım büyük ölçekli masif yapıların deprem yükleri altında

dinamik davranışını incelerken eksik kalmaktadır. Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin sistemin dinamik parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Zemin koşullarının ve temel gömülme durumunun söz konusu sistemin periyoduna ve sönümüne etkisi gösterilmiştir.

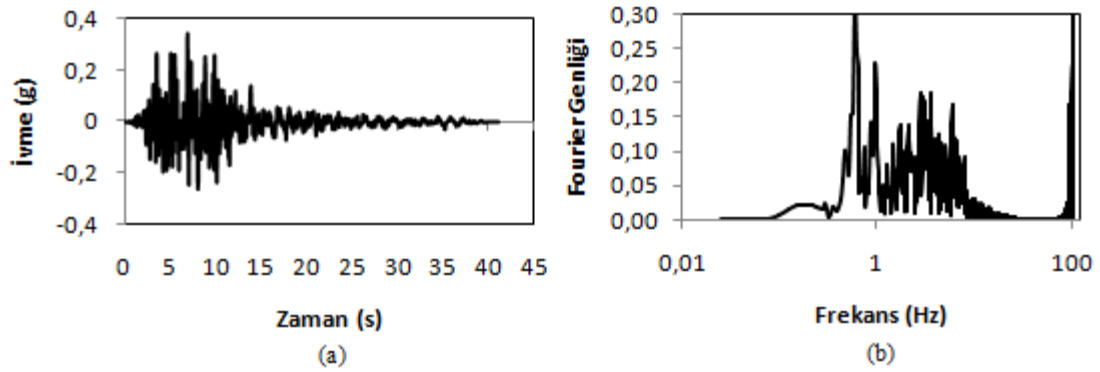
Bu kapsamda, deprem yer hareketine maruz köprü ayağı modeli örnek olarak seçilmiştir. Köprü ayağı temelinin yüzeysel ve gömülü oluşuna göre serbest titreşim ve zorlanmış titreşim hareketi esnek taban kabulü altında incelenmiştir. Seçilen dört farklı depremin ivme spektrum eğrileri değişen dinamik parametrelere bağlı SeismoSignal programıyla tekrar elde edilmiştir [95]. Rijit taban kabulü yapılarak elde edilen spektral ivme değerleri, esnek taban kabulü yapılarak elde edilen spektral ivme değerleri ile karşılaştırılıp grafik halinde değerlendirilmiştir.

Geçmişteki örneklere bakılarak yerel zemin koşullarının deprem davranış spektrum eğrileri üzerindeki etkisini değişen sönüm oranına bağlı olarak göstermek için yer hareketine önemli bir etkisi olan ivme verilerinin daha büyük olduğu 4 farklı deprem kaydı seçilmiştir [96]. Yapılan çalışmalarda Kobe (1995), Landers (1992), Düzce (1999) ve Erzincan (1992) depremlerine ait % 5 sönüme karşı gelen ivme davranış spektrum eğrileri Şekil 4.3.'de gösterilmiştir.



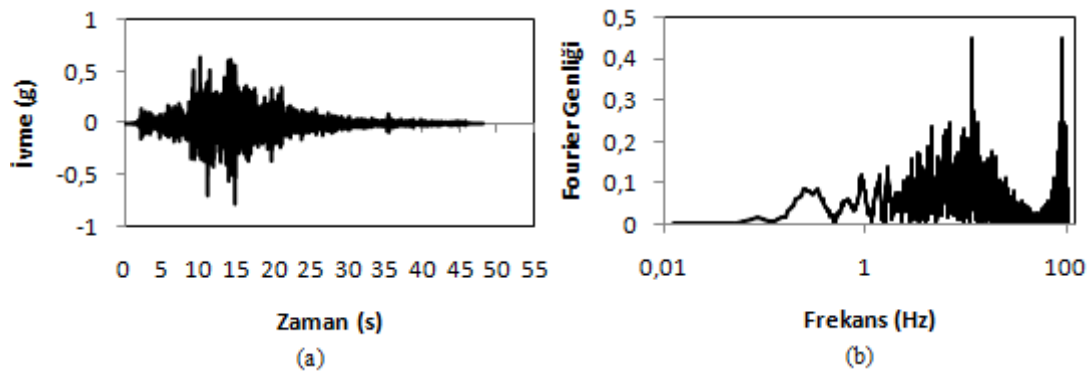
Şekil 4.3. Çeşitli depremlere ait % 5 sönüme karşı gelen ivme davranış spektrum eğrileri

Genelde bir deprem ülkesi olarak bilinen Japonya'nın Kobe kentinde 16 Ocak 1995 tarihinde $M_w= 6,9$ büyüklüğünde meydana gelen deprem sayısal analizlerde Kakogawa istasyonundan alınan Kobe deprem kayıtlarına göre maksimum ivme değeri (PGA) 0,345 g olarak tespit edilmiştir. Seçilen Kobe depremine ait ivme-zaman ve Fourier genliği-zaman grafikleri Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.



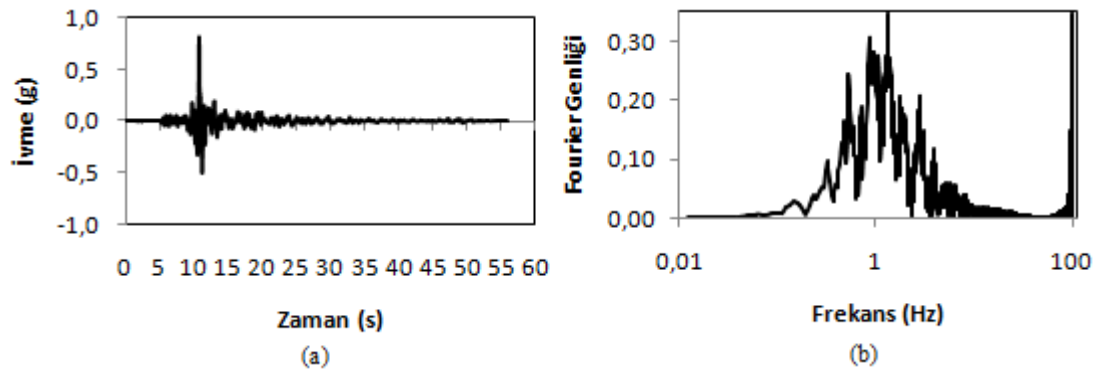
Şekil 4.4. Kobe (1995) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu

Sayısal analizlerde ele alınan Landers depremi, ABD'nin batı yakasında yer alan ve ülkenin en kalabalık eyaleti olan Kalifornia'da 28 Haziran 1992 tarihinde $M_w= 7,3$ büyüklüğünde meydana gelmiştir. Landers deprem kayıtlarına göre maksimum ivme değeri (PGA) 0,7803 g olarak tespit edilmiştir. Seçilen Landers depremine ait ivme-zaman ve Fourier genliği-zaman grafikleri Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



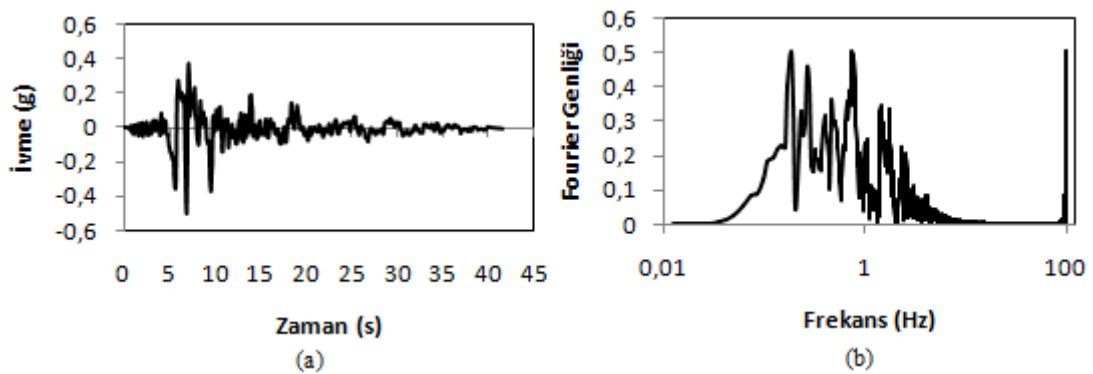
Şekil 4.5. Landers (1992) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu

Türkiye’de Düzce depremi, 12 Kasım 1999’da $M_w= 7,3$ büyüklüğünde meydana gelmiştir. Sayısal analizlerde Bolu istasyonundan alınan düzce deprem kayıtlarına göre maksimum ivme değeri (PGA) 0,822 g olarak tespit edilmiştir. Düzce depremine ait ivme-zaman ve Fourier genliği-zaman grafikleri Şekil 4.6.’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Düzce (1999) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu

Türkiye’de Kuzey Anadolu Fayı üzerinde bulunan Erzincan ilinin güneydoğusunda 13 Mart 1992 tarihinde $M_w= 6,8$ büyüklüğünde deprem meydana gelmiştir. Erzincan kent merkezindeki meteoroloji istasyonunda bulunan cihazdan alınan kayıtlarda maksimum ivme değeri (PGA) 0,5 g olarak tespit edilmiştir. Sayısal analizlerde Erzincan depremine ait ivme-zaman ve Fourier genliği-zaman grafikleri Şekil 4.7.’de gösterilmiştir.

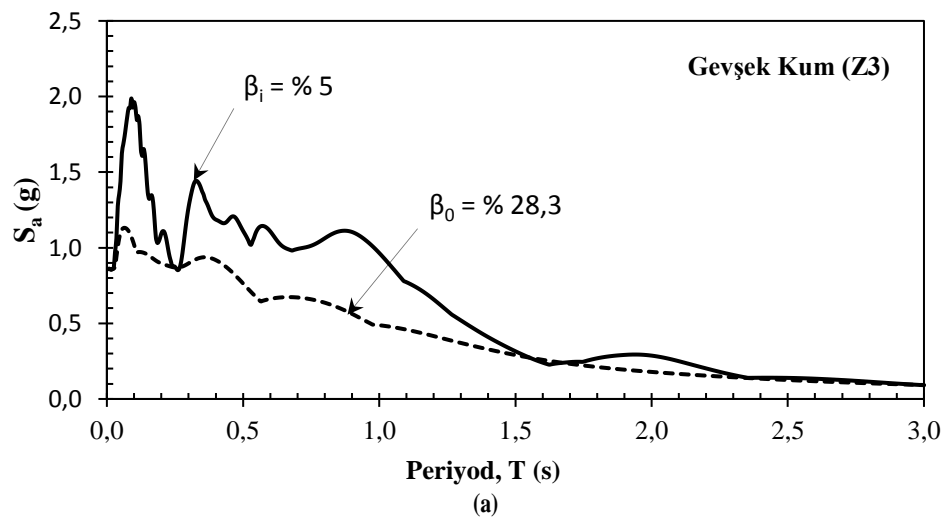


Şekil 4.7. Erzincan (1992) depremine ait ivme-zaman grafiği ve Fourier spektrumu

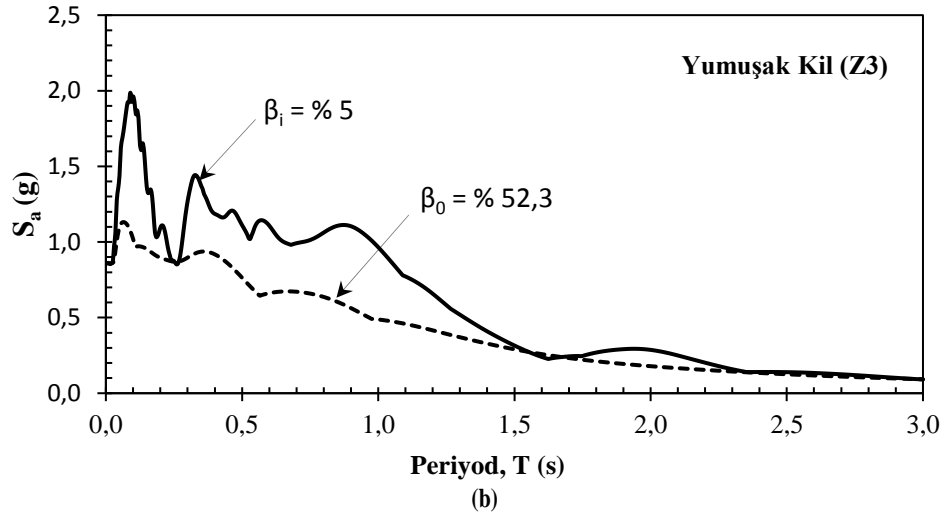
Yapı-temel-zemin etkileşiminin sönüm değerinde meydana getirdiği değişiklik dikkate alınarak davranış spektrum eğrilerinin davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. İyi derecelendirilmiş (Z1) sıkı kumlu ve sert kil zemin koşullarında elde edilen yapı zemin etkileşimli davranış spektrum eğrilerinin standartlardaki % 5 sönüme karşı gelen davranış spektrum eğrileri ile karşılaştırıldığında önemli bir fark meydana gelmemiştir. Yer hareketine önemli bir etkisi olan ivme verilerinin daha büyük olduğu 4 farklı deprem kaydında uygulanan yapı zemin etkileşimli sistemin sönüm değeri yüzeysel ve gömülü temellerde iyi derecelendirilmiş zeminler için önemli bir değişikliğe neden olmamakla birlikte ivme spektrumlarında azalma meydana gelmediğinden çalışmada sunulmasında gerek görülmemiştir. Bu çalışmada daha çok kötü zemin koşulları ve deprem yönetmeliğince Z3 zemin grubu olarak tanımlanan ve içerisinde gevşek kum ve yumuşak killi zemin olarak sınıflandırılan zemin grupları dikkate alınmıştır.

4.1.1.3.1. Yüzeysel temel (D/B= 0) için davranış spektrumları

Düzce depreminin (1999) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.8.).



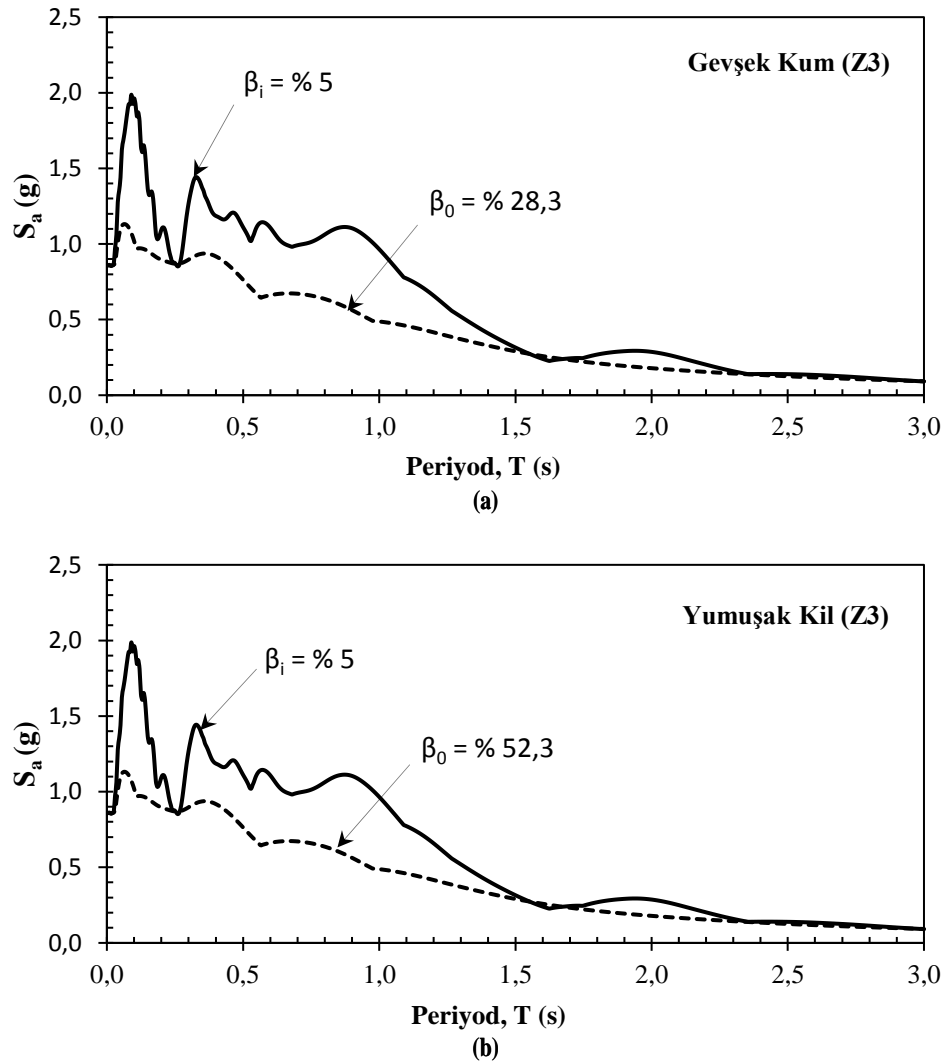
Şekil 4.8. Düzce depremi (1999) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B= 0) sönüm parametrelerine bağlı değişimi



Şekil 4.8. (Devamı)

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,09$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 46, killi zemin için de % 54 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,875$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 48, killi zeminde ise % 57 azalmıştır.

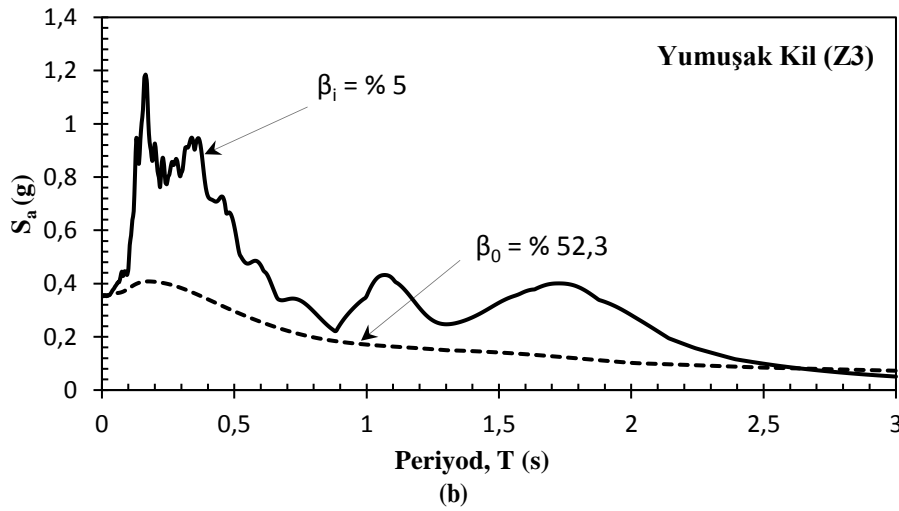
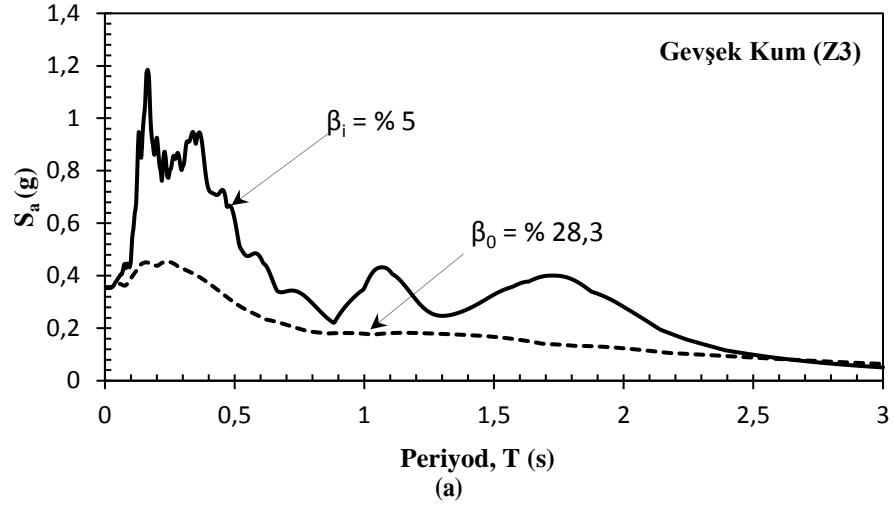
Erzincan depreminin (1992) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Erzincan depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı($D/B=0$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T=0,295$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 53, killi zemin için de % 63 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T=0,655$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 54, killi zeminde ise % 60 azalmıştır.

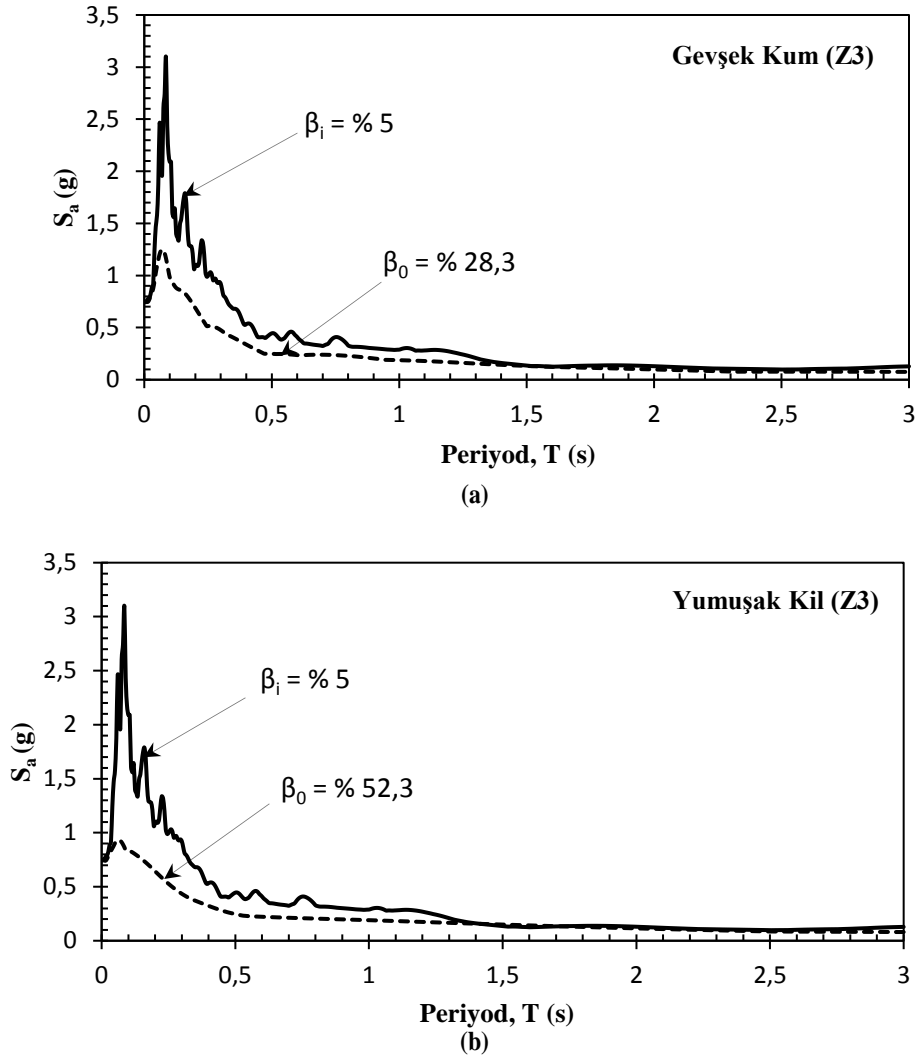
Kobe depreminin (1995) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. Kobe depremi (1995) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B=0$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T=0,165$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 62, killi zemin için de % 65 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T=1,07$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 58, killi zeminde ise % 61 azalmıştır.

Landers depreminin (1992) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.11.).



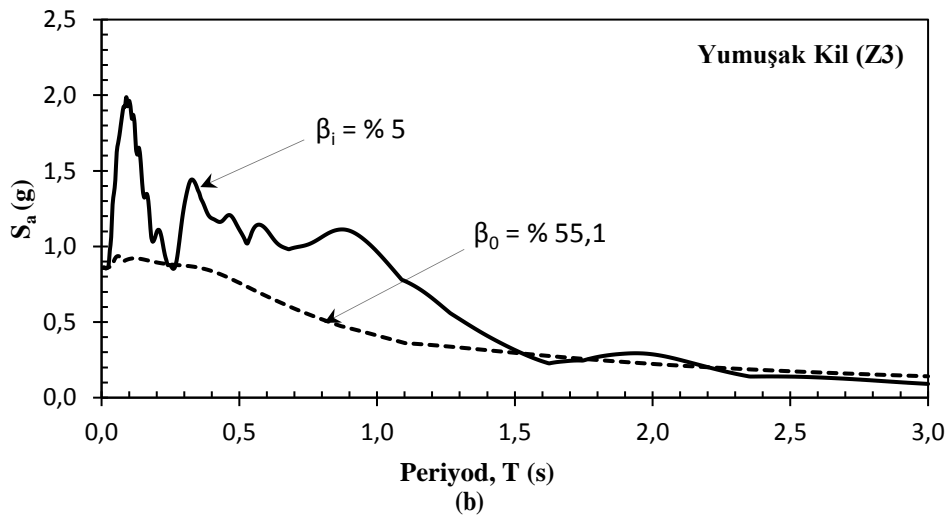
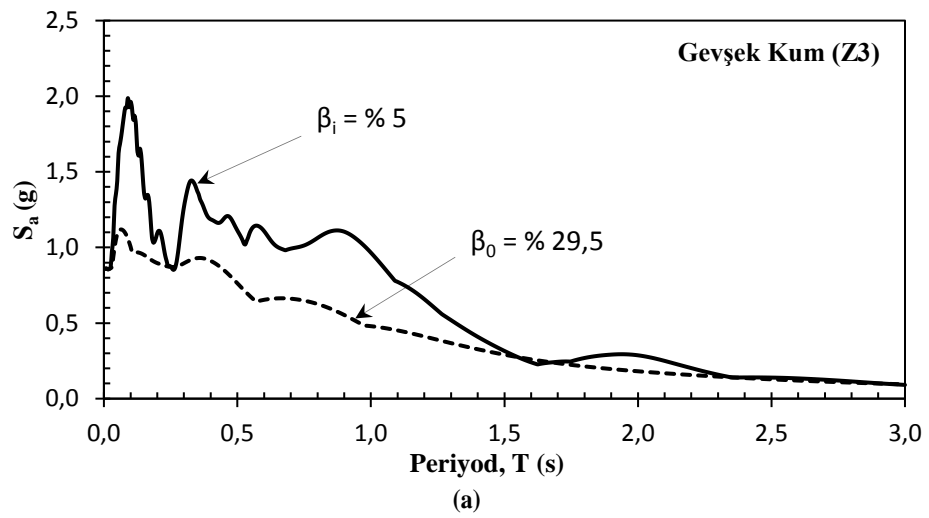
Şekil 4.11. Landers depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B=0$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T=0,085$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 62, killi zemin için de % 72 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için,

özellikle $T = 0,585$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 47, killi zeminde ise % 50 azalmıştır.

4.1.1.3.2. Gömülü temel ($D/B = 0,25$) için davranış spektrumları

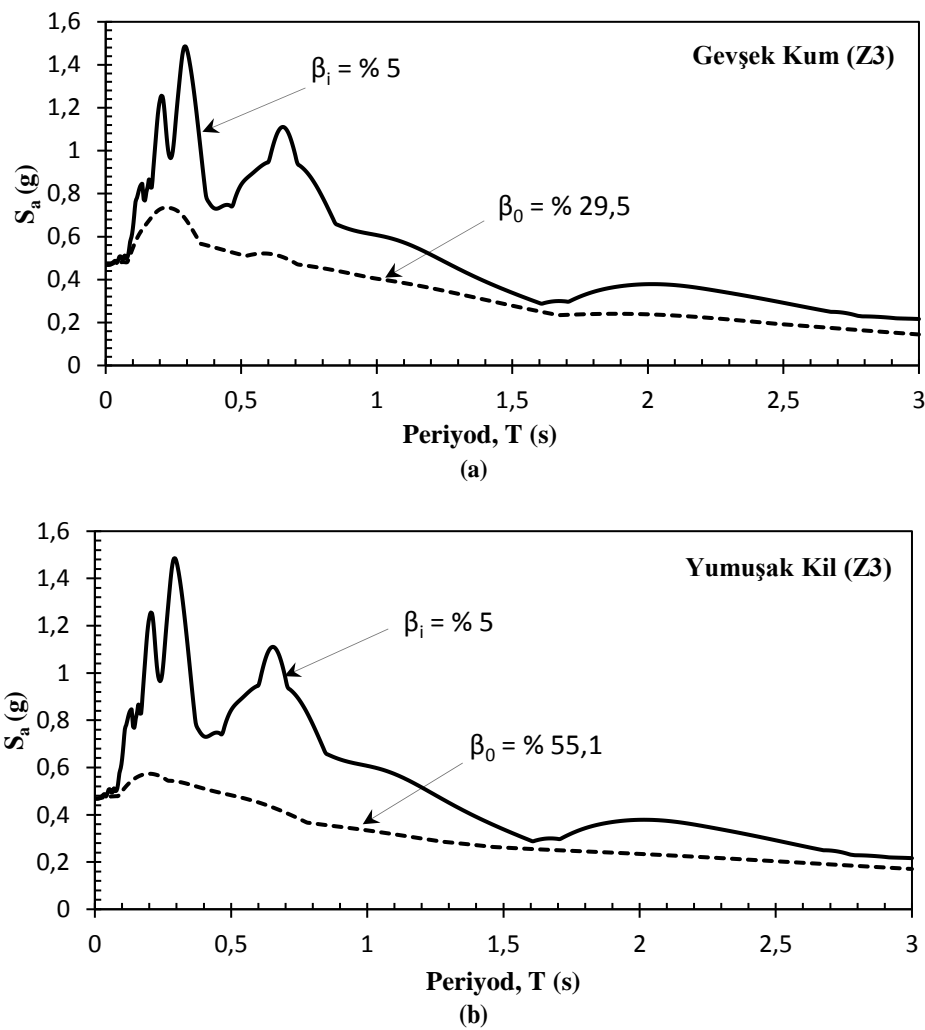
Düzce depreminin (1999) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. Düzce depremi (1999) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı($D/B = 0,25$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,09$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 47, killi zemin için de % 54 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,875$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 48, killi zeminde ise % 58 azalmıştır.

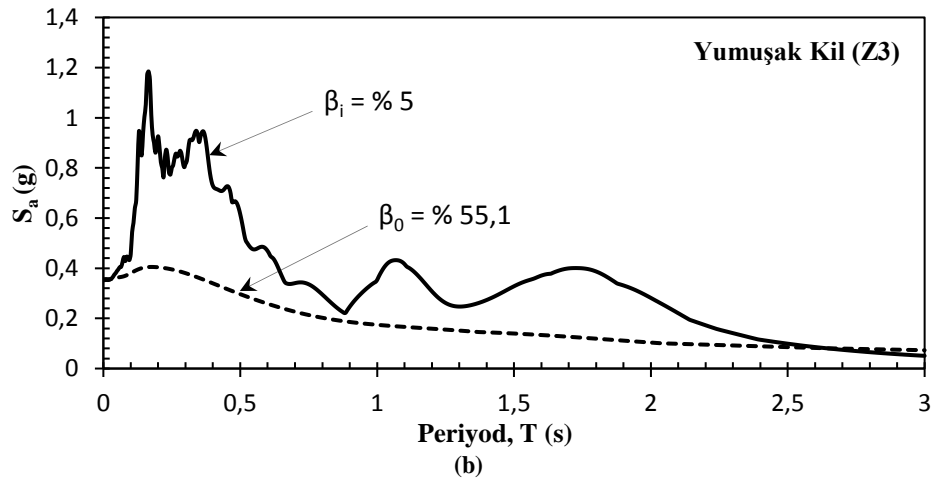
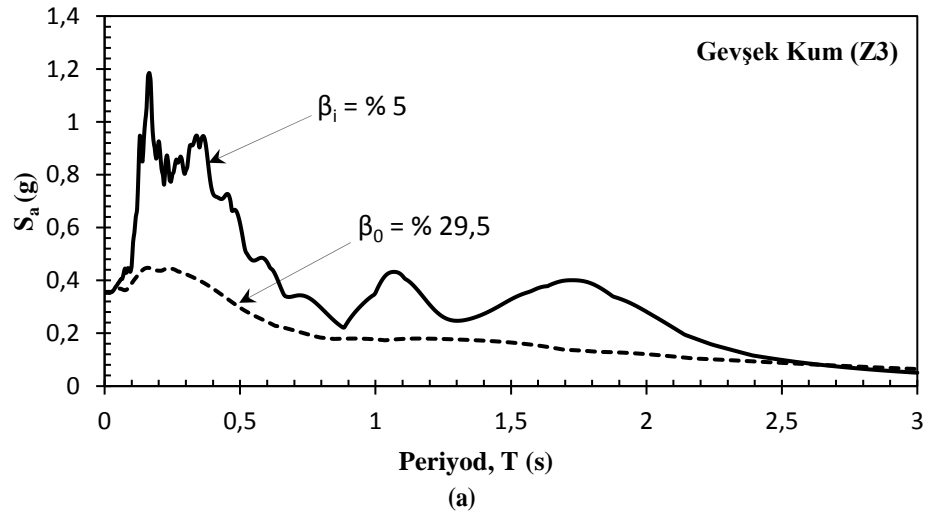
Erzincan depreminin (1992) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. Erzincan depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B = 0,25$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,295$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 54, killi zemin için de % 64 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,655$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 55, killi zeminde ise % 61 azalmıştır.

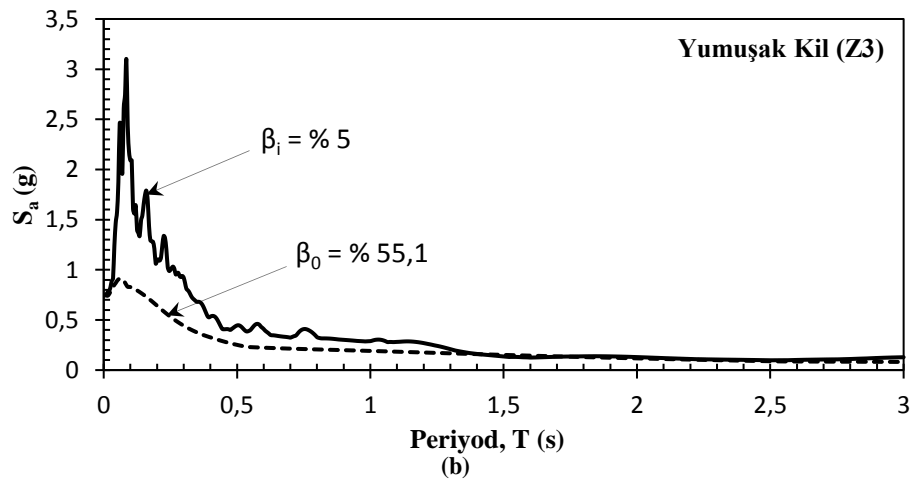
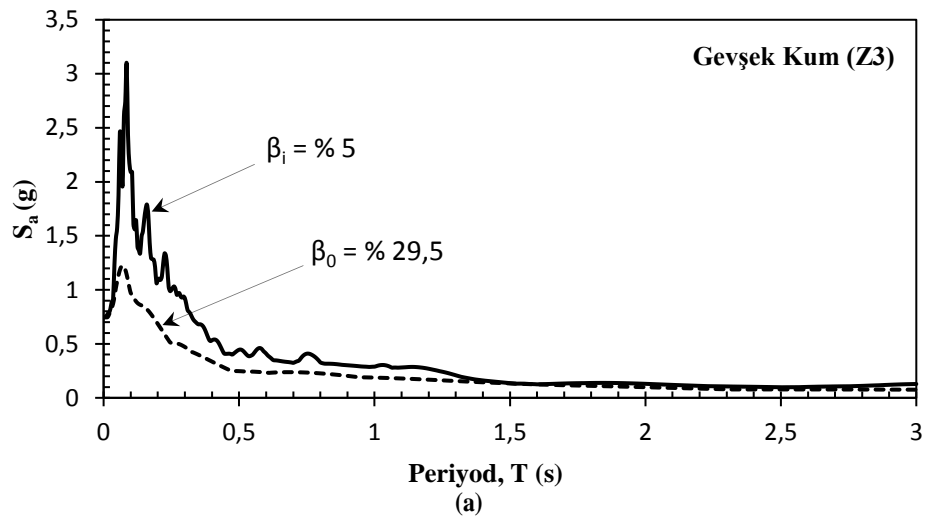
Kobe depreminin (1995) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. Kobe depremi (1995) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B=0,25$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,165$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 62, killi zemin için de % 66 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 1,07$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 59, killi zeminde ise % 61 azalmıştır.

Landers depreminin (1992) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.15.).

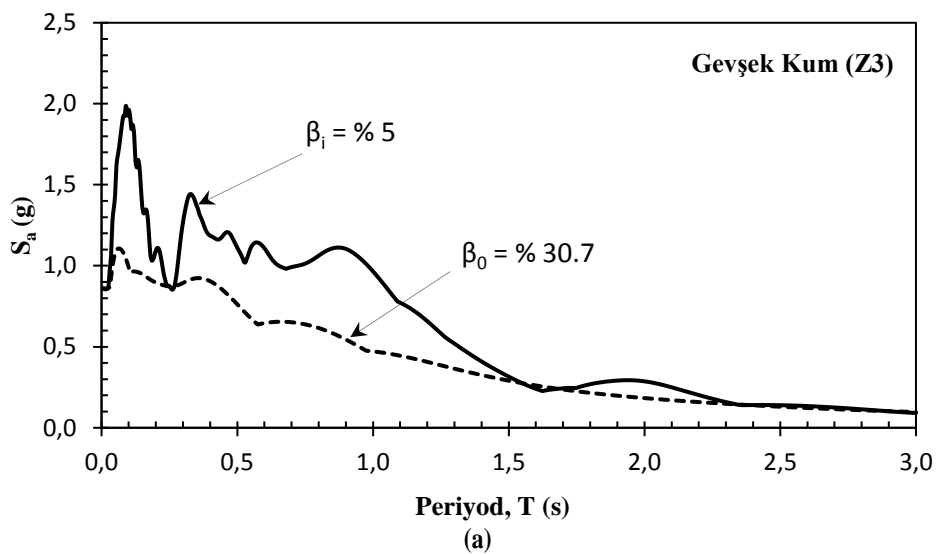


Şekil 4.15. Landers depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B = 0,25$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

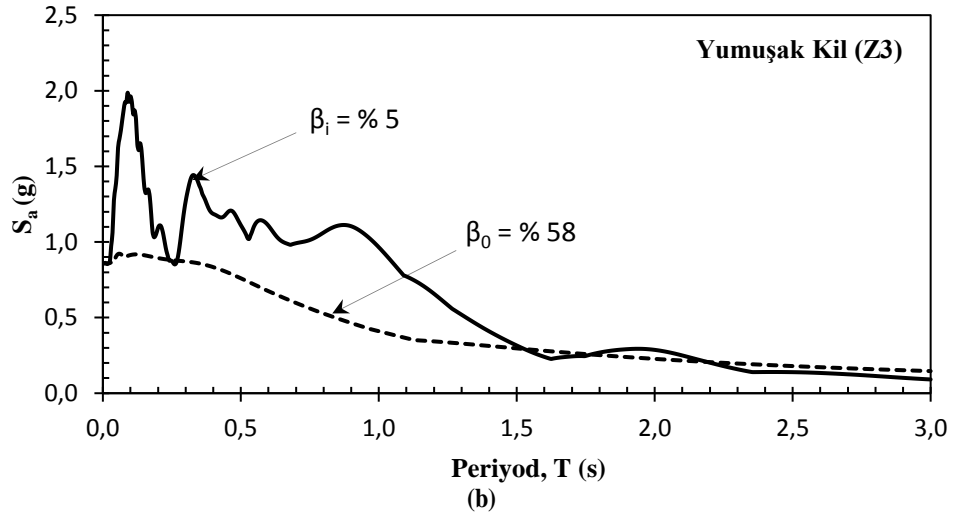
Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,085$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 63, killi zemin için de % 73 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,585$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 47, killi zeminde ise % 50 azalmıştır.

4.1.1.3.3. Gömülü temel ($D/B=0,5$) için davranış spektrumları

Düzce depreminin (1999) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.16.).



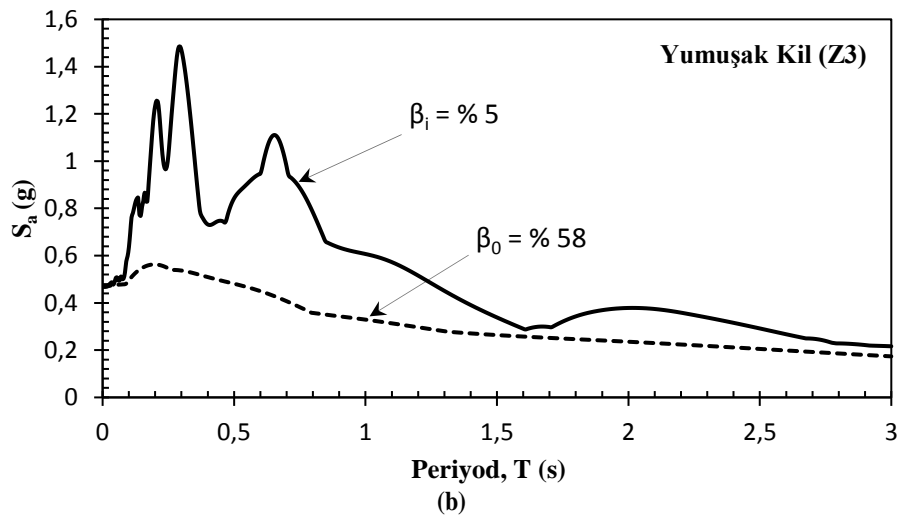
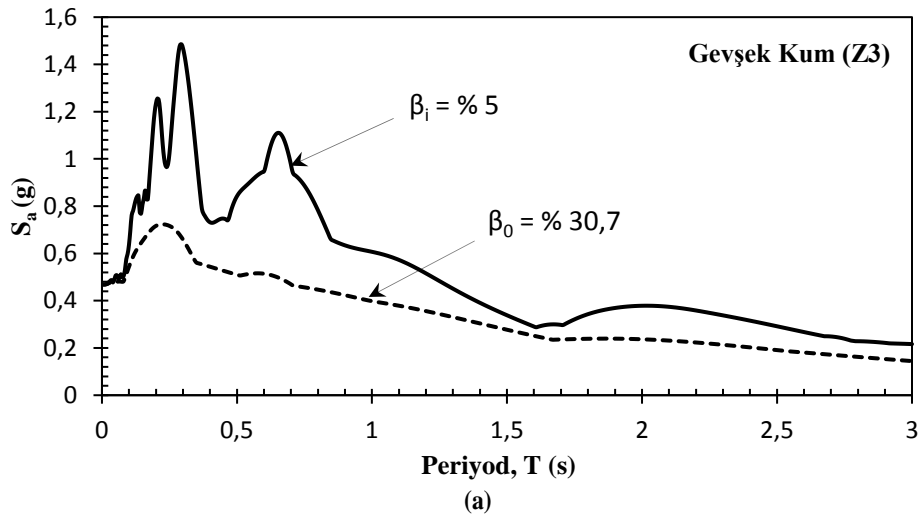
Şekil 4.16. Düzce depremi (1999) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B=0,5$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi



Şekil 4.16. (Devamı)

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,09$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 48, killi zemin için de % 54 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,875$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 49, killi zeminde ise % 57 azalmıştır.

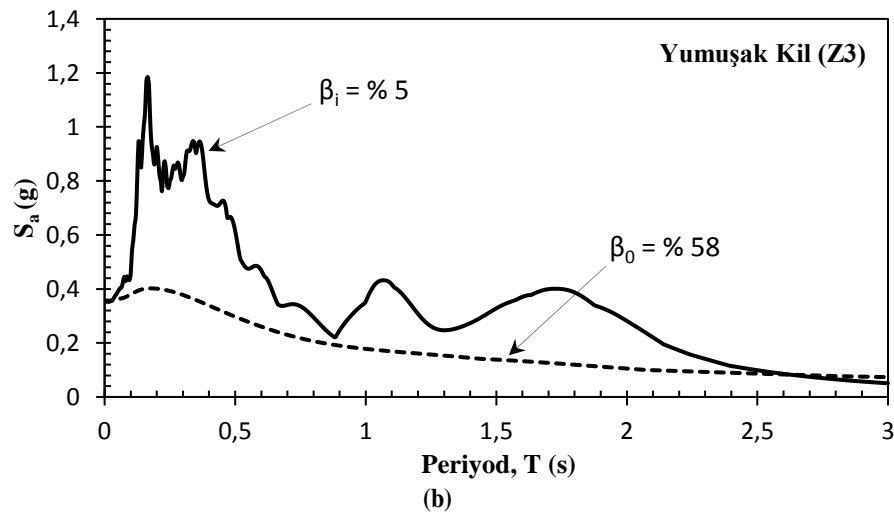
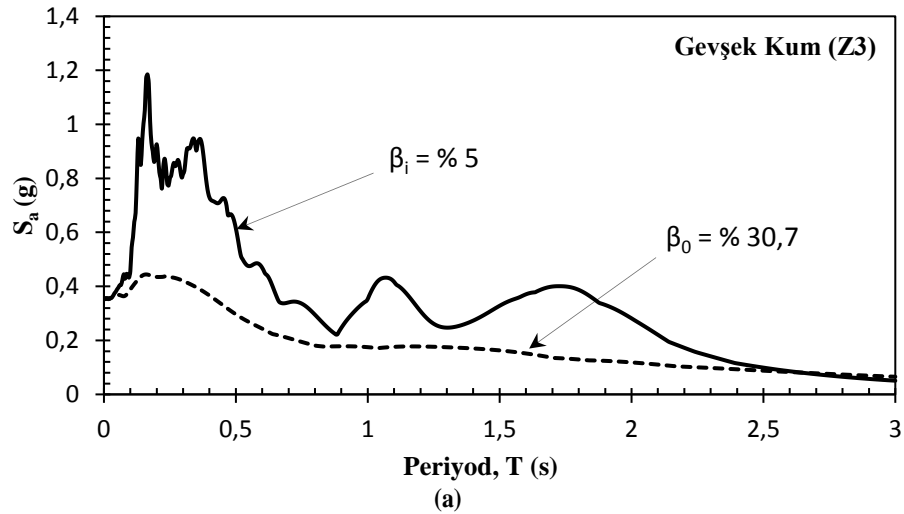
Erzincan depreminin (1992) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.17. Erzincan depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı(D/B= 0,5) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,295$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 55, killi zemin için de % 64 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,655$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 55, killi zeminde ise % 62 azalmıştır.

Kobe depreminin (1995) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.18.).

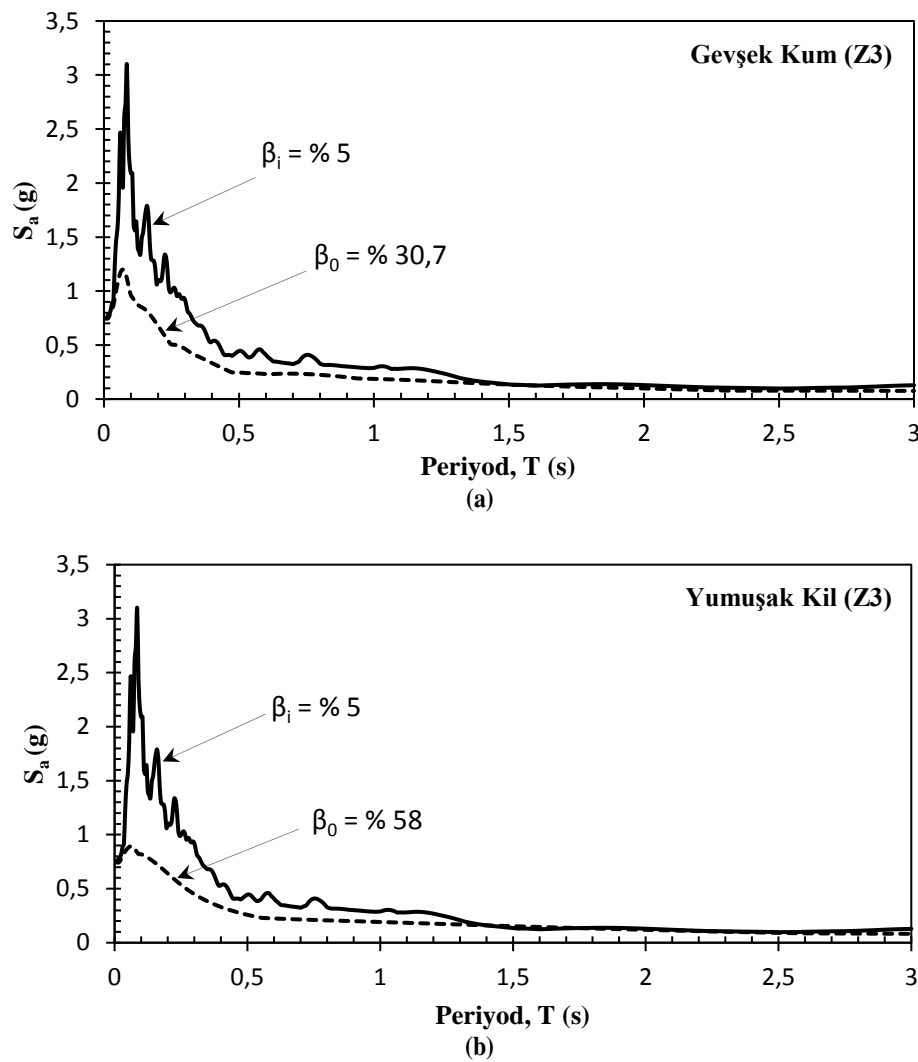


Şekil 4.18. Kobe depremi (1995) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı (D/B=0,5) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu aralıkta $T = 0,165$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 63, killi zemin için de % 66 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için,

özellikle $T = 1,07$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 59, killi zeminde ise % 60 azalmıştır.

Landers depreminin (1992) ivme davranış spektrum eğrisi deprem yönetmeliğinde Z3 olarak sınıflandırılan gevşek kum ve yumuşak killi zeminin sönüm üzerindeki etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir (Şekil 4.19.).

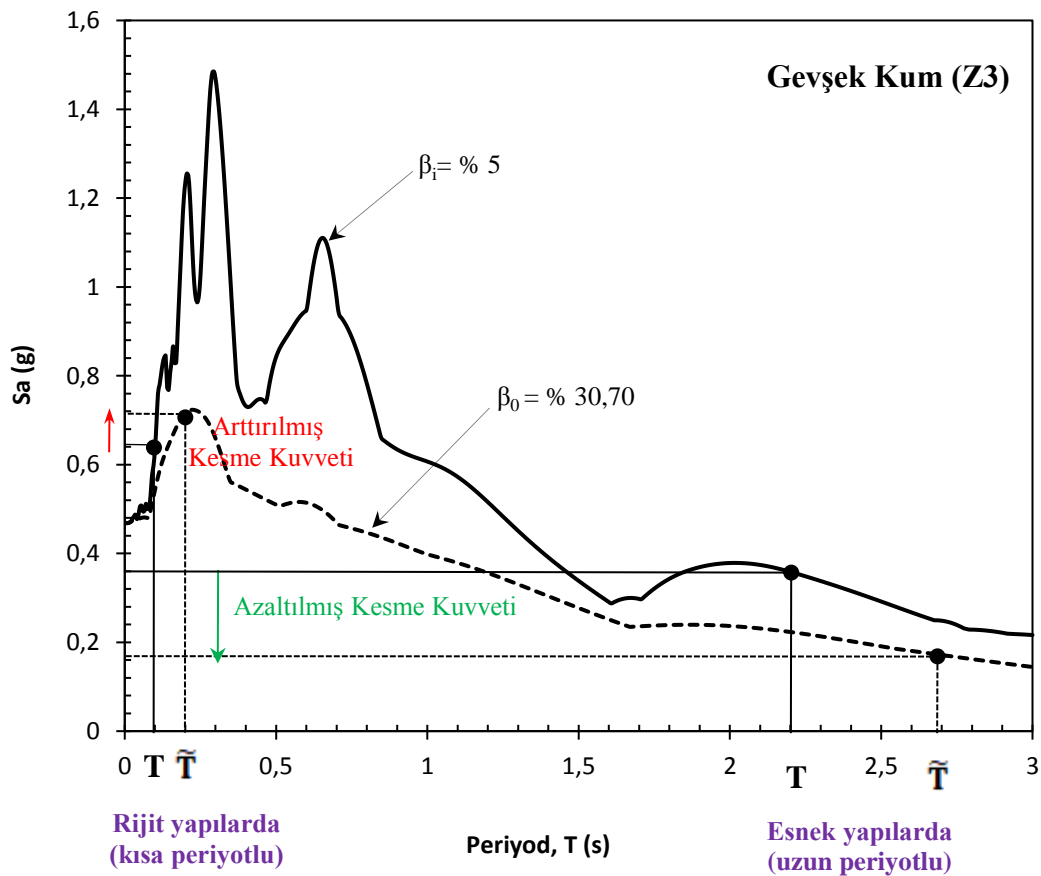


Şekil 4.19. Landers depremi (1992) ivme spektrumunun kötü derecelendirilmiş zemin (Z3) için rijit ve esnek tabanlı ($D/B = 0,5$) sönüm parametrelerine bağlı değişimi

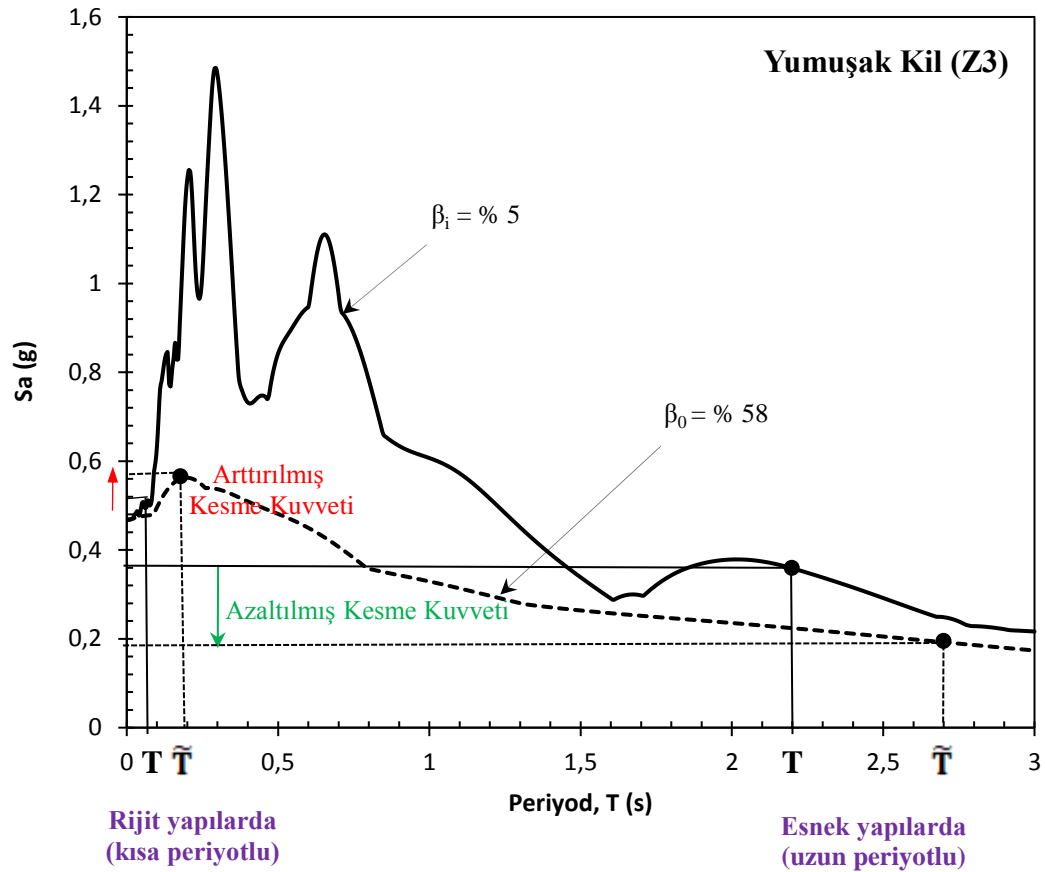
Zemin koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri dikkate alınarak elde edilen sönüm değerine göre çizilmiş davranış spektrum eğrisinin pik değerleri rijit mesnetlenmiş olanlara göre azaldığı açıkça görülmektedir. Özellikle $T < 0,5$ olduğu

aralıkta $T = 0,085$ karşı gelen pik ivme değerlerinde kumlu zemin için % 64, killi zemin için de % 73 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $T > 0,5$ değerleri için, özellikle $T = 0,585$ 'de gözlemlenen ivme pik değerleri kumlu zeminde % 48, killi zeminde ise % 50 azalmıştır

Şekil 4.20. ve 4.21.'de Erzincan (1992) depreminin ivme spektrumları gevşek kum ve yumuşak killi zeminler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Yapı-zemin etkileşimli sistemin artan sönüm değerlerine bağlı elde edilen ivme spektrum eğrileri üzerinden kısa ve uzun periyotlu yapılarda oluşacak kesme kuvvetinin etkisi, zemine rijit bağlı sistemle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.



Şekil 4.20. Erzincan (1992) depreminin gevşek kumlu zeminler için ivme spektrumunun artan sönüm değerine bağlı değişiminin rijit ve esnek yapılarda kesme kuvvetine etkisi



Şekil 4.21. Erzincan (1992) depreminin yumuşak killi zeminler için ivme spektrumunun artan sönüm değerine bağlı değişiminin rijit ve esnek yapılarda kesme kuvvetine etkisi

Kısa periyotlu yapılar için yapı-zemin etkileşimli ivme spektrum eğrisi incelendiğinde spektral değerlerde gevşek kumlu zeminde % 13 civarında bir artış gözlemlenirken, uzun periyotlu yapılarda bu değerlerde % 56 azalış meydana gelmiştir. Bu durumda, kısa periyotlu yapıların gevşek kumlu zeminle etkileşiminden dolayı kesme kuvvetinde % 13 artış beklenmektedir. Aynı durum yumuşak killi zeminle etkileşim yapıların tasarımı içinde geçerlidir. Kısa periyotlu yapılarda tasarım kesme kuvveti % 12 civarında artarken, uzun periyotlu yapılarda % 47 azalmıştır.

Geliştirilen çözüm algoritmasıyla MATLAB yazılım ile elde edilen yapı-zemin etkileşiminin deprem davranış spektrumuna etkisinin değerlendirilmesi:

- İyi derecelendirilmiş (Z1) sıkı kum ve sert kil zemin sınıflarının % 5 sönüm oranına bağlı elde edilen spektrum eğrileri ile yapı-zemin etkileşimli sistemin

spektrum eğrisinin çakıştığı görülmektedir. Yapı-zemin etkileşimli sistemin periyot uzama oranı ihmal edilebilecek düzeyde olduğu için spektral ivme değerlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Bunun nedeni yapı-zemin rijitlik oranının (h/V_sT) 0,1'den küçük olmasıdır.

- b. Kötü derecelendirilmiş (Z3) gevşek kum ve yumuşak kil zemin sınıflarına ait eğriler incelendiğinde, bu zemin sınıflarına ait sönüm oranlarının ve periyot değerlerinin değiştiği görülmektedir.
- c. Yapı-zemin etkileşimi ile birlikte gömülme derinliği arttıkça sönüm değerinin artmakta olduğu gözlenmektedir.
- d. Kayma dalga hızı yüksek zemin sınıfları için spektral ivme değerlerinde dikkate değer bir değişim olmazken, kayma dalga hızı düşük zeminlerde spektral ivme değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir.
- e. Spektral ivmede meydana gelen değişimlerde depremin hareketinin karakteri de etkili olmuştur.

4.1.1.4. Kum ve killi zeminin iki farklı koşulunda temelin gömülme derinliğine bağlı elde edilen empedans fonksiyonları ($G(i) = G_{maks}$)

Yapı ile zeminin etkileşimini altsistem yaklaşımına dayalı olarak temel-zemin arakesitinde temsil eden empedans fonksiyonları farklı zemin koşullarına göre elde etmek için MATLAB dilinde bir çözüm algoritması geliştirilmiştir (Bölüm 3). Parametrik araştırmaları sayısal bir örnek üzerinden gerçekleştirebilmek için Kocaeli bölgesi İzmit tarafında seçilmiş bir arazinin zemin etüt raporlarından yararlanılmıştır. Söz konusu rapordan kum ve killi zeminin iki farklı koşuluna ait parametreleri dikkate alınmıştır.

Kum ve killi zeminin iki farklı koşuluna oturan kare temelin ötelenme ve dönme titreşim moduna karşı gelen statik rijitlikler ($a_0=0$) temelin gömülme oranına bağlı elde edilerek Tablo 4.5. ve 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Kum ve killi zeminin farklı koşullarında ötelenme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_x) temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi

Zemin grubu	Yerel zemin sınıfı	Ötelenme statik rijitlikler [kN/m]		
		Temelin gömülme oranı		
		D/B=0	D/B=0,25	D/B=0,5
Çok sıkı kum (A)	Z1	$2,0689 \times 10^7$	$2,7513 \times 10^7$	$3,2571 \times 10^7$
Gevşek kum (D)	Z3	$4,0119 \times 10^5$	$5,3354 \times 10^5$	$6,3162 \times 10^5$
Sert kil (A)	Z1	$2,0525 \times 10^7$	$2,7296 \times 10^7$	$3,2314 \times 10^7$
Yumuşak kil (D)	Z3	$2,7311 \times 10^5$	$3,6320 \times 10^5$	$4,2997 \times 10^5$

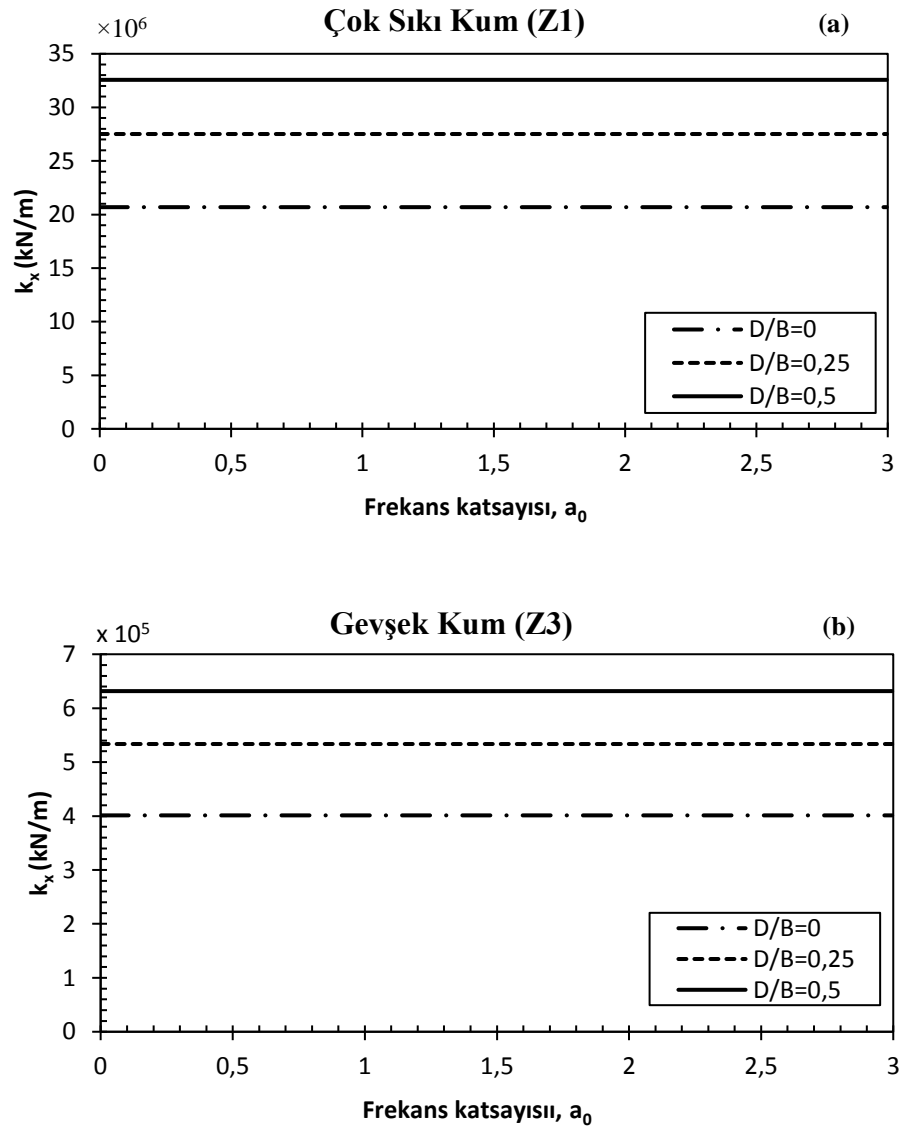
Tablo 4.6. Kum ve killi zeminin farklı koşullarında dönme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_{yy}) temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi

Zemin grubu	Yerel zemin sınıfı	Dönme statik rijitlikler [kNm]		
		Temelin gömülme oranı		
		D/B=0	D/B=0,25	D/B=0,5
Çok sıkı kum (A)	Z1	$3,5250 \times 10^8$	$4,6674 \times 10^8$	$6,3320 \times 10^8$
Gevşek kum (D)	Z3	$7,9497 \times 10^6$	$1,0526 \times 10^7$	$1,4280 \times 10^7$
Sert kil (A)	Z1	$3,4972 \times 10^8$	$4,6305 \times 10^8$	$6,2820 \times 10^8$
Yumuşak kil (D)	Z3	$5,1200 \times 10^6$	$6,7793 \times 10^6$	$9,1970 \times 10^6$

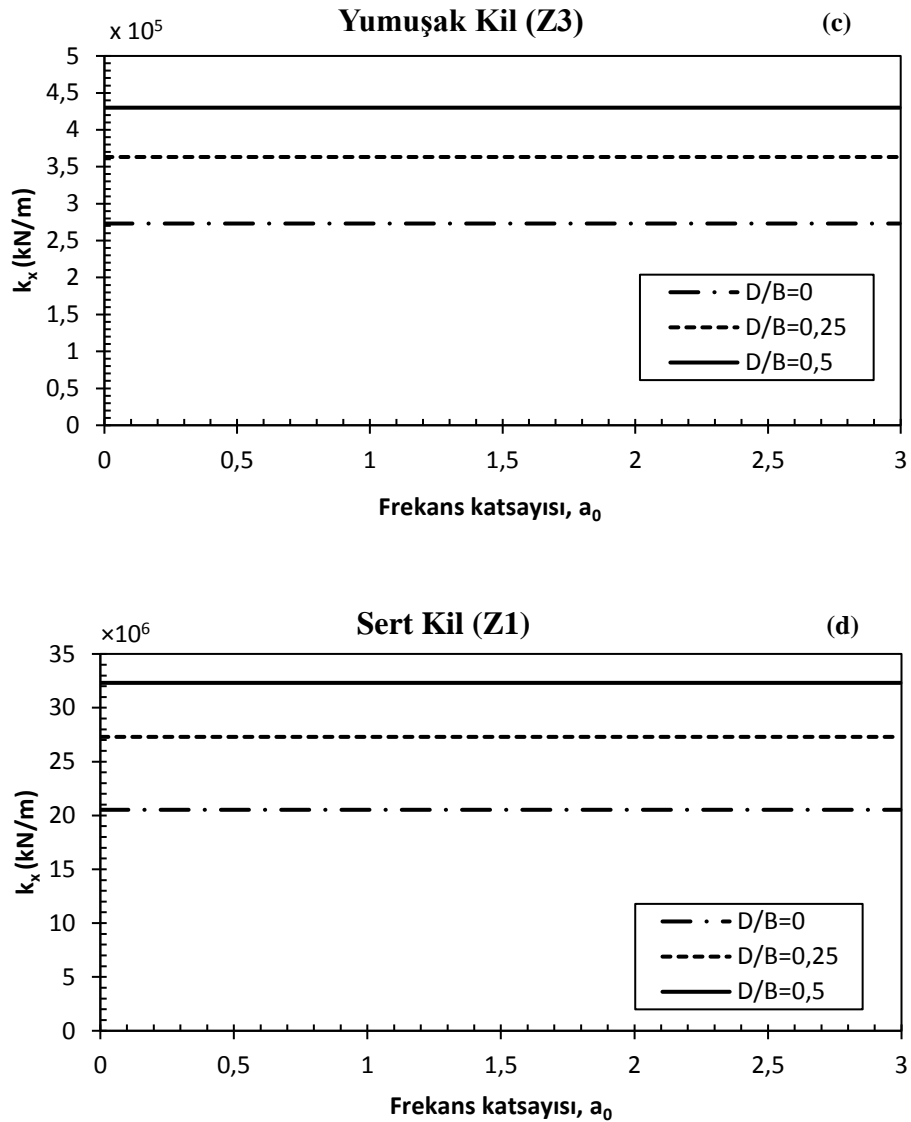
İyi derecelendirilmiş (sert kil, çok sıkı kum) ve kötü derecelendirilmiş (gevşek kum, yumuşak killi) zemin koşullarında ötelenme ve dönme titreşim modları için kare temelin gömülme oranına bağlı değişimleri incelendiğinde temelin gömülme derinliğinin artması statik rijitliklerin (K_x ve K_{yy}) artmasına neden olmaktadır. İyi derecelendirilmiş zemin koşulundan kötü derecelendirilmiş zemin türüne geçtikçe (dayanımın azalması) statik rijitliklerin ötelenme titreşim modu için % 96 azalma gözlemlenirken dönme titreşim modu için ise % 99 azalma meydana gelmektedir.

Yerel zeminin dört farklı koşulunda gömülme derinliğine bağlı elde edilen sayısal sonuçlar değerlendirildiğinde, statik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modu için % 57 artış gösterirken, dönme titreşim modunda % 80 artış meydana gelmiştir. Ayrıca dönme titreşim modu (K_{yy}) için statik rijitliklerin kare temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi ötelenme titreşim moduna (K_x) göre % 40 daha fazla etkili olduğu görülmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında aynı zemin parametreleri kullanılarak dinamik rijitlikler ötelenme ve dönme titreşim modları için kare temelin gömülme oranına bağlı elde edilmiştir. Şekil 4.22.'de gömülme oranına göre ötelenme doğrultusundaki dinamik rijitliğin boyutsuz frekans parametresine (a_0) bağlı değişimi $0 \leq a_0 \leq 3$ aralığı için gösterilmiştir.



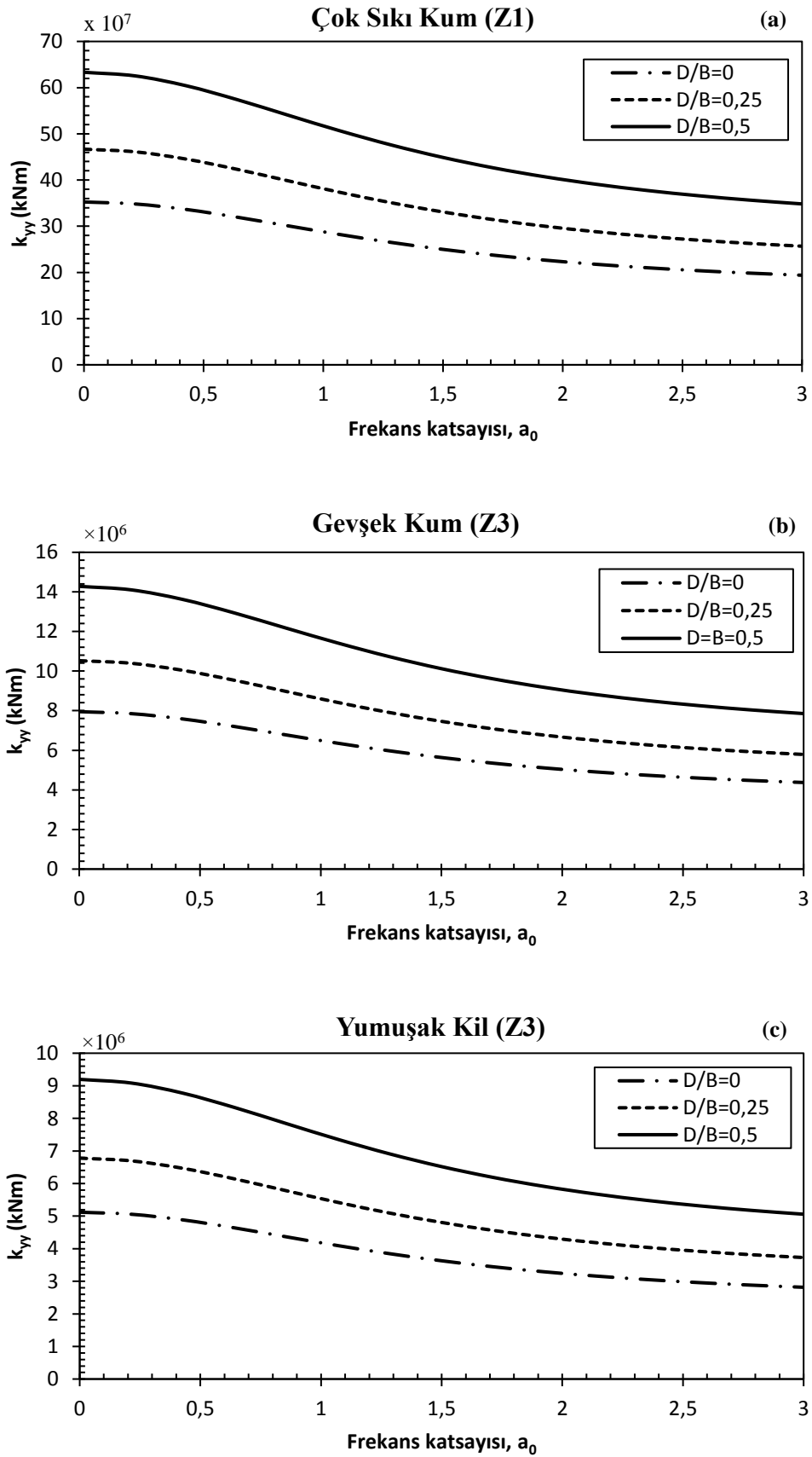
Şekil 4.22. İzmir bölgesinin dört farklı zemin koşullarında kare temelin gömülme derinliğine bağlı ötelenme dinamik rijitliğinin (k_x) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi



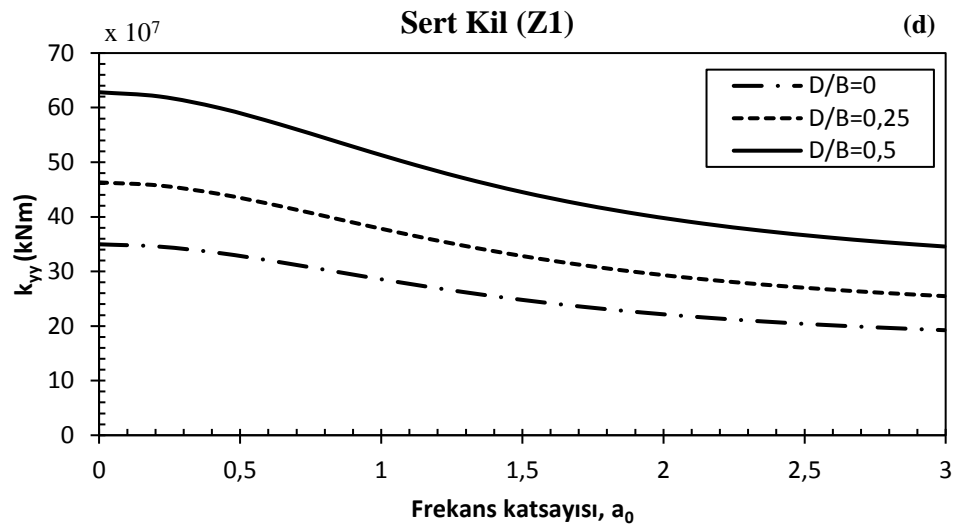
Şekil 4.22. (Devamı)

Kum ve killi zeminin iki farklı koşulu için Şekil 4.22’de elde edilen grafikler incelendiğinde ötelenme dinamik rijitliğinin titreşim kaynağının frekansından bağımsız olduğu görülmüştür. Buradan, ötelenme titreşimi moduna ait empedans fonksiyonları doğrudan statik rijitliğe eşdeğer olduğu anlaşılmaktadır.

Dönme titreşim moduna karşı gelen dinamik rijitliğin temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi boyutsuz frekans parametresinin $0 \leq a_0 \leq 3$ aralığı için incelenmiştir (Şekil 4.23.).



Şekil 4.23. İzmit bölgesinin dört farklı zemin koşullarında kare temelin gömülme derinliğine bağlı dönme dinamik rijitliğinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi



Şekil 4.23. (Devamı)

Dış yükün zorlayıcı titreşim frekansı arttıkça zeminin dönme rijitliği önemli derecede azalmaktadır. Kum ve killi zeminin iki farklı zemin koşullarında söz konusu rijitlik değerleri yaklaşık olarak yarı yarıya azalmıştır. Temelin gömülme derinliğinin artması söz konusu rijitliğin artmasına neden olmuştur.

4.1.1.5. Dört farklı zemin grubuna ait kayma modülü azalım eğrisinin (G_i/G_{maks}) değişimi dikkate alınmasıyla önerilen empedans fonksiyonların temelin gömülme oranına bağlı elde edilmesi

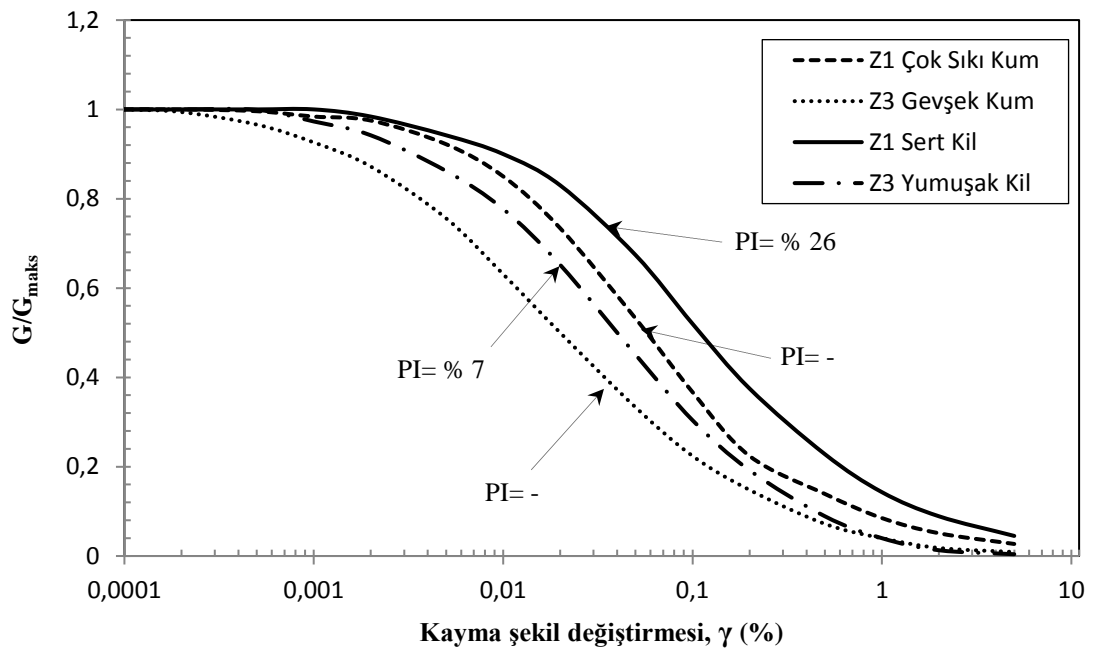
Kayma şekil değiştirme büyüklüğüne bağlı değişen zemin kayma modülünün, empedans fonksiyonların hesabında etkisini gösterebilmek için Bölüm 3’de önerilen çözüm algoritmasına ilave bir hesap modülü eklenerek yazılan MATLAB kodu (EK D) geliştirilmiştir.

Örnek çalışmada Kocaeli bölgesi İzmit tarafındaki bir arsa için hazırlanmış temel zemin etüt raporundan alınan zemin tabaka kalınlıkları (h), kayma dalga hızları (V_s), birim hacim ağırlıkları (ρ) ve plastisite indis (PI) parametreleri kayma şekil değiştirmesine bağlı kayma modülü azalım eğrilerini elde etmek için kullanılmıştır (Tablo 4.7.).

Tablo 4.7. İzmit zemin profili için kayma modülü azalım eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan parametreler

Profil	h [m]	V _s [m/s]	ρ [kN/m ³]	PI [%]	Zemin modeli
Çok sıkı kum (Z1)	6	713	18,7	-	Seed / Idriss 1970
Gevşek kum (Z3)	4,5	110	13,9	-	Seed / Idriss 1970
Sert kil (Z1)	3	710	18,7	26	Sun et al 1988
Yumuşak kil (Z3)	2	85	16,4	7	Sun et al 1988

Zeminin plastisite indisine göre farklılık gösteren iyi derecelendirilmiş (sert kil, çok sıkı kum) ve kötü derecelendirilmiş (gevşek kum, yumuşak killi) zeminlerin kayma modülü azalım eğrisinin değişimi, SHAKE91 tabanlı EZ-FRISK programında elde edilerek Şekil 4.24.'de gösterilmiştir [93].

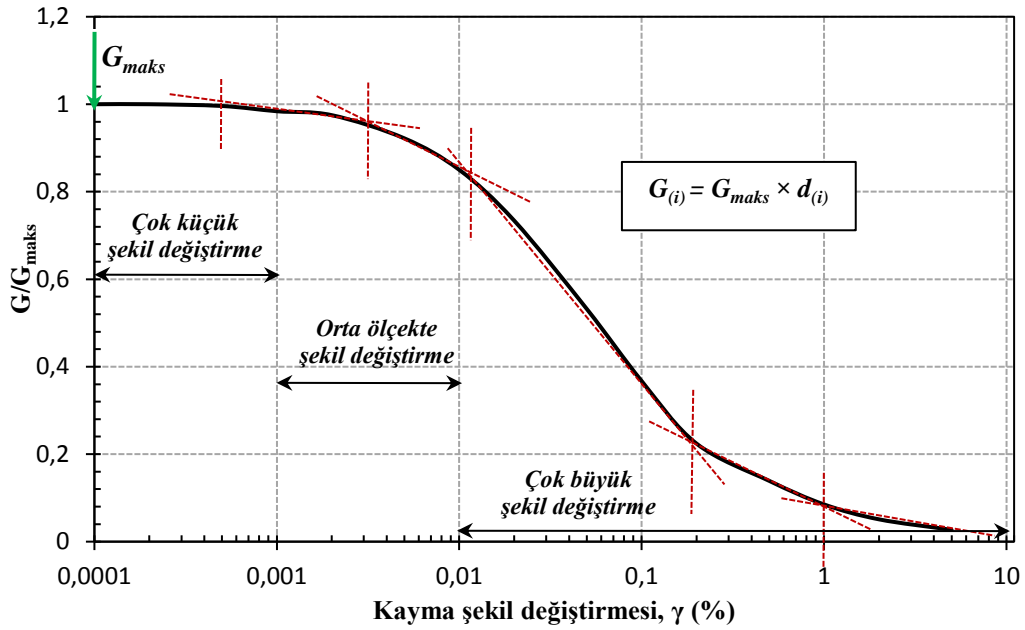


Şekil 4.24. Farklı plastisite indislerine göre dört farklı zemin koşulunda G/G_{maks} oranının kayma şekil değişimine bağlı azalım eğrileri

Kum ve killi zeminin iki farklı koşulu için elde edilen kayma rijitliğinin kayma şekil değişimine bağlı azalım eğrisini MATLAB programında yazılan kodla tanımlatabilmek, ancak söz konusu eğrinin kayma şekil değişime referans aralıklarına göre parçalı doğrusallaştırılmasıyla mümkün olmuştur. Kayma şekil değişiminin referans aralığına göre lineerleştirilen azalım eğrisinden elde edilen denklemler ($d_{(i)}$) basit bir çözüm algoritması içerisinde plastisite indisine göre

farklılık gösteren çok sıkı kum, gevşek kum, sert kil ve yumuşak killi zemin durumları için MATLAB kodu oluşturulmuştur. MATLAB programında yazılan kodda elde edilen sonuçlar ile SHAKE91 tabanlı EZ-FRISK programında elde edilen sonuçlar arasında fark edilebilir bir değişiklik görülmediği ve bu doğrultuda hiçbir teknik hatanın olmadığı da söz konusudur. Kayma modülü azalım eğrisinin değişimi statik ve dinamik rijitliklerin hesabına katılarak empedans fonksiyonlarının yapı-temel-zemin etkileşimi probleminde daha gerçekçi bir şekilde kullanımı sağlanmıştır.

Çok sıkı kumlu zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır (Şekil 4.25.).



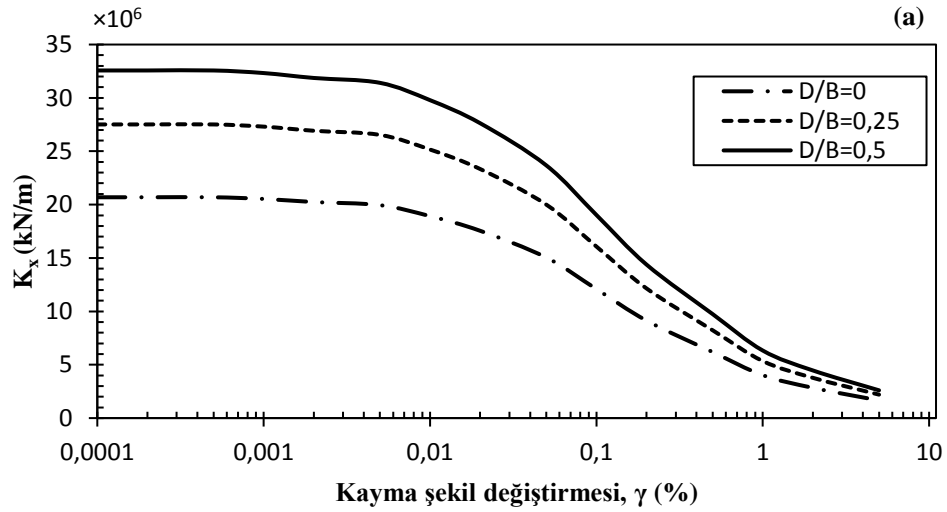
Şekil 4.25. Çok sıkı kumlu (Z1) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması

Kayma şekil değiştirmesinin referans aralıklarına (logaritmik) göre lineer duruma getirilen eğrinin elde edilmesiyle değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri çok sıkı kumlu zemin için Tablo 4.8.'de verilmiştir.

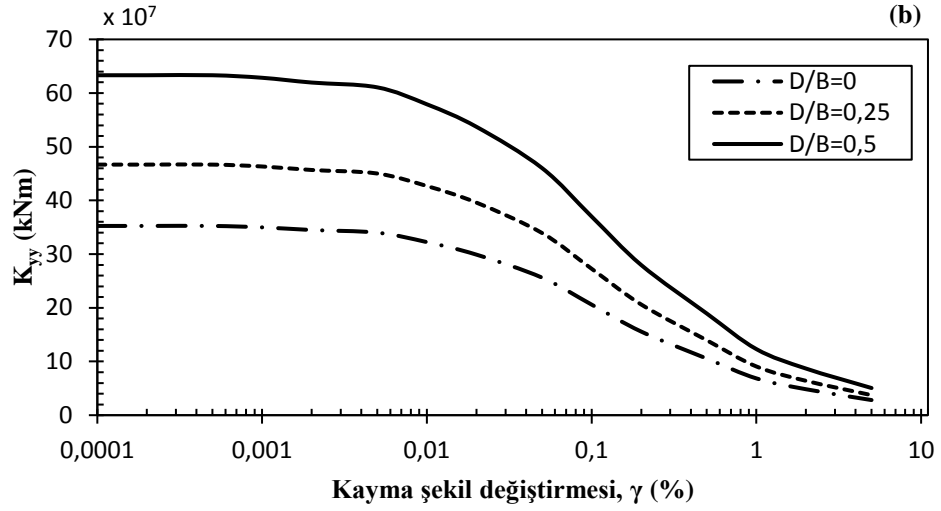
Tablo 4.8. Çok sıkı kumlu (Z1) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi

Lineer bölge	Referans aralığı	Denklem [$d_{(i)}$]
1	$\gamma \leq 0,00051$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = 1$
2	$0,00051 < \gamma \leq 0,0033$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,0493 \times \log \gamma + 0,8376$
3	$0,0033 < \gamma \leq 0,012$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2318 \times \log \gamma + 0,3847$
4	$0,012 < \gamma \leq 0,2$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,4992 \times \log \gamma - 0,1288$
5	$0,2 < \gamma \leq 1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2003 \times \log \gamma + 0,0799$
6	$1 < \gamma$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,0715 \times \log \gamma + 0,08$

Çok sıkı kumlu zemine oturan veya gömülen temellerin empedans fonksiyonlarına göre rijitliklerinin tanımlanmasında kullanılan ötelenme ve dönme titreşimlerine ait statik rijitliklerin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimleri Şekil 4.26.'da gösterilmiştir.



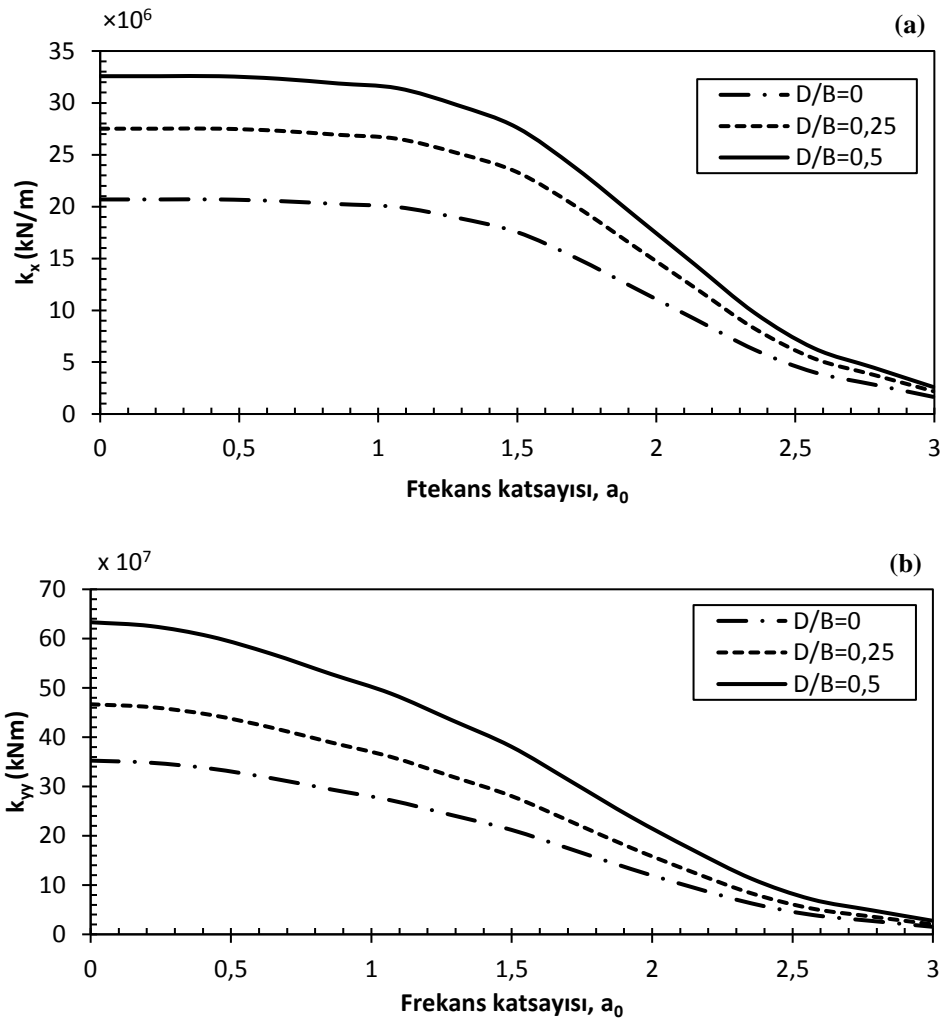
Şekil 4.26. D/B oranına göre çok sıkı kumlu zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)



Şekil 4.26. (Devamı)

Kayma modülü azalım (G_i/G_{maks}) eğrisine göre değişiklik gösteren statik rijitlikler çok sıkı kumlu zemin açısından incelendiğinde temelin gömülme oranı arttıkça ötelenme ve dönme titreşim modlarında artış gözlemlenmektedir. Zemin etütlerinde elde edilen maksimum kayma modülü doğrudan kullanıldığında çok küçük şekil değiştirmeler için büyük statik rijitlik değerleri kullanılır. Ancak azaltılmış kayma modülü dikkate alındığında kullanılacak olan statik rijitlikler, orta derecede kayma şekil değiştirmelerde % 3 çok büyük şekil değiştirmelerde % 91 azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır.

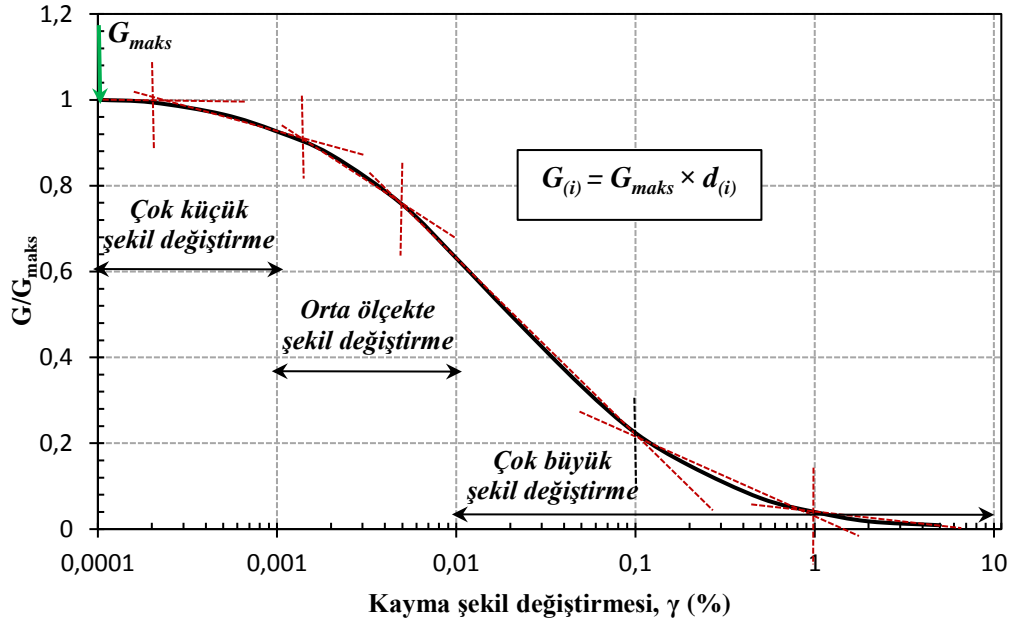
Şekil 4.27.'de dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonların) ötelenme ve dönme modları için boyutsuz frekans parametresine bağlı ($0 \leq a_0 \leq 3$) değişimi gömülme derinliğine (D/B) göre gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Çok sıkı kumlu zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

Zeminin kaymaya karşı göstereceği direncin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalmasıyla ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) çok büyük şekil değiştirmelere neden olacak depremlerde kullanılacak olan dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonları), hesaplarda önemli derecede azaltılması gerektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Kayma modülü azalım eğrisi dikkate alındığında daha önce frekanstan bağımsız olarak elde edilen ötelenme modundaki dinamik rijitlik (Şekil 4.22.) burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı Şekil 4.27.'den anlaşılmaktadır. Özellikle $a_0 < 1,5$ olduğu aralıkta dinamik rijitlik değerlerinde ötelenme titreşim modu için % 9, dönme titreşim modu için % 31 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $a_0 > 1,5$ değerleri için gözlemlenen dinamik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modunda % 89, dönme titreşim modunda ise % 91 azalmıştır.

Gevşek kumlu zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır (Şekil 4.28.).



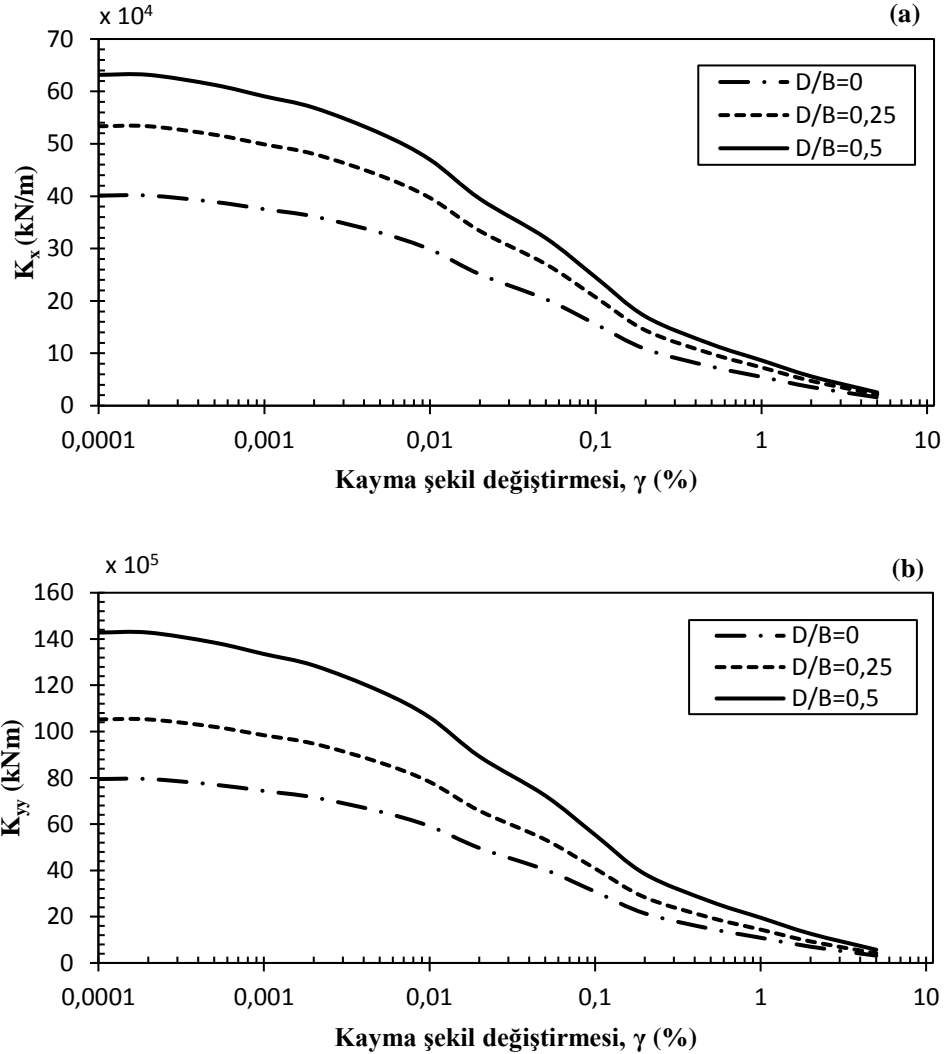
Şekil 4.28. Gevşek kumlu (Z3) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin linear bölgelere ayrılması

Kayma şekil değiştirmesinin referans aralıklarına (logaritmik) göre linear duruma getirilen eğrinin elde edilmesiyle değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri gevşek kumlu zemin için Tablo 4.9.'da verilmiştir.

Tablo 4.9. Gevşek kumlu (Z3) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri

Linear bölge	Referans aralığı	Denklem [$d_{(i)}$]
1	$\gamma \leq 0,00021$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = 1$
2	$0,00021 < \gamma \leq 0,0014$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1213 \times \log \gamma + 0,5538$
3	$0,0014 < \gamma \leq 0,005$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2713 \times \log \gamma + 0,1257$
4	$0,005 < \gamma \leq 0,1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,4150 \times \log \gamma - 0,2049$
5	$0,1 < \gamma \leq 1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,17 \times \log \gamma + 0,04$
6	$1 < \gamma$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,6989 \times \log \gamma + 0,04$

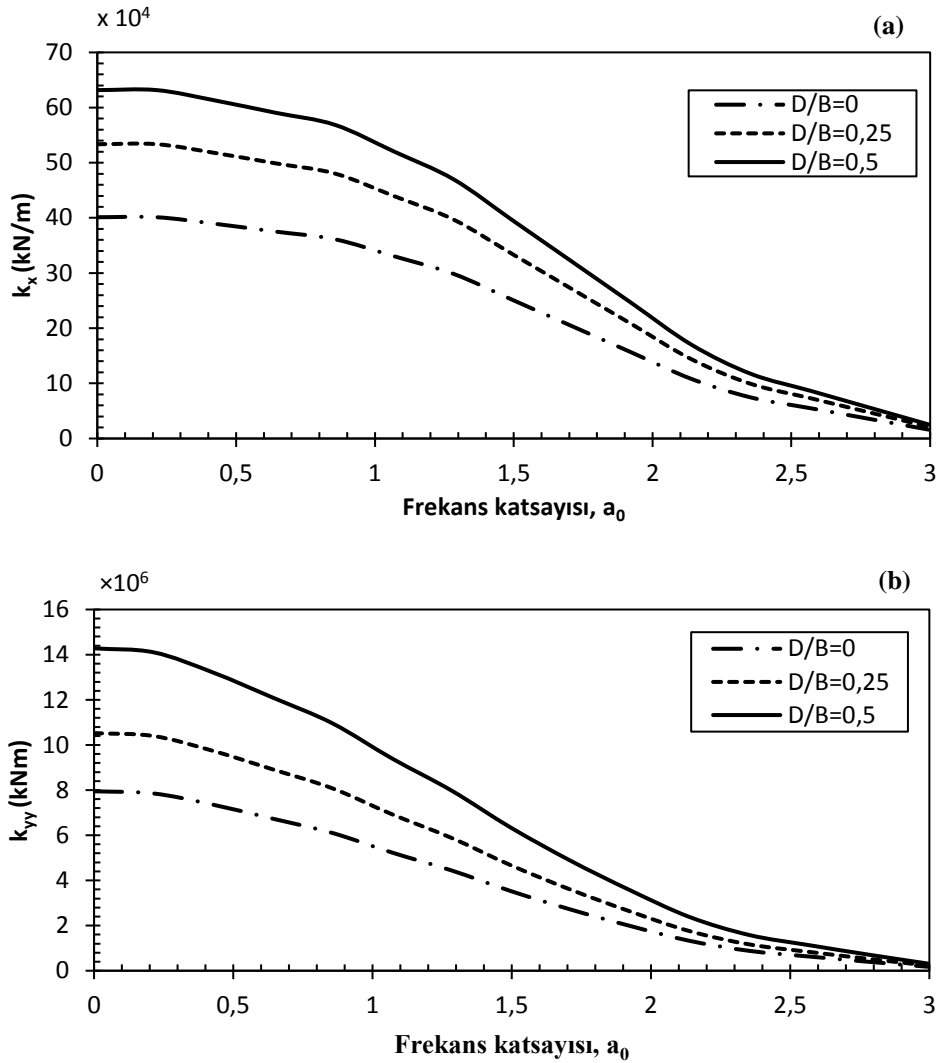
Şekil 4.29.'da ötelenme ve dönme davranışına karşı gelen statik rijitliklerin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi temelin gömülme oranına göre gösterilmiştir.



Şekil 4.29. D/B oranına göre gevşek kumlu zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

Ötelenme ve dönme titreşim modlarına karşı gelen statik rijitliklerin değerleri gömülme oranına bağlı olarak artmıştır. Zeminin kayma şekil değiştirme yüzdesi 0,01'den büyük olması durumunda statik rijitliklerin önemli derecede azalmaktadır. Ancak azaltılmış kayma modülü dikkate alındığında kullanılacak olan statik rijitlikler, orta derecede kayma şekil değiştirmelerde % 21 çok büyük şekil değiştirmelerde % 95 azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır.

Şekil 4.30.'da dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonların) ötelenme ve dönme modları için boyutsuz frekans parametresine bağlı ($0 \leq a_0 \leq 3$) değişimi temelin gömülme derinliğine (D/B) göre gösterilmiştir.

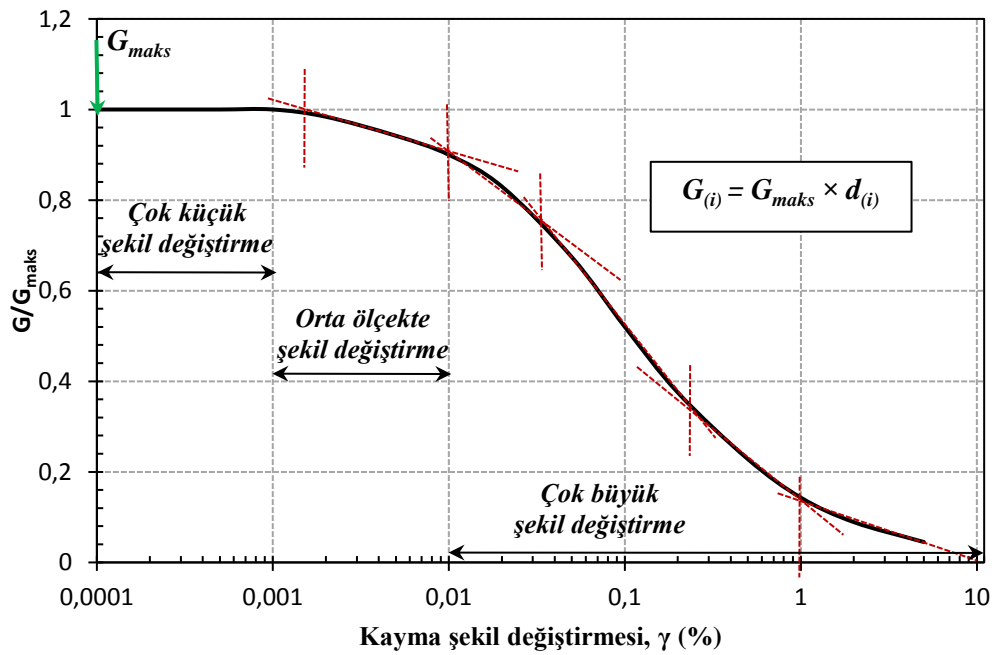


Şekil 4.30. Gevşek kumlu zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

Zeminin kaymaya karşı göstereceği direncin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalmasıyla ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) çok büyük şekil değiştirmelere neden olacak depremlerde kullanılacak olan dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonları), hesaplarda önemli derecede azaltılması gerektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Kayma modülü azalım eğrisi dikkate alındığında daha önce frekanstan bağımsız olarak elde edilen ötelenme modundaki dinamik rijitlik (Şekil 4.22.) burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı

Şekil 4.30.'dan anlaşılmaktadır. Özellikle $a_0 < 1,5$ olduğu aralıkta dinamik rijitlik değerlerinde ötelenme titreşim modu için % 26, dönme titreşim modu için % 44 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $a_0 > 1,5$ değerleri için gözlemlenen dinamik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modunda % 92, dönme titreşim modunda ise % 94 azalmıştır.

Sert kil zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır (Şekil 4.31.).



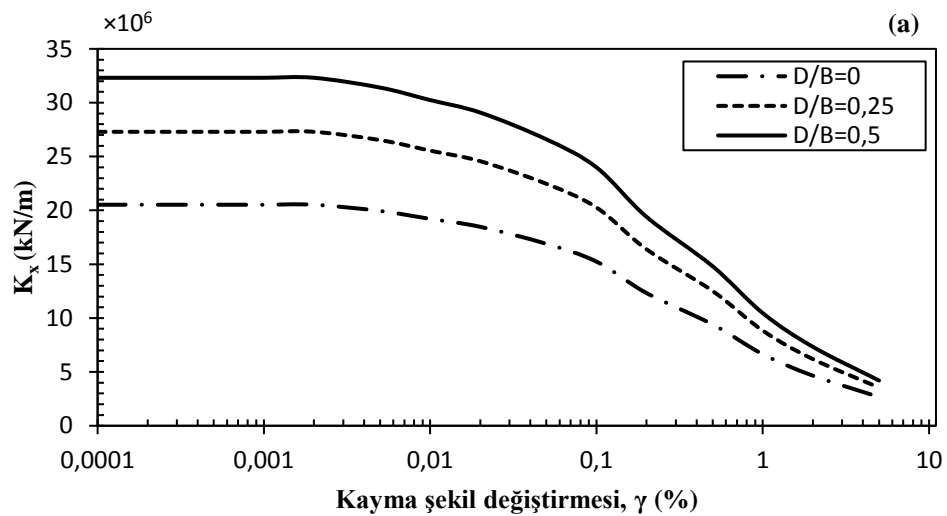
Şekil 4.31. Sert kil (Z1) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması

Kayma şekil değiştirmesinin referans aralıklarına (logaritmik) göre lineer duruma getirilen eğrinin elde edilmesiyle değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri sert kil zemin için Tablo 4.10.'da verilmiştir.

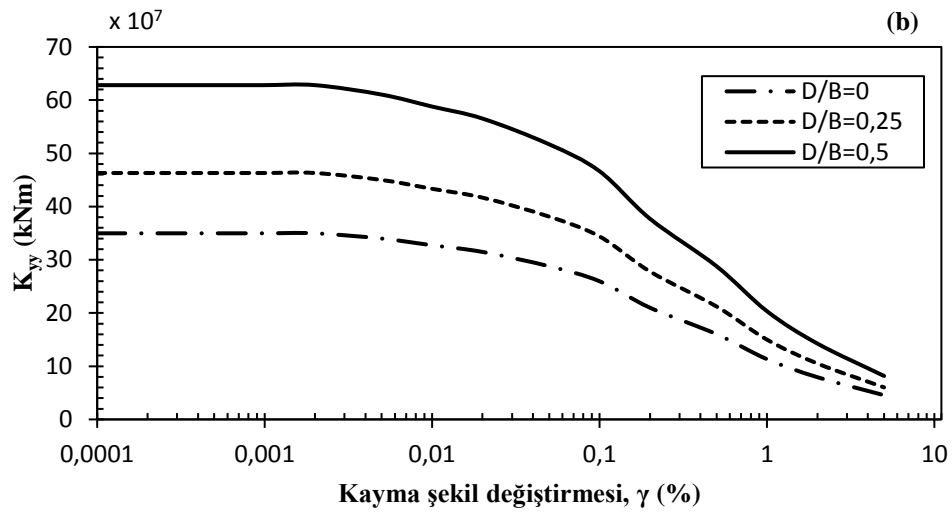
Tablo 4.10. Sert kil (Z1) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemi

Lineer bölge	Referans aralığı	Denklem [$d_{(i)}$]
1	$\gamma \leq 0,0016$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = 1$
2	$0,0016 < \gamma \leq 0,01$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1256 \times \log \gamma + 0,6488$
3	$0,01 < \gamma \leq 0,036$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2696 \times \log \gamma + 0,3608$
4	$0,036 < \gamma \leq 0,24$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,4976 \times \log \gamma + 0,0316$
5	$0,24 < \gamma \leq 1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,3388 \times \log \gamma + 0,1300$
6	$1 < \gamma$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1287 \times \log \gamma + 0,13$

Sert kil zemine oturan veya gömülen temellerin empedans fonksiyonlarına göre rijitliklerinin tanımlanmasında kullanılan ötelenme ve dönme titreşimlerine ait statik rijitliklerin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimleri Şekil 4.32.'de gösterilmiştir.



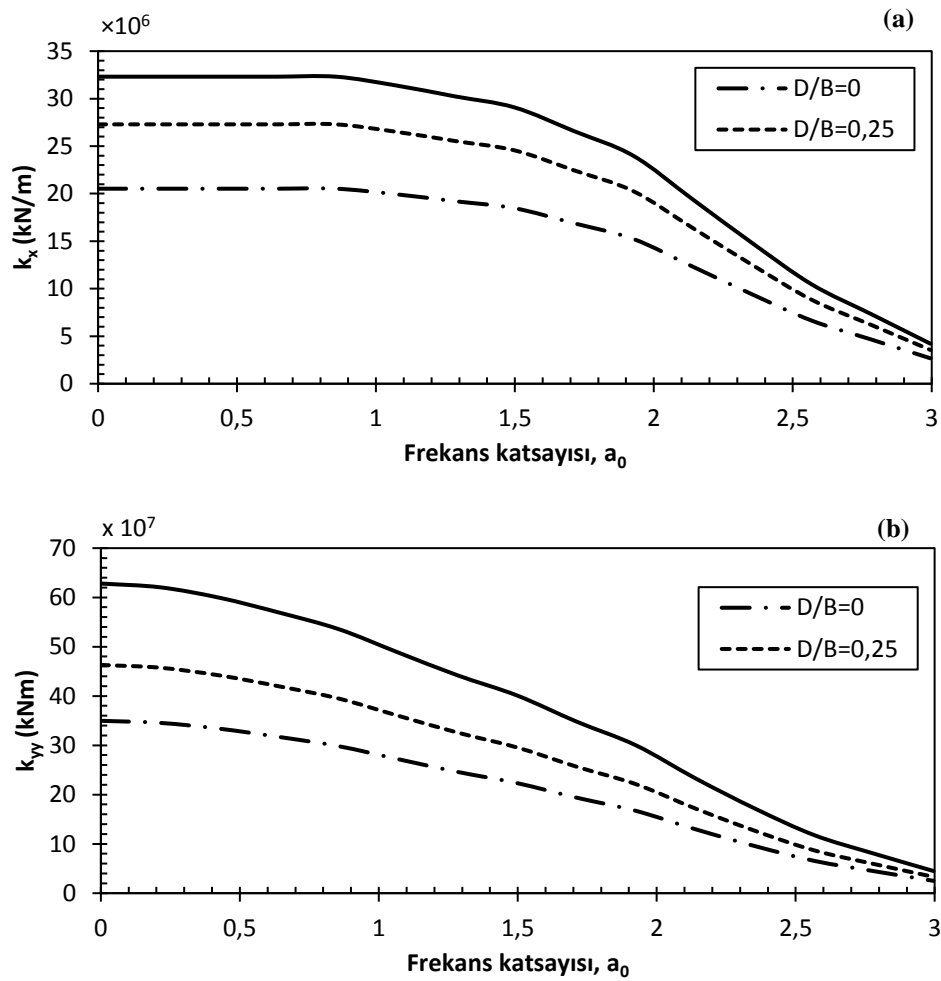
Şekil 4.32. D/B oranına göre sert kil zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)



Şekil 4.32. (Devamı)

Kayma modülü azalım (G_i/G_{maks}) eğrisine göre değişiklik gösteren statik rijitlikler sert kil zemin açısından incelendiğinde temelin gömülme oranı arttıkça ötelenme ve dönme titreşim modlarında artış gözlemlenmektedir. Zemin etütlerinde elde edilen maksimum kayma modülü doğrudan kullanıldığında çok küçük şekil değiştirmeler için büyük statik rijitlik değerleri kullanılır. Ancak azaltılmış kayma modülü dikkate alındığında kullanılacak olan statik rijitlikler, orta derecede kayma şekil değiştirmelerde % 7 çok büyük şekil değiştirmelerde % 86 azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır.

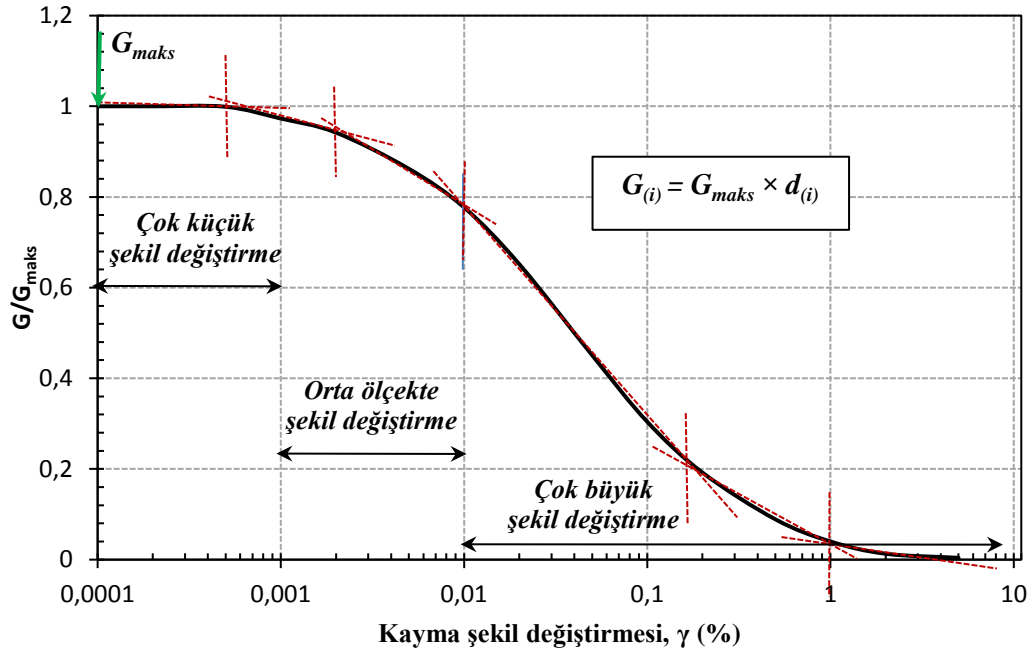
Şekil 4.33.'de dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonların) ötelenme ve dönme modları için boyutsuz frekans parametresine bağlı ($0 \leq a_0 \leq 3$) değimi gömülme derinliğine (D/B) göre gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Sert kil zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G(i) \neq G_{maks}$)

Zeminin kaymaya karşı göstereceği direncin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalmasıyla ($G(i) \neq G_{maks}$) çok büyük şekil değiştirmelere neden olacak depremlerde kullanılacak olan dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonları), hesaplarda önemli derecede azaltılması gerektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Kayma modülü azalım eğrisi dikkate alındığında daha önce frekansa bağımsız olarak elde edilen ötelenme modundaki dinamik rijitlik (Şekil 4.22.) burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı Şekil 4.33.'den anlaşılmaktadır. Özellikle $a_0 < 1,5$ olduğu aralıkta dinamik rijitlik değerlerinde ötelenme titreşim modu için % 6, dönme titreşim modu için % 30 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $a_0 > 1,5$ değerleri için gözlemlenen dinamik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modunda % 84, dönme titreşim modunda ise % 87 azalmıştır.

Yumuşak killi zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır (Şekil 4.34.).



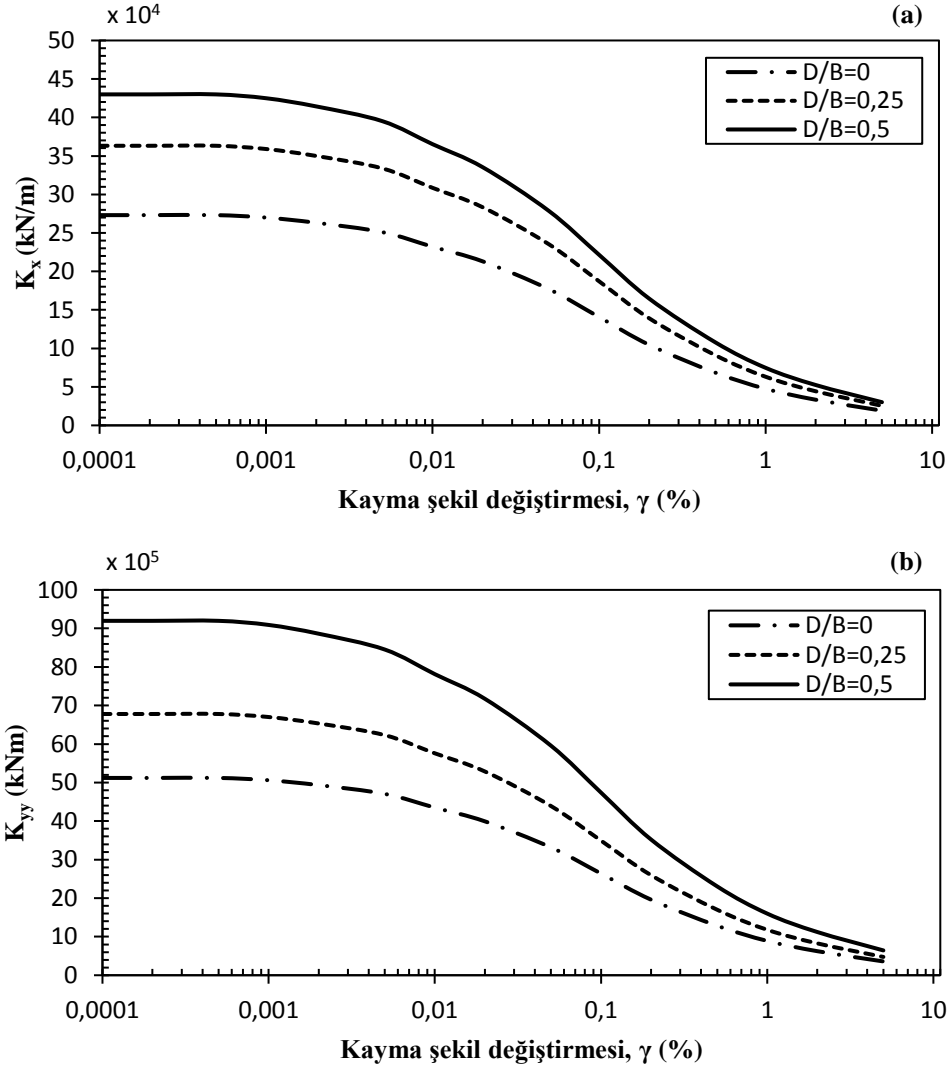
Şekil 4.34. Yumuşak kil (Z3) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin linear bölgelere ayrılması

Kayma şekil değiştirmesinin referans aralıklarına (logaritmik) göre linear duruma getirilen eğrinin elde edilmesiyle değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri yumuşak killi zemin için Tablo 4.11.'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Yumuşak killi (Z3) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri

Linear bölge	Referans aralığı	Denklem [$d_{(i)}$]
1	$\gamma \leq 0,00053$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = 1$
2	$0,00053 < \gamma \leq 0,002$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,0867 \times \log \gamma + 0,7159$
3	$0,002 < \gamma \leq 0,01$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2432 \times \log \gamma + 0,2936$
4	$0,01 < \gamma \leq 0,17$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,4632 \times \log \gamma - 0,1464$
5	$0,17 < \gamma \leq 1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1819 \times \log \gamma + 0,0700$
6	$1 < \gamma$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1001 \times \log \gamma + 0,07$

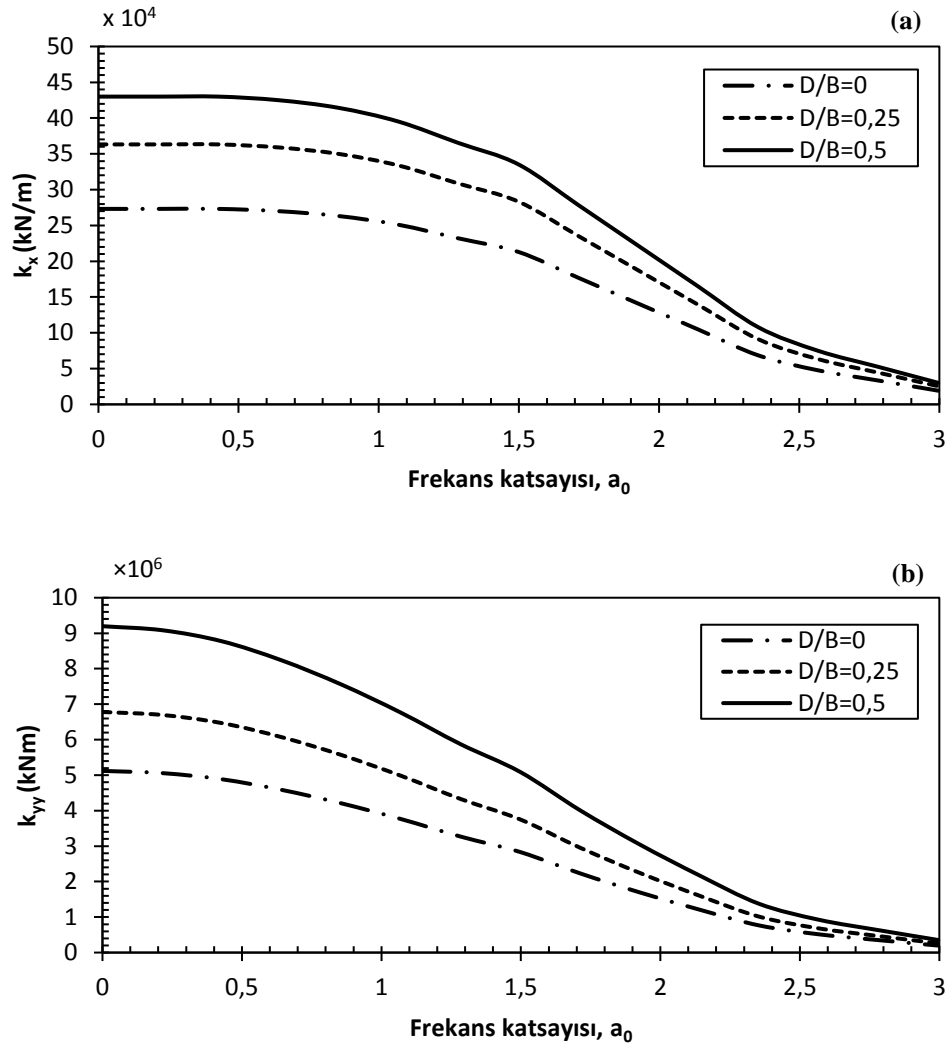
Şekil 4.35.'de ötelenme ve dönme davranışına karşı gelen statik rijitliklerin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi temelin gömülme oranına göre gösterilmiştir.



Şekil 4.35. D/B oranına göre yumuşak killi zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_y) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

Ötelenme ve dönme titreşim modlarına karşı gelen statik rijitliklerin değerleri gömülme oranına bağlı olarak artmıştır. Zeminin kayma şekil değiştirme yüzdesi 0,01'den büyük olması durumunda statik rijitliklerin önemli derecede azalmaktadır. Ancak azaltılmış kayma modülü dikkate alındığında kullanılacak olan statik rijitlikler, orta derecede kayma şekil değiştirmelerde % 21 çok büyük şekil değiştirmelerde % 92 azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır.

Şekil 4.36.'da dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonların) ötelenme ve dönme modları için boyutsuz frekans parametresine bağlı ($0 \leq a_0 \leq 3$) değişimi temel gömülme derinliğine (D/B) göre gösterilmiştir.



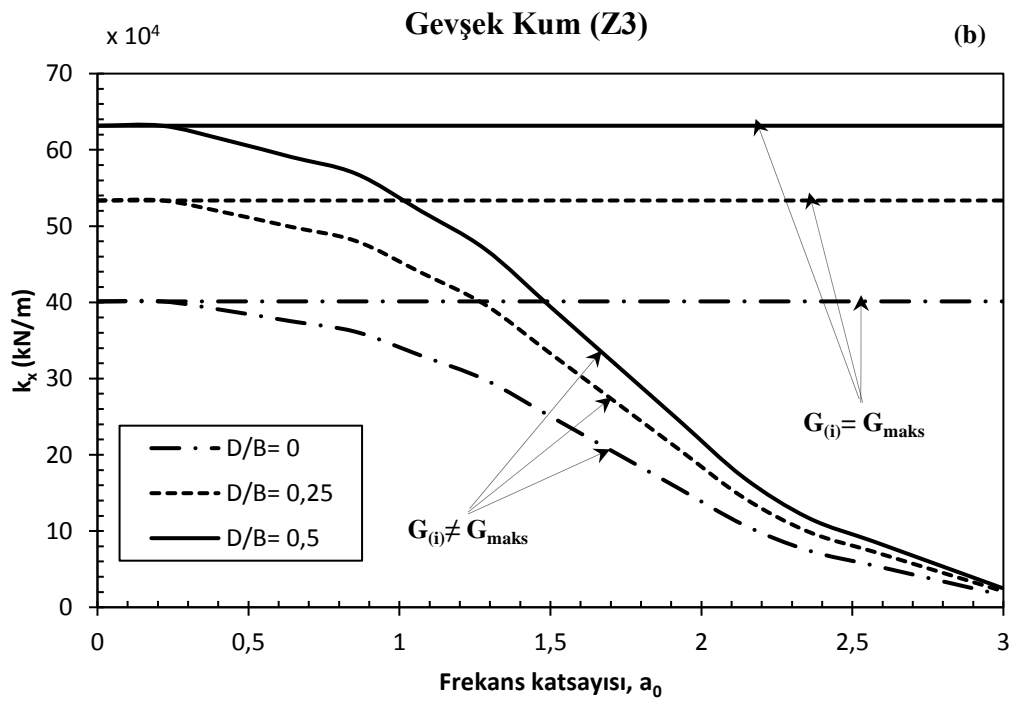
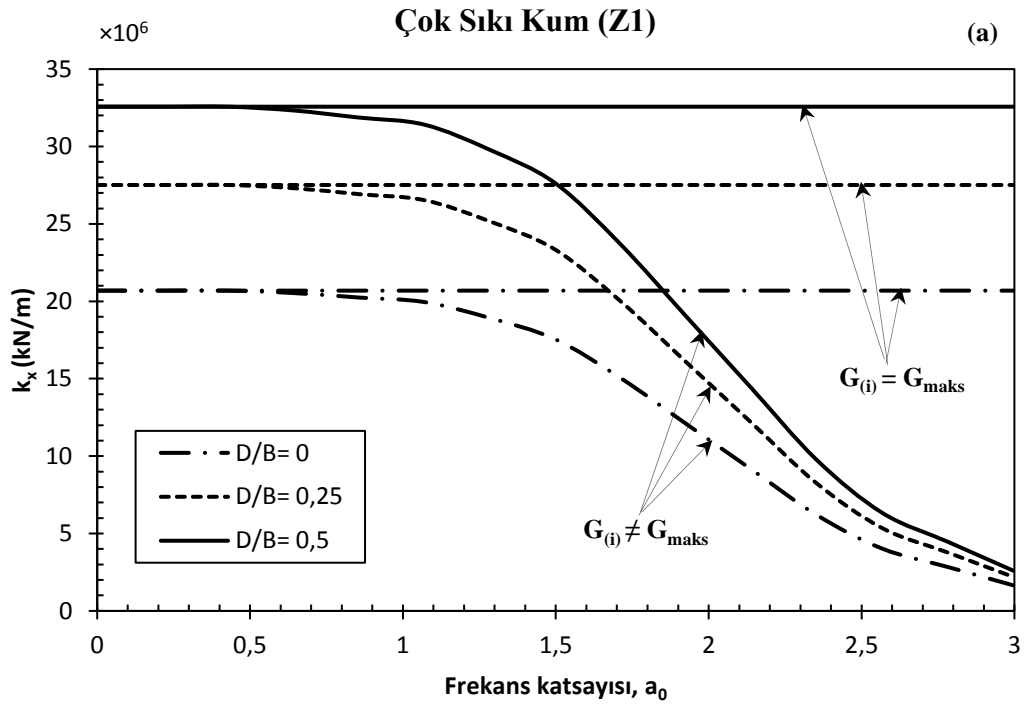
Şekil 4.36. Yumuşak killi zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

Zeminin kaymaya karşı göstereceği direncin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalmasıyla ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) çok büyük şekil değiştirmelere neden olacak depremlerde kullanılacak olan dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonları), hesaplarda önemli derecede azaltılması gerektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Kayma modülü azalım eğrisi dikkate alındığında daha önce frekanstan bağımsız olarak elde edilen ötelenme modundaki dinamik rijitlik (Şekil 4.22.) burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı

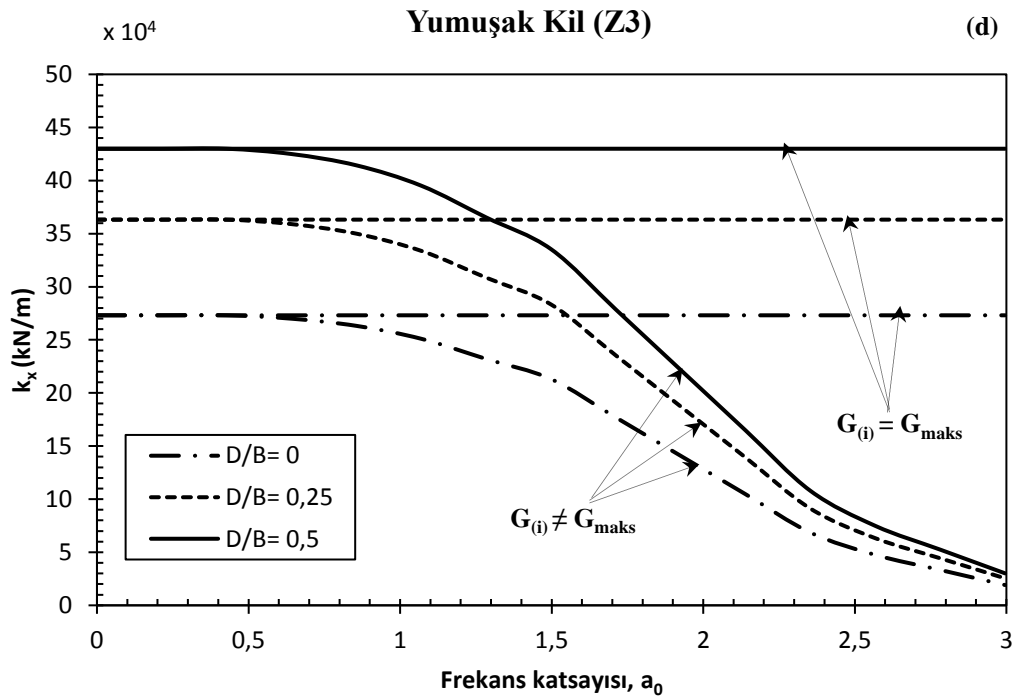
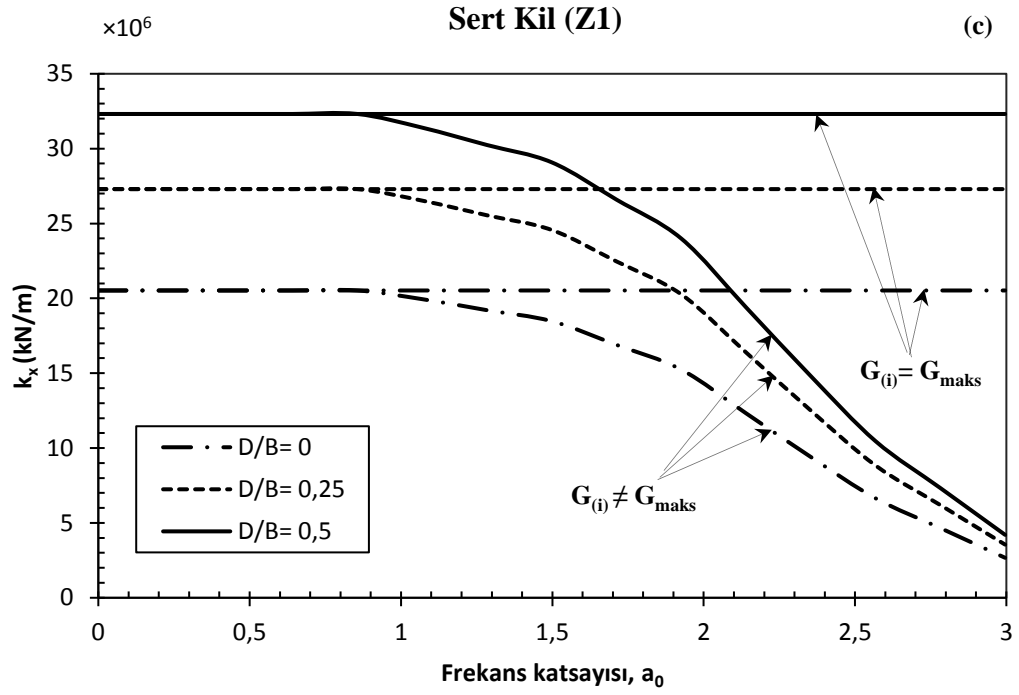
Şekil 4.36.'dan anlaşılmaktadır. Özellikle $a_0 < 1,5$ olduğu aralıkta dinamik rijitlik değerlerinde ötelenme titreşim modu için % 15, dönme titreşim modu için % 36 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $a_0 > 1,5$ değerleri için gözlemlenen dinamik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modunda % 89, dönme titreşim modunda ise % 91 azalmıştır.

Bu sayısal uygulamaların sonucunda anlaşılıyor ki zemin koşullarının temel ve dolayısıyla yapı titreşimleri üzerindeki etkisini zeminde büyük kayma şekil değiştirmelerine neden olacak tasarım depremleri için dikkatlice ele almak gerekir. Büyük kayma şekil değiştirmelere karşı gelen kayma rijitliğinin, dinamik empedans fonksiyonların hesabına katılması yapı-temel-zemin etkileşim problemlerinde önemli bir konudur.

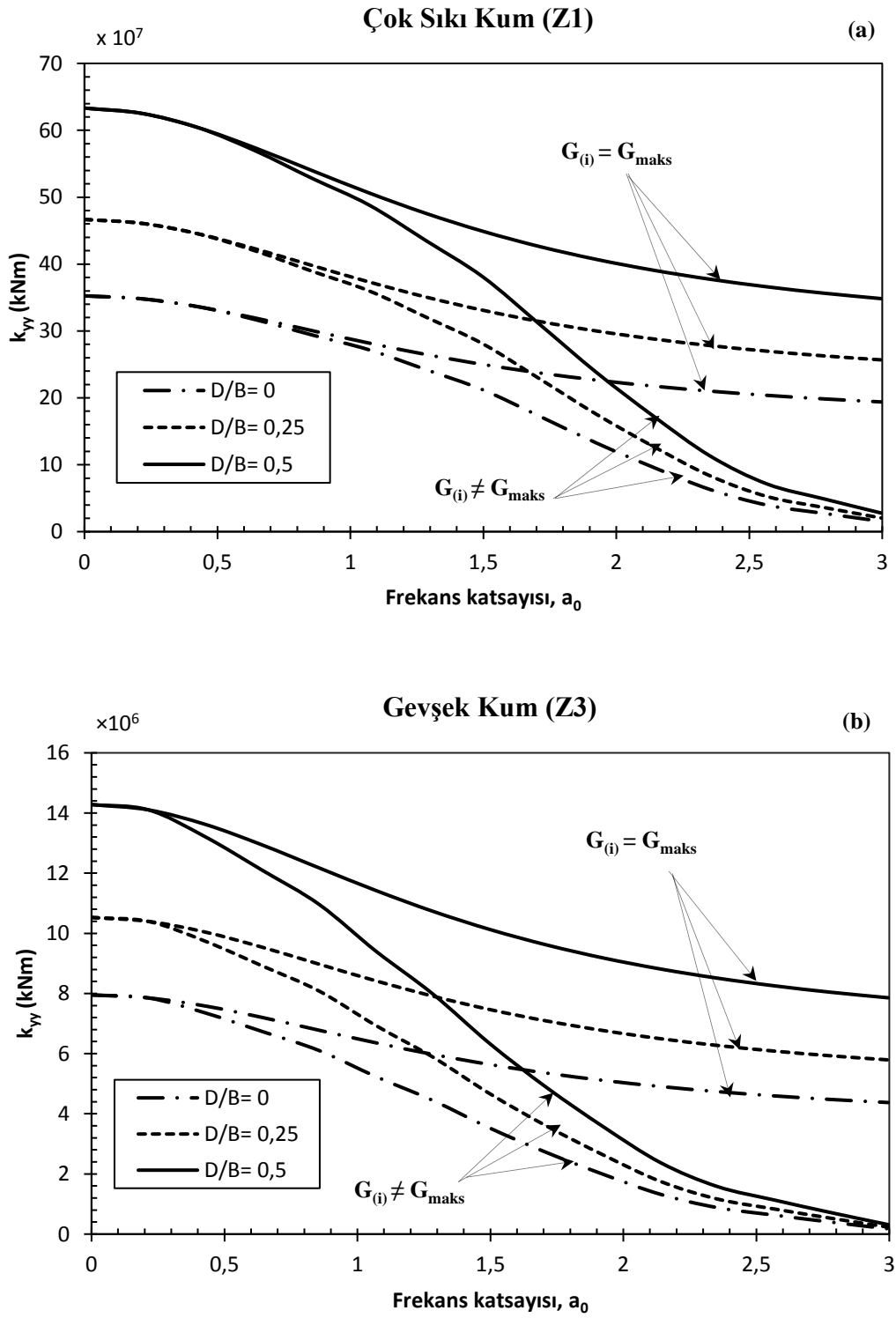
Zemin etütleri raporlarında zeminin küçük kayma şekil değiştirmesine karşı gelen zemin kayma modülünün verilmesi, tasarım depremine göre yapı-zemin etkileşim problemlerin çözümünde kullanılacak dinamik rijitliklerin yanıltıcı sonuç vermesine neden olabileceği ele alınan örneklerden açıkça görülmektedir. Kum ve killi zeminlerin iki farklı koşuluna oturan temelin gömülme oranına bağlı dinamik rijitliklerinin (empedans fonksiyonlarının) değişimleri sabit zemin kayma rijitliğine ($G_{(i)} = G_{maks}$) ve azaltılmış zemin kayma rijitliğine ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) göre geliştirilen MATLAB kodu çerçevesinde Şekil 4.37. ve Şekil 4.38.'de karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.



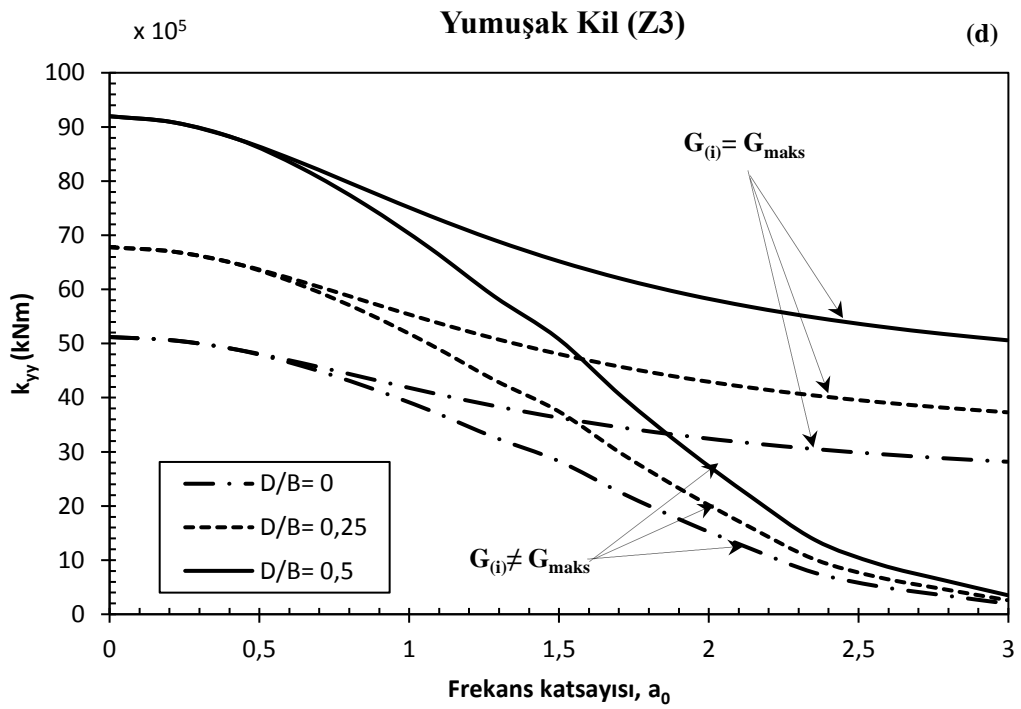
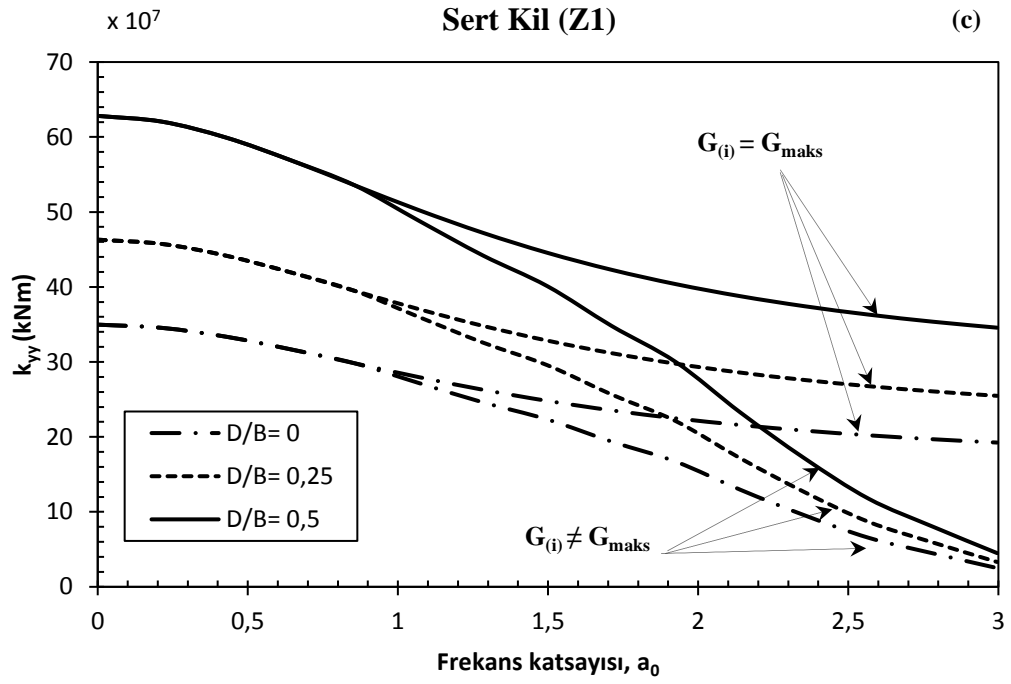
Şekil 4.37. Dört farklı yerel zemin koşulunda $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik ötelenme rijitliğinin (k_x) frekansa bağlı değişimi



Şekil 4.37. (Devamı)



Şekil 4.38. Dört farklı yerel zemin koşulunda $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik dönme rijitliğinin (k_{yy}) frekansa bağlı değişimi



Şekil 4.38. (Devamı)

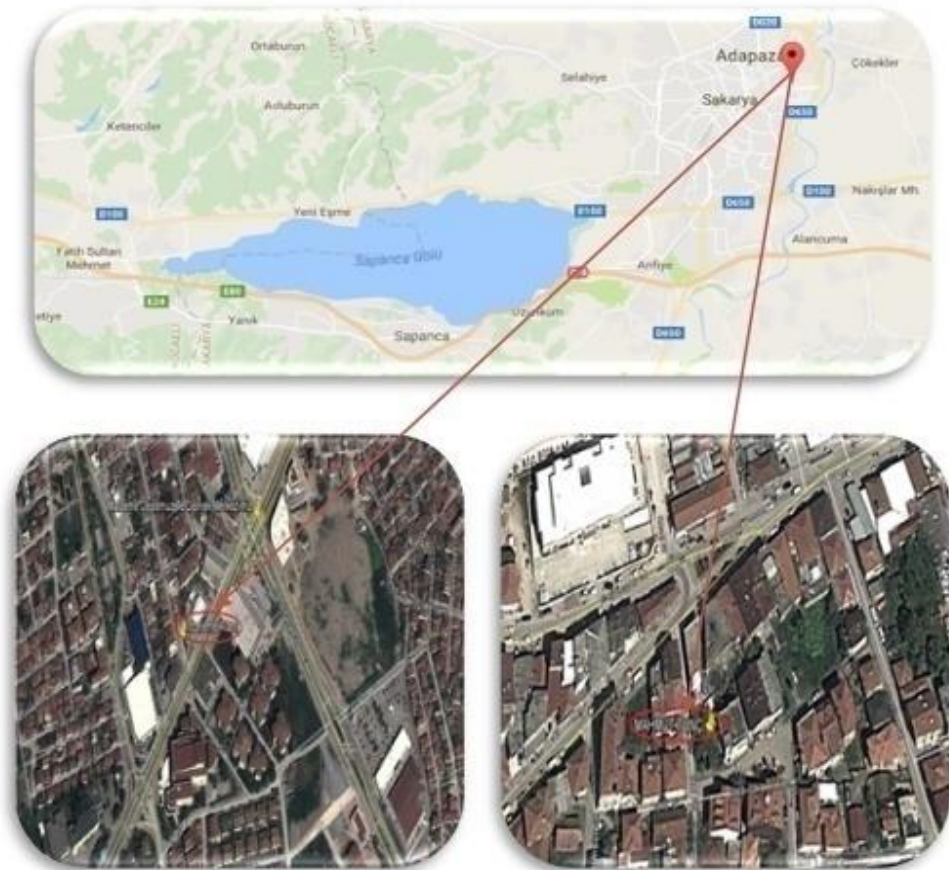
Kocaeli İzmit yerleşim bölgesinde seçilmiş bir arsaya ait zemin etüt verileri empedans fonksiyonlarının hesabında dikkate alındığında, çok küçük şekil değiştirmelerin ($10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$) söz konusu olduğu durumlarda zemin etütlerinde elde edilen kayma modülü doğrudan kullanılabilir. Orta derecede şekil değiştirmeleri ($10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-2}$) talep eden bir deprem için azaltılmış kayama modülü dikkate alınarak empedans fonksiyonları hesaplanır. Çok büyük şekil değiştirmelere ($10^{-2} < \gamma$) neden olan depremlerde ise kullanılacak olan empedans fonksiyonların önemli derecede azaltılması gerektiği ele alınan örneklerde görülmektedir. Zeminin kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin dinamik rijitlik (empedans fonksiyonları) üzerindeki etkisi Tablo 4.12.'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Dört farklı zemin türüne ait kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi (%)

Boyutsuz frekans parametresi	Çok sıkı kum		Gevşek Kum		Sert Kil		Yumuşak kil	
	k_x	k_{yy}	k_x	k_{yy}	k_x	k_{yy}	k_x	k_{yy}
a0								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,21	0	0	0	0	0	0	0	0
0,42	0	0	3	3	0	0	0	0
0,64	1	1	7	7	0	0	2	2
0,85	2	2	10	10	0	0	4	4
1,07	4	4	18	18	3	3	8	8
1,28	9	9	26	26	6	6	15	15
1,49	15	15	38	38	10	10	22	22
1,71	27	27	49	49	18	18	35	35
1,92	42	42	61	61	26	26	49	49
2,14	56	56	73	73	40	40	62	62
2,35	70	70	81	81	54	54	75	75
2,57	81	81	86	86	68	68	83	83
2,78	86	86	91	91	77	77	88	88
3	92	92	96	96	87	87	93	93

4.1.2. Köprü ayağı modelinde farklı plastisite indisine sahip sert ve yumuşak killi zeminler için Sakarya bölgesinde vaka analizi

Yerel zemin koşullarının deprem hareketine maruz yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin yapı-zemin-temel etkileşimi açısından inceleyebilmek için bu çalışmada özellikle geometrik sönüme odaklanmıştır. Düzlem dalga yayılım problemlerinde ötelenme ve dönme titreşim hareketine karşı gelen geometrik sönümün sismik kuvvetin titreşim frekansına bağlı değişimi örnek köprü ayağına ait temelin gömülme derinliğine ve farklı plastisite indisine sahip sert ve yumuşak olarak tanımlanan killi zeminler için elde edilmiştir. Sayısal analizlerde Sakarya bölgesine (Şekil 4.39.) ait zemin ve temel etüt raporundan alınan zemin mekanik özellikleri kullanılmıştır [97, 98].



Şekil 4.39. Adapazarı/Sakarya bölgesi yer bulduru haritası (Rapor, 2013, 2014)

Temel zemin etüt raporundan alınan killi zeminin iki farklı kıvamına ait zemin mekanik bilgileri Tablo 4.13.'de verilmiştir.

Tablo 4.13. Sakarya bölgesinde seçilen farklı kıvamlardaki killi zemin ortamının özellikleri

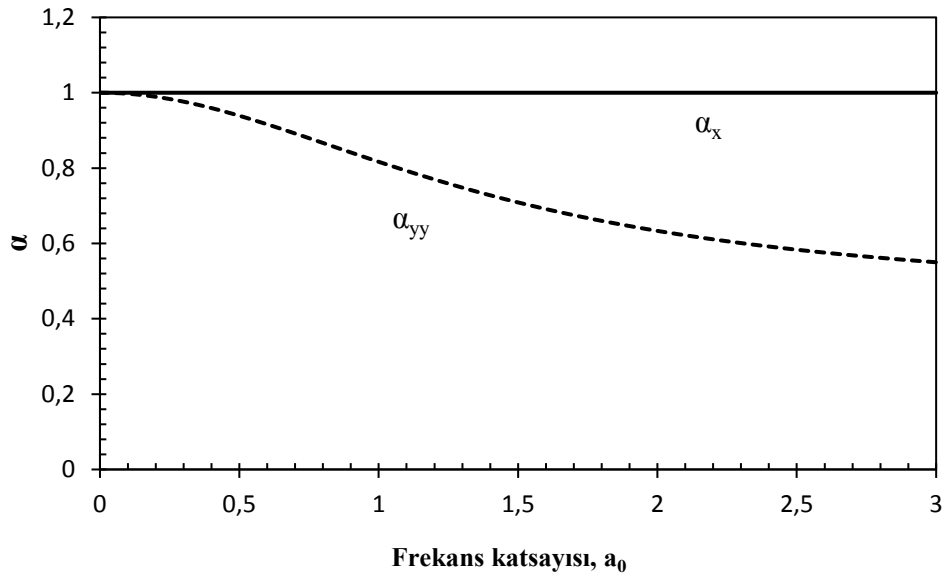
Zemin Grubu	Zemin Türü	Yerel zemin sınıfı	ρ [kN/m ³]	G [kN/m ²]	V _s [m/s]	ν	PI [%]	h ₁ [m]
D	Sert kil	Z3	13,4	46900	187	0,30	36	5,3
D	Yumuşak kil	Z3	14,5	27800	136	0,468	23	2

4.1.2.1. Yapı-zemin etkileşim probleminde geometrik sönüm etkisinin önemi

Temel-zemin etkileşim probleminin empedans fonksiyonlarına bağlı analizinde altsistem yaklaşımı ele alınarak MATLAB kodunda yazılmış bir çözüm algoritması Bölüm 3.'de sunulmuştur. Empedans fonksiyonların hesabına dayalı statik rijitliğin dinamik rijitliğe geçiş katsayısının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi temel hareketinin ötelenme (α_x) ve dönme (α_{yy}) bileşeni için geliştirilen kod EK B'de verilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca EK C'de verilen çözüm algoritmasında, ötelenme (β_x) ve dönme (β_{yy}) titreşim hareketine karşı gelen geometrik sönümün deprem yer hareketinin titreşim frekansına bağlı değişimi temelin gömülme derinliğine ve farklı kıvamlardaki killi zemin koşulları için incelenmiştir. Depremselliği yüksek ve zayıf zemin koşullarında inşa edilecek önemli mühendislik yapılarının deprem güvenliğinin sağlanmasında yapı-zemin etkileşiminin hesap sürecine katılmasının önemi vurgulanmıştır.

4.1.2.1.1. Dinamik rijitliğe geçiş çarpanının (α_x, α_{yy}) titreşim frekansına (a_0) bağlı değişimi

Statik rijitlikten dinamik rijitliğe geçiş katsayısının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi temel hareketinin ötelenme ve dönme bileşeni için elde edilen grafik Şekil 4.40.'da gösterilmiştir.



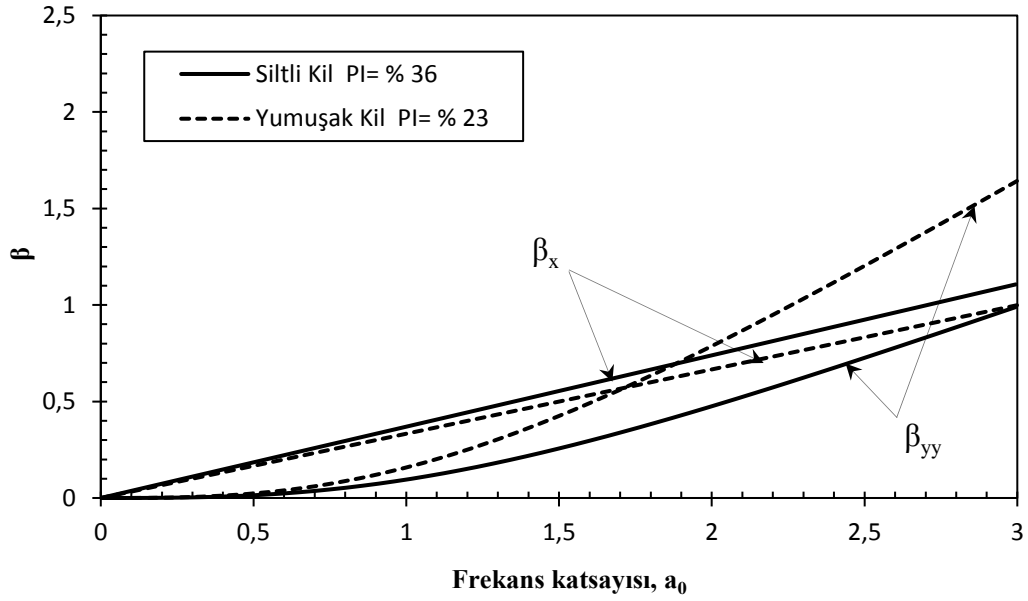
Şekil 4.40. Dinamik rijitliğe geçiş çarpanının α_x ve α_{yy} boyutsuz frekans parametresine göre değişimi

Ötelenme bileşeninin her iki farklı kıvamdaki kil için frekanstan bağımsız davranmaktadır. Dönme bileşenine ait geçiş katsayısı yüksek titreşim frekanslarında önemli derecede azalmaktadır. Boyutsuz frekans parametresinin $a_0=3$ olması durumunda temelin dönme titreşimine karşı gelen dinamik rijitlik, statik rijitliğin % 50 civarında azaldığı elde edilen sayısal sonuçlardan görülmektedir.

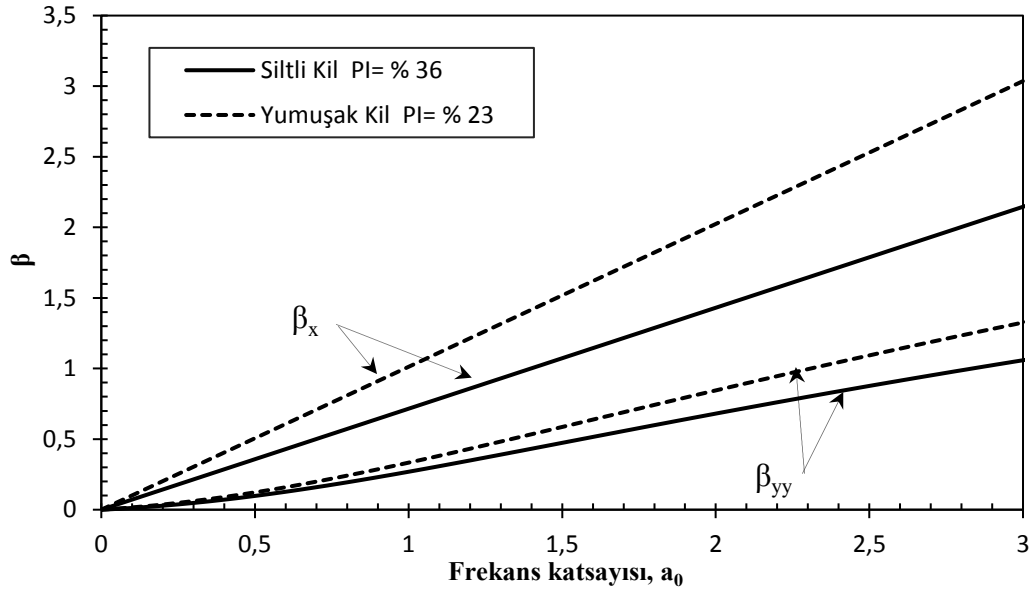
4.1.2.1.2. Temel gömülme derinliğinin ötelenme (β_x) ve dönme (β_{yy}) titreşimlerine karşı gelen geometrik sönüme etkisi

Altsistem yöntemine dayalı geliştirilen MATLAB çözüm algoritmasında, ötelenme (β_x) ve dönme (β_{yy}) titreşim hareketine karşı gelen geometrik (radyasyon) sönümün deprem yer hareketinin titreşim frekansına bağlı değişimi temelin gömülme derinliğine ve farklı kıvamlardaki killi zemin koşulları için incelenmiştir. Yapıyı titreştiren enerjinin zeminin sonsuzluğu nedeniyle kaybolmasını anlatan geometrik sönüm, elastik zemin davranışı varsayımı altında değerlendirilmiştir.

Temelin ötelenme ve dönme titreşim hareketine karşı gelen farklı kıvam indeksine sahip killerdeki geometrik sönümün titreşim frekansına bağlı değişimi yüzeysel ($D/B=0$) temel için Şekil 4.41.'de ve gömülü temeller ($D/B=1$) için Şekil 4.42.'de ayrı ayrı elde edilerek gösterilmiştir.



Şekil 4.41. Yüzeysel temelin ötelenme ve dönme titreşimine karşı gelen geometrik sönümün β_x ve β_{yy} boyutsuz frekans parametresine göre değişimi (D/B=0)



Şekil 4.42. Gömülü temelin ötelenme ve dönme titreşimine karşı gelen geometrik sönümün β_x ve β_{yy} boyutsuz frekans parametresine göre değişimi (D/B=1)

Elde edilen grafikler karşılaştırıldığında temelin gömülme derinliğinin geometrik sönümü önemli derecede etkilediği görülmektedir. Gömülme derinliğine bağlı olarak geometrik sönüm her iki kil grubu için frekansla birlikte artmıştır. Kilin plastisite indisi arttıkça, temelin ötelenme ve dönme titreşim hareketini sönümleyen enerjiyi temsil eden radyasyon sönümü büyümüştür.

Yapı-temel-zemin etkileşiminin dikkate alındığı özel mühendislik problemlerinin analizinde empedans fonksiyonlarına bağlı altsistem yaklaşımı kullanıldığında statik rijitlikler yüksek frekans değerlerinde yetersiz kalabilmektedir. Titreşim frekansına bağlı dinamik rijitlik terimlerini kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir. Dinamik etkileşim problemlerinde temel ortamının toplam sönümü geometrik sönümden önemli derecede temelin gömülme derinliğine ve zemin koşullarına bağlı olarak etkilenmektedir.

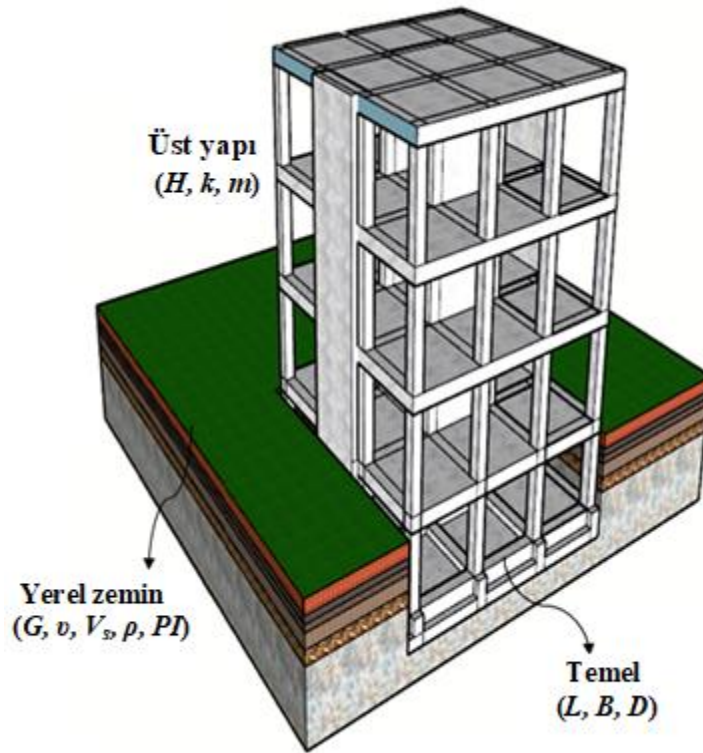
4.2. Örnek Binaya Ait Sürekli Temel-Zemin Etkileşim Modelinin Kurulması

Depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen çok katlı rijit taşıyıcı sistemli konut binaların günümüzde aktif deprem bölgelerinde ve zayıf zemin koşullarında kurulması zorunluluğu bulunmaktadır. Buna karşılık sismik analizlerde yapı-zemin dinamik etkileşimi probleminin çözüm sürecine katılarak yapıların deprem performansları daha ayrıntılı bir şekilde ele alınıp depreme karşı tam güvenlik, doğruluk düzeyi yüksek matematik modeller kullanılarak sağlanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, deprem yönetmeliğinde verilen zemin gruplarına göre tanımlanmış yerel zemin sınıflarına uygun zeminler İstanbul bölgesinden seçilerek, sürekli temele (ST1 ve ST2) sahip yapı modelinin empedans fonksiyonlarına bağlı geliştirilen çözüm algoritması değişen kayma modülü kapsamında incelenmiştir. Yapı temelini oturduğu farklı yerel zemin koşulları için elde edilen statik rijitlik ve dinamik rijitlikler (empedans fonksiyonları) ilk olarak doğrudan arazi çalışmalarından küçük şekil değiştirmelere karşı gelen kayma modülüne (G_{maks}) göre hesaplanmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasında büyük kayma şekil değiştirmelerine göre değişen kayma modülü dikkate alınarak zemin rijitlikleri bulunmuştur. Farklı kıvamlı killi zeminler için değerlendirilen sürekli temellerin ötelenme ve dönme titreşim modlarına karşı gelen statik ve dinamik rijitliklerin temelin gömülme oranlarına bağlı değişimi zemin kayma modülünün sabit ve kayma şekil değiştirmesine göre $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için ayrı ayrı geliştirilen MATLAB kod yardımıyla incelenmiştir ve aralarındaki fark karşılaştırmalı olarak

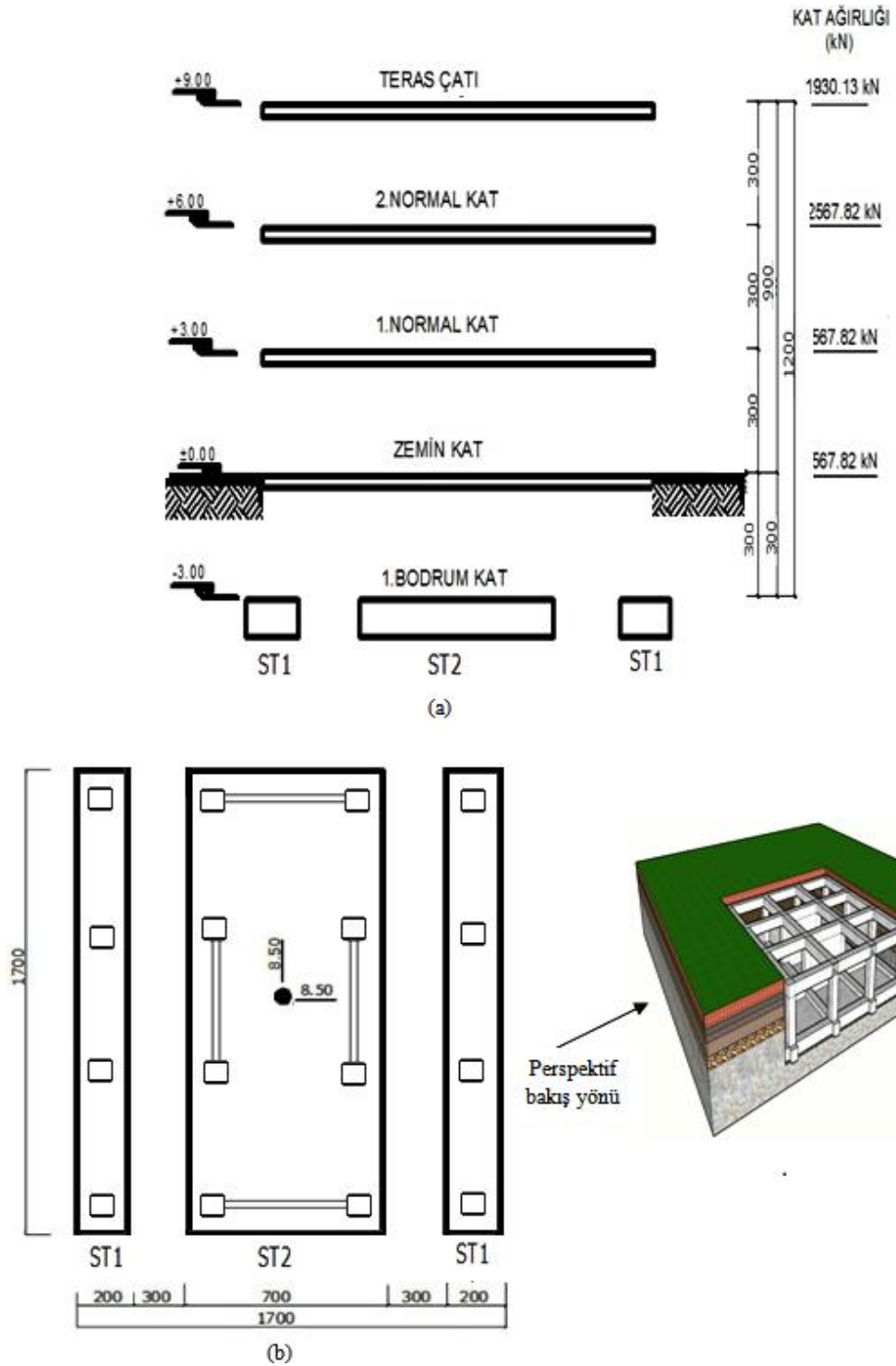
sunulmuştur. Parametrik araştırmalar Bölüm 3’de verilen çözüm algoritmasına dayalı MATLAB paket programında geliştirilen kod (EK C) ile gerçekleştirilmiştir.

Gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir. Bu çalışmanın sonuçları yapı mühendislerine yapı-zemin dinamik etkileşiminin dahil edildiği ileri düzey problemlerin deprem analizinde geoteknik parametrelerin doğru yorumlanması hakkında pratik bilgiler sunmak üzere önem taşımaktadır. Yerel zemin koşullarının yapının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelendiği yapı-temel-zemin etkileşim problemlerinde altsistem yaklaşımı kullanılarak geliştirilen matematik model yapısal ve geoteknik parametrelere bağlı ele alınmaktadır. Sayısal analiz çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi için geliştirilmiş olan yapı-temel-zemin modeli Şekil 4.43.’de üç boyutlu olarak gösterilmektedir.



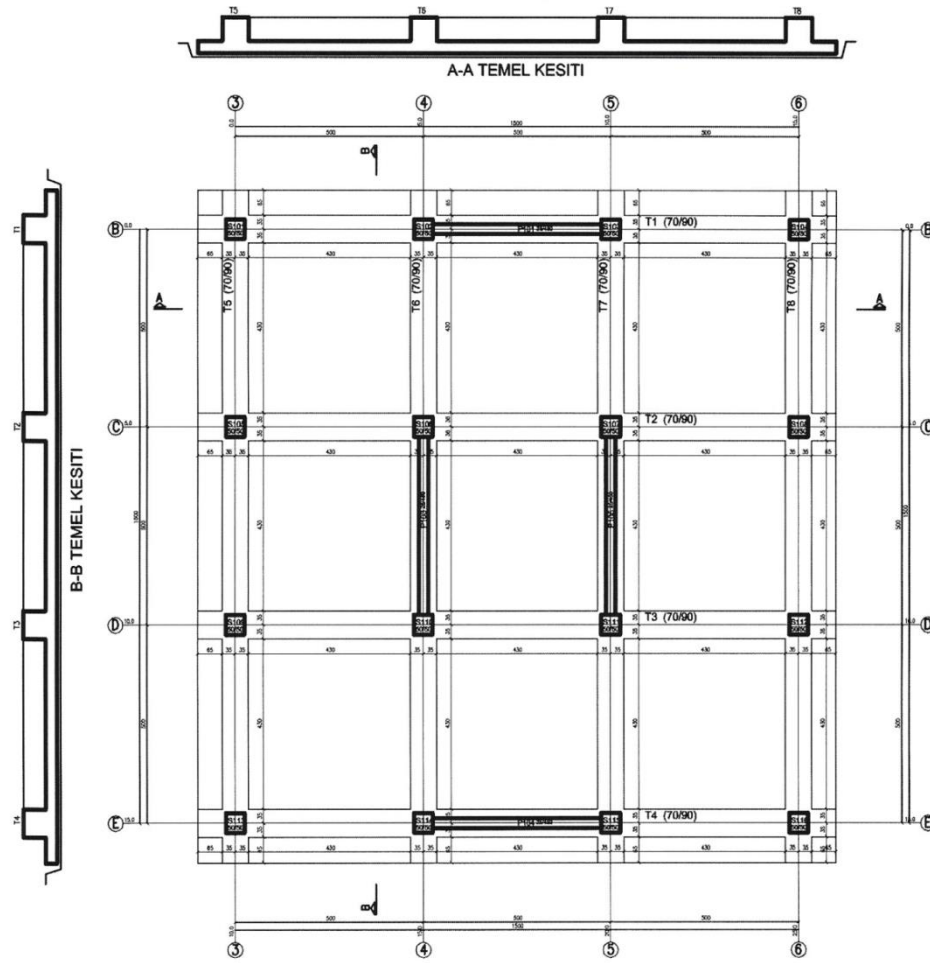
Şekil 4.43. Üç boyutlu yapı-temel-zemin modeli

Temel-zemin birlikteliğinin sayısal uygulamalarında kullanılan örnek betonarme bina modelin plan görünüşü Şekil 4.44.’de tüm geometrik boyutlarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 4.44. Kat planı ve sürekli temel planının boyutlandırılması

Sayısal analizlerinde dikkate alınan sürekli temel planı Şekil 4.45’de verilmektedir. Söz konusu yapının temel kalıp planında 3-3 ve 6-6 aksları ST1 olarak tanımlanan sürekli temelleri 4-4 ve 5-5 akslarındaki perde elemanları kapsayan akslar ST2 olarak tanımlanan sürekli temeli yansıtmaktadır.



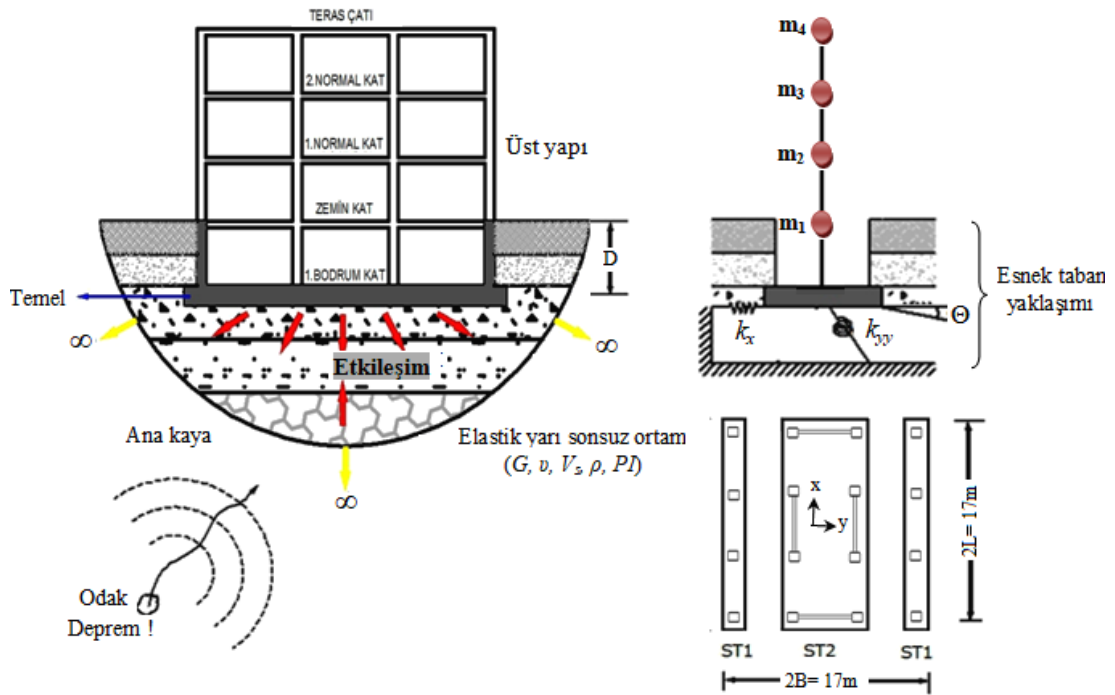
Şekil 4.45. Temel kalıp aplikasyon planı

Sayısal uygulamalarda kullanılan sürekli temele sahip bina modelinin mekanik ve geometrik özellikleri Tablo 4.14.'de özetlenmiştir.

Tablo 4.14. Sürekli temele sahip bina modelinin mekanik ve geometrik özellikleri

Parametre	Sembol	Birim	Büyükük
Yapı ağırlığı	W	kN	9633,59
Yapının yüksekliği	H	m	12
ST1 ve ST2 temel uzunlukların yarısı	L	m	8,5
ST1 ait temel genişliğin yarısı	B	m	1
ST2 ait temel genişliğin yarısı	B	m	3,5
Zemine rijit bağlı sistemin periyodu	T	s	0,15
Açısal frekans	ω	rad/s	41,89

Zemin koşullarının yapı temeli üzerindeki etkilerini, dolayısıyla bina davranışındaki etkilerini sayısal uygulamalarda gösterebilmek için dört katlı bina temeli örnek olarak seçilmiştir (Şekil 4.46.). Söz konusu sürekli temellerin (ST1 ve ST2) x eksenine doğrultusundaki ötelenme ve y eksenine etrafındaki dönme rijitlikleri temelin gömülme oranına (D/B) bağlı elde edilmiştir. Örnek yapıya ait sürekli temellerin (ST1 ve ST2) geometrik parametreleri B ve L, sırasıyla temelin y doğrultusundaki yarı genişliğini ve x doğrultusundaki yarı uzunluğunu temsil etmektedir. Zemin tepki analizi çalışmalarında yerel zemin; lineer elastik, homojen, izotrop, ve yarı sonsuz bir ortam olarak kabul edilmiştir. Rijit kütsüz temel plağının oturduğu zeminin dikkate alınan özellikleri; kayma modülü (G), Poisson oranı (ν), kayma dalga hızı (V_s), birim hacim ağırlığı (ρ) ve plastisite indisi (PI) parametrelerini kapsamaktadır.



Şekil 4.46. Örnek 4 katlı bina modelinde yapı-temel-zemin ortak sisteminin genel yapısı

4.2.1. Bina temeli modelinde farklı plastisite indislerine sahip killi zemin için İstanbul bölgesinde vaka analizi

Çalışma konusunda önemli bir yer tutan inceleme alanı, depremselliği bakımından 1. dereceden tehlikeli deprem bölgesi olan İstanbul ele alınmıştır. Sayısal analizlerde

İstanbul ilinin Kadıköy ilçesine (Şekil 4.47.) ait zemin ve temel etüt raporundan alınan zemin mekanik özellikleri kullanılmıştır [99]. Farklı kıvamlardaki killi zemin ortamına ait bilgiler Tablo 4.15.'de verilmiştir.



Şekil 4.47. Kadıköy/İstanbul bölgesi yer bulduru haritası (Rapor, 2016)

Tablo 4.15. İstanbul bölgesine ait farklı kıvamlardaki killi zemin ortamının özellikleri

Zemin Grubu	Zemin Türü	Yerel zemin sınıfı	ρ [kN/m ³]	G [kN/m ²]	V_s [m/s]	ν	PI [%]	h_1 [m]
C	Katı kil	Z2	13,95	83000	244	0,226	16	3,5
D	Yumuşak kil	Z3	14,27	52600	192	0,388	13	2,5

4.2.1.1. Farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı elde edilen empedans fonksiyonları ($G_{(i)}= G_{maks}$)

Yapı ile zeminin etkileşimini altsistem yaklaşımına dayalı olarak temel-zemin arakesitinde temsil eden empedans fonksiyonları farklı zemin koşullarına göre elde etmek için MATLAB dilinde bir çözüm algoritması geliştirilmiştir (Bölüm 3). Parametrik araştırmaları sayısal bir örnek üzerinden gerçekleştirebilmek için İstanbul bölgesi Kadıköy tarafında seçilmiş bir arazinin zemin etüt raporlarından yararlanılmıştır. Söz konusu rapordaki farklı kıvamlardaki killi zemin parametreleri dikkate alınmıştır.

Farklı kıvamlardaki killi zemine oturan sürekli temellerin ötelenme ve dönme titreşim moduna karşı gelen statik rijitlikler ($a_0=0$) temelin gömülme oranına bağlı elde edilerek Tablo 4.16. ve 4.17.'da verilmiştir.

Tablo 4.16. Farklı kıvamlardaki killi zeminde ötelenme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_x) temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi

Sürekli temel	Yerel zemin sınıfı	Ötelenme statik rijitlikler [kN/m]		
		Temelin gömülme oranı		
		D/B=0	D/B=0,25	D/B=0,5
ST1	Katı kil (Z2)	$1,3910 \times 10^6$	$1,6071 \times 10^6$	$1,7673 \times 10^6$
	Yumuşak kil (Z3)	$9,7008 \times 10^5$	$11,2080 \times 10^5$	$12,3250 \times 10^5$
ST2	Katı kil (Z2)	$2,3754 \times 10^6$	$2,9402 \times 10^6$	$3,3588 \times 10^6$
	Yumuşak kil (Z3)	$1,6566 \times 10^6$	$2,0506 \times 10^6$	$2,3425 \times 10^6$

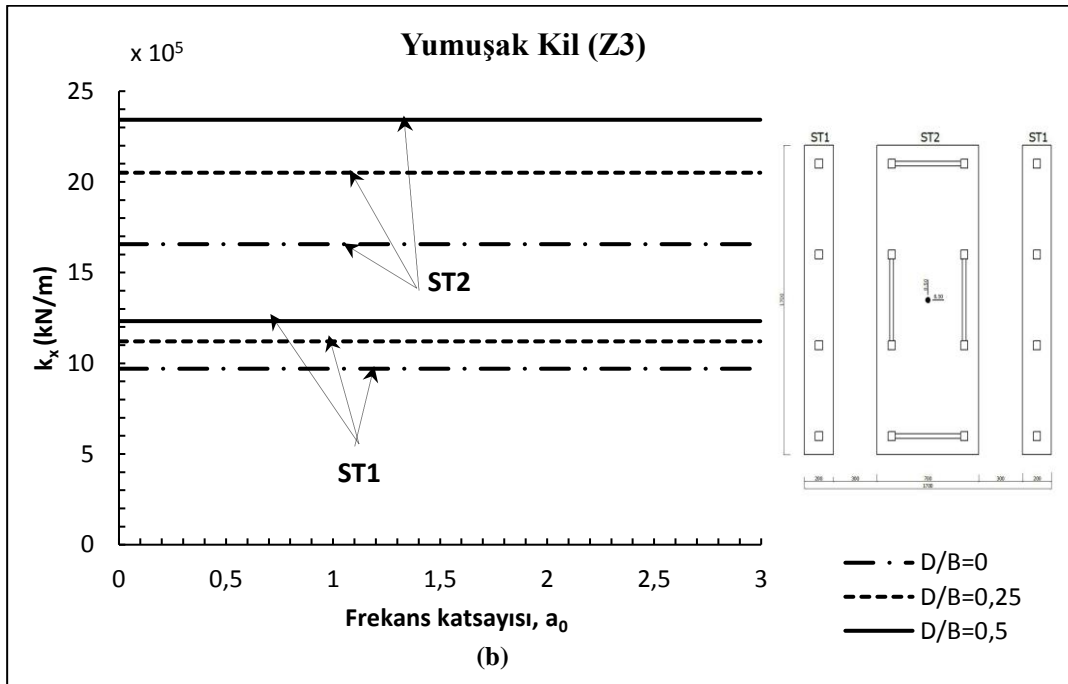
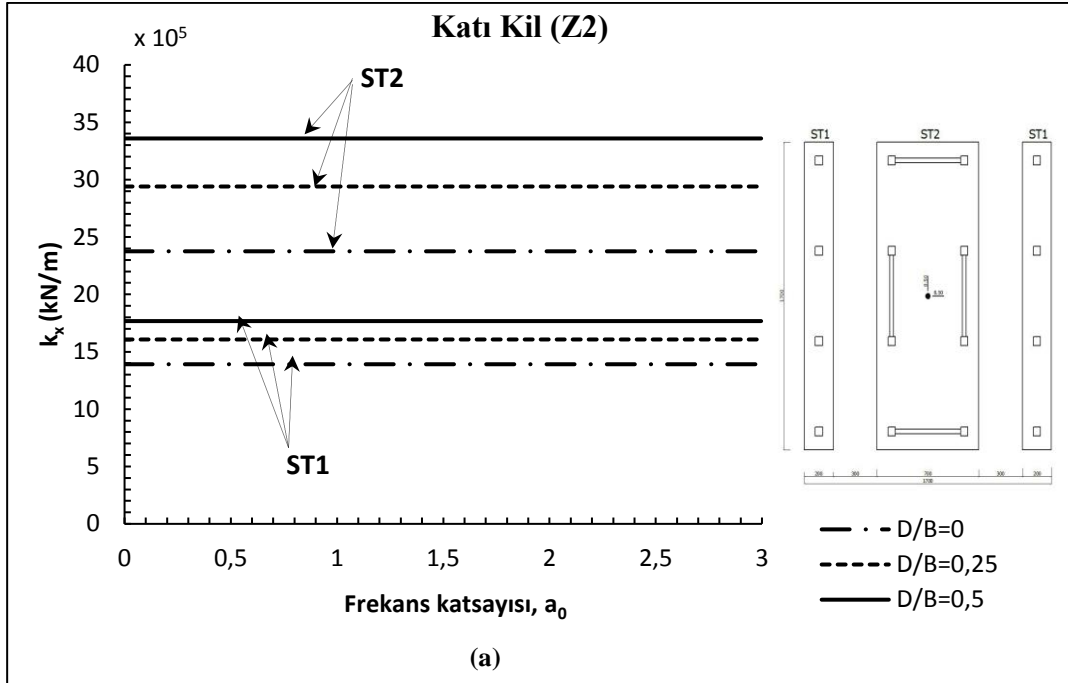
Tablo 4.17. Farklı kıvamlardaki killi zeminde dönme titreşim modu için statik rijitliklerin (K_{yy}) temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi

Sürekli temel	Yerel zemin sınıfı	Dönme statik rijitlikler [kNm]		
		Temelin gömülme oranı		
		D/B=0	D/B=0,25	D/B=0,5
ST1	Katı kil (Z2)	$6,8051 \times 10^7$	$8,5065 \times 10^7$	$10,2080 \times 10^7$
	Yumuşak kil (Z3)	$5,4542 \times 10^7$	$6,8179 \times 10^7$	$8,1818 \times 10^7$
ST2	Katı kil (Z2)	$1,4548 \times 10^8$	$1,8227 \times 10^8$	$2,1988 \times 10^8$
	Yumuşak kil (Z3)	$1,1660 \times 10^8$	$1,4609 \times 10^8$	$1,7623 \times 10^8$

Farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında ötelenme ve dönme titreşim modları için sürekli temelin (ST1 ve ST2) gömülme oranına bağlı değişimleri incelendiğinde temel boyutlarının büyümesi ve temelin gömülme derinliğinin artması statik rijitliklerin (K_x ve K_{yy}) artmasına neden olmaktadır. Katı killi zemin koşulundan yumuşak killi zemin türüne geçtikçe (kıvamın azalması) statik rijitliklerin ötelenme titreşim modu için % 30 azalma gözlemlenirken dönme titreşim modu için ise % 20 azalma meydana gelmektedir.

Killi zeminlerde gömülme derinliğine bağlı elde edilen sayısal sonuçlar sürekli temellerin boyutlarına göre değerlendirildiğinde, ST1 olarak tanımlanan temeller için statik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modu için % 27 artış gösterirken, dönme titreşim modunda % 50 artış meydana gelmiştir. Taban alanı daha büyük olan ST2 temeli için bu rijitlik değerleri ötelenme davranışında % 40 artarken, dönme davranışında % 51'e kadar ulaşmıştır. Buradan da anlaşılıyor ki temel genişliğinin artması statik rijitliklerin gömülme derinliğiyle birlikte artmasına sebep olmuştur. Ayrıca dönme titreşim modu (K_{yy}) için statik rijitliklerin sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi ötelenme titreşim moduna (K_x) göre daha fazla etkili olduğu görülmektedir.

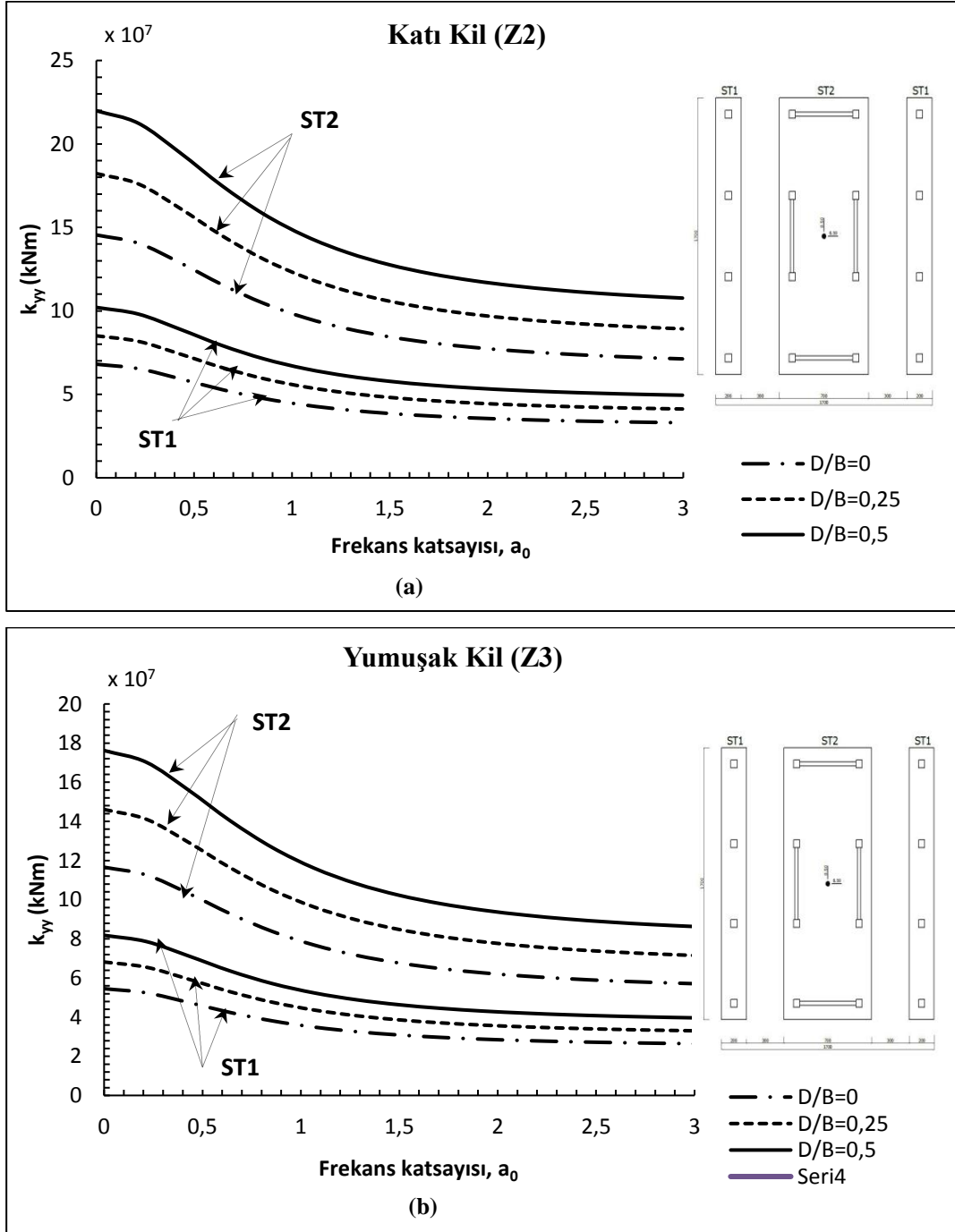
Çalışmanın ikinci aşamasında aynı zemin parametreleri kullanılarak dinamik rijitlikler ötelenme ve dönme titreşim modları için ST1 ve ST2 temellerinin gömülme oranına bağlı elde edilmiştir. Şekil 4.48.'de gömülme oranına göre ötelenme doğrultusundaki dinamik rijitliğin boyutsuz frekans parametresine (a_0) bağlı değişimi $0 \leq a_0 \leq 3$ aralığı için gösterilmiştir.



Şekil 4.48. İstanbul bölgesi için farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı ötelenme dinamik rijitliğinin (k_x) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi

Farklı kıvamlardaki killi zeminler için Şekil 4.48’de elde edilen grafikler incelendiğinde ötelenme dinamik rijitliğinin titreşim kaynağının frekansından bağımsız olduğu görülmüştür. Buradan, ötelenme titreşimi moduna ait empedans fonksiyonları doğrudan statik rijitliğe eşdeğer olduğu anlaşılmaktadır.

Dönme titreşim moduna karşı gelen dinamik rijitliğin temelin gömülme derinliğine ve boyutlarına bağlı değişimi boyutsuz frekans parametresinin $0 \leq a_0 \leq 3$ aralığı için incelenmiştir (Şekil 4.49.).



Şekil 4.49. İstanbul bölgesi için farklı kıvamlardaki killi zemin koşullarında sürekli temelin gömülme derinliğine bağlı dönme dinamik rijitliğinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine (a_0) göre değişimi

Dış yükün zorlayıcı titreşim frekansı artıkça zeminin dönme rijitliği önemli derecede azalmaktadır. Katı ve yumuşak killi zemin koşullarında söz konusu rijitlik değerleri yaklaşık olarak yarı yarıya azalmıştır. Kötü derecelendirilmiş zeminde yer alan ST1 ve ST2 olarak tanımlanan temellerin rijitlik değişimleri sabit olduğu görülmektedir. Yani dış yükün frekansının artmasıyla rijitlik azalması temel geometrisinden bağımsızdır. Temel boyutlarının büyümesi ve temelin gömülme derinliğinin artması söz konusu rijitliğin artmasına neden olmuştur.

4.2.1.2. Katı ve yumuşak killi zemin koşuluna ait kayma modülü azalım eğrisinin($G(t)/G_{maks}$) değişimi dikkate alınmasıyla önerilen empedans fonksiyonların sürekli temelin gömülme oranına bağlı elde edilmesi

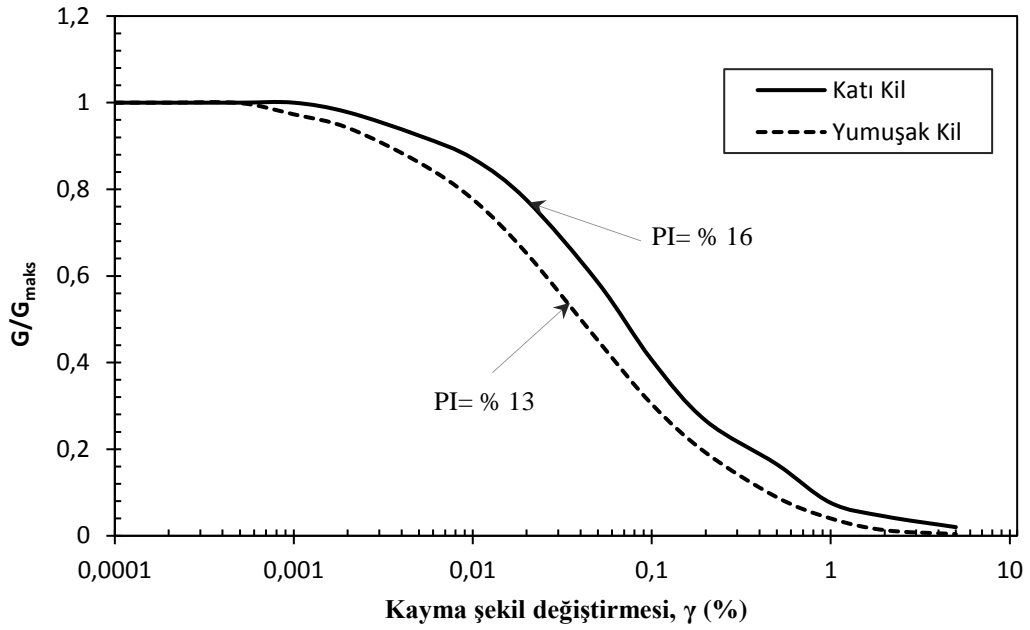
Kayma şekil değiştirme büyüklüğüne bağlı değişen zemin kayma modülünün, empedans fonksiyonların hesabında etkisini gösterebilmek için Bölüm 3’de önerilen çözüm algoritmasına ilave bir hesap modülü eklenerek yazılan MATLAB kodu (EK D) geliştirilmiştir.

Örnek çalışmada İstanbul bölgesi Kadıköy tarafındaki bir arsa için hazırlanmış temel zemin etüt raporundan alınan zemin tabaka kalınlıkları (h), kayma dalga hızları (V_s), birim hacim ağırlıkları (ρ) ve plastisite indisi (PI) parametreleri kayma şekil değiştirmesine bağlı kayma modülü azalım eğrilerini elde etmek için kullanılmıştır (Tablo 4.18.).

Tablo 4.18. Kadıköy zemin profili için kayma modülü azalım eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan parametreler

Profil	h_1 [m]	V_s [m/s]	ρ [kN/m ³]	PI [%]	Zemin modeli
Katı kil (Z2)	3,5	244	13,95	16	Sun et al 1988
Yumuşak kil (Z3)	2,5	192	14,27	13	Sun et al 1988

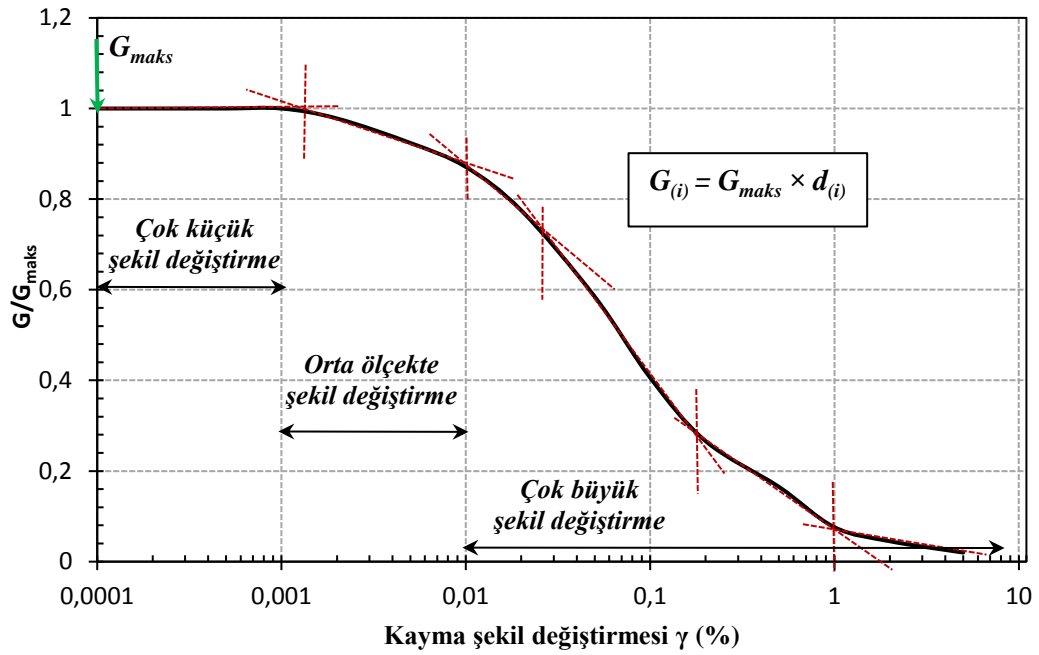
Zeminin plastisite indisine göre farklılık gösteren katı ve yumuşak killi zeminlerin (Deprem yönetmeliğinde Z2 ve Z3 zemin sınıflandırmasına karşı gelen) kayma modülü azalım eğrisinin değişimi, SHAKE91 tabanlı EZ-FRISK programında elde edilerek Şekil 4.50.’de gösterilmiştir [93].



Şekil 4.50. Farklı plastisite indislerine sahip killi zemin ortamında G/G_{maks} oranının kayma şekil değiştirmesine bağlı azalım eğrileri

İki farklı kıvamdaki killi zemin için elde edilen kayma rijitliğinin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalım eğrisini MATLAB programında yazılan kodda tanımlatabilmek, ancak söz konusu eğrinin kayma şekil değiştirme referans aralıklarına göre parçalı doğrusallaştırılmasıyla mümkün olmuştur. Kayma şekil değiştirmesinin referans aralığına göre lineerleştirilen azalım eğrisinden elde edilen denklemler ($d_{(i)}$) basit bir çözüm algoritması içerisinde plastisite indisine göre farklılık gösteren katı ve yumuşak killi zemin durumları için MATLAB kodu oluşturulmuştur. MATLAB programında yazılan kodda elde edilen sonuçlar ile SHAKE91 tabanlı EZ-FRISK programında elde edilen sonuçlar arasında fark edilebilir bir değişiklik görülmediği ve bu doğrultuda hiçbir teknik hatanın olmadığı da söz konusudur. Kayma modülü azalım eğrisinin değişimi statik ve dinamik rijitliklerin hesabına katılarak empedans fonksiyonlarının yapı-temel-zemin etkileşimi probleminde daha gerçekçi bir şekilde kullanımı sağlanmıştır.

Katı killi zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır (Şekil 4.51).



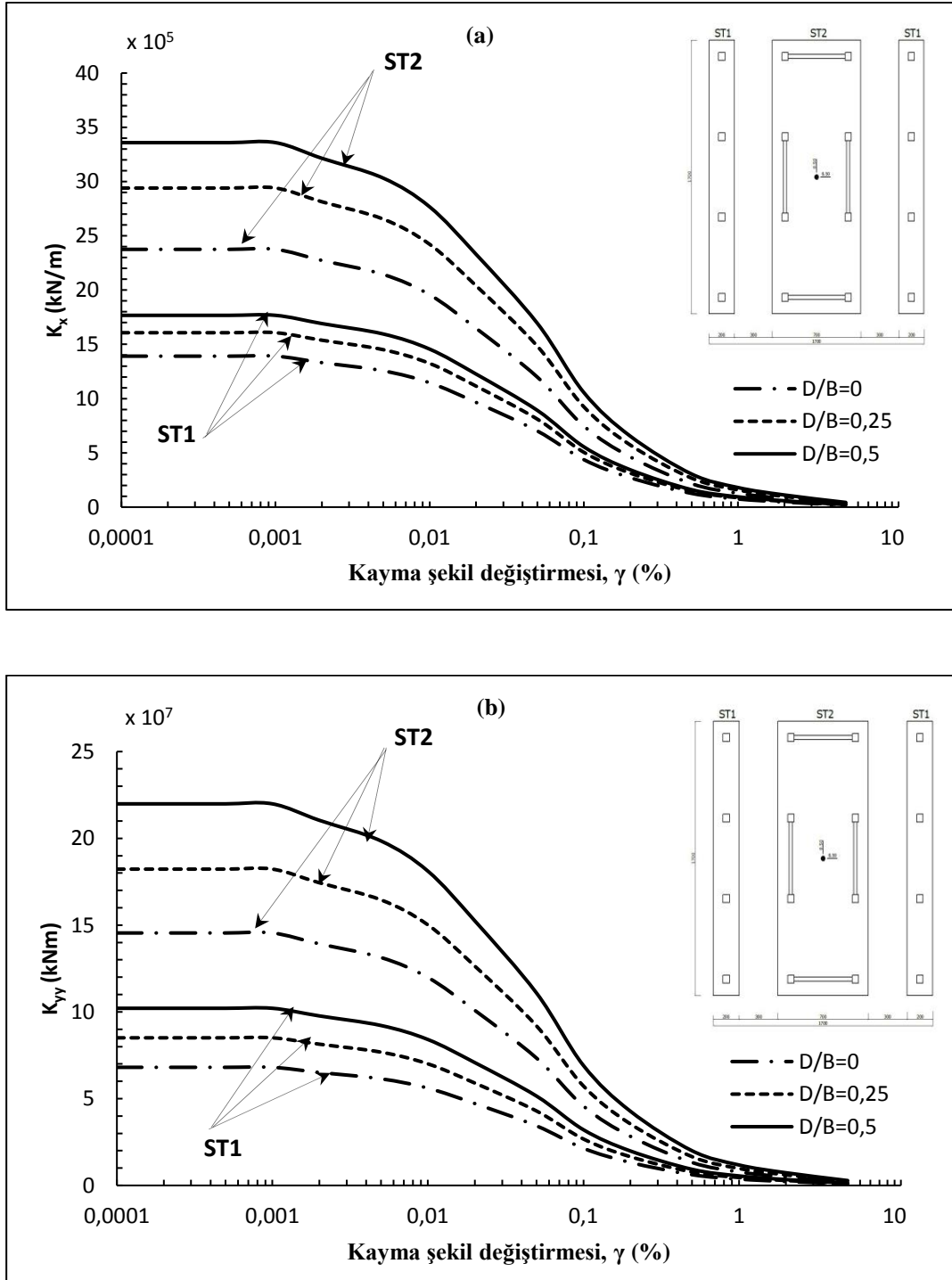
Şekil 4.51. Katı killi (PI = % 16) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin lineer bölgelere ayrılması

Kayma şekil değiştirmesinin referans aralıklarına (logaritmik) göre lineer duruma getirilen eğrinin elde edilmesiyle değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri katı killi zemin için Tablo 4.19.'da verilmiştir.

Tablo 4.19. Katı killi (PI = % 16) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri

Lineer bölge	Referans aralığı	Denklem [$d_{(i)}$]
1	$\gamma \leq 0,0014$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = 1$
2	$0,0014 < \gamma \leq 0,01$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1522 \times \log \gamma + 0,5656$
3	$0,01 < \gamma \leq 0,027$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,3246 \times \log \gamma + 0,2208$
4	$0,027 < \gamma \leq 0,19$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,5310 \times \log \gamma - 0,1029$
5	$0,19 < \gamma \leq 1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2911 \times \log \gamma + 0,0700$
6	$1 < \gamma$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,0572 \times \log \gamma + 0,07$

Katı killi zemine oturan veya gömülen temellerin empedans fonksiyonlarına göre rijitliklerinin tanımlanmasında kullanılan ötelenme ve dönme titreşimlerine ait statik rijitliklerin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimleri Şekil 4.52.'de gösterilmiştir.

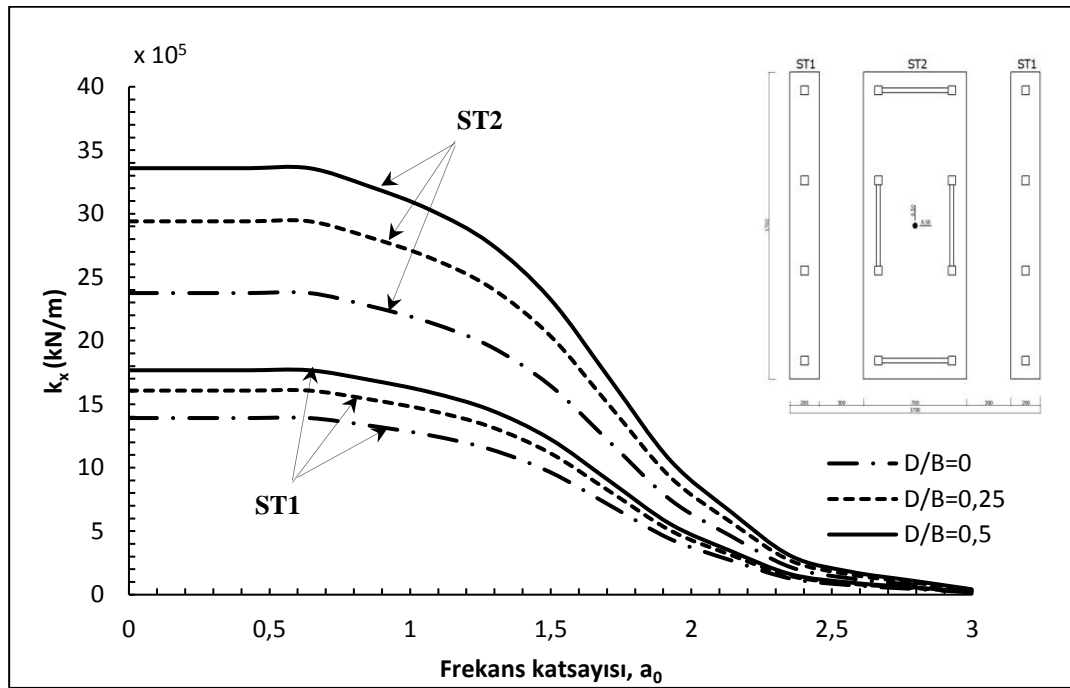


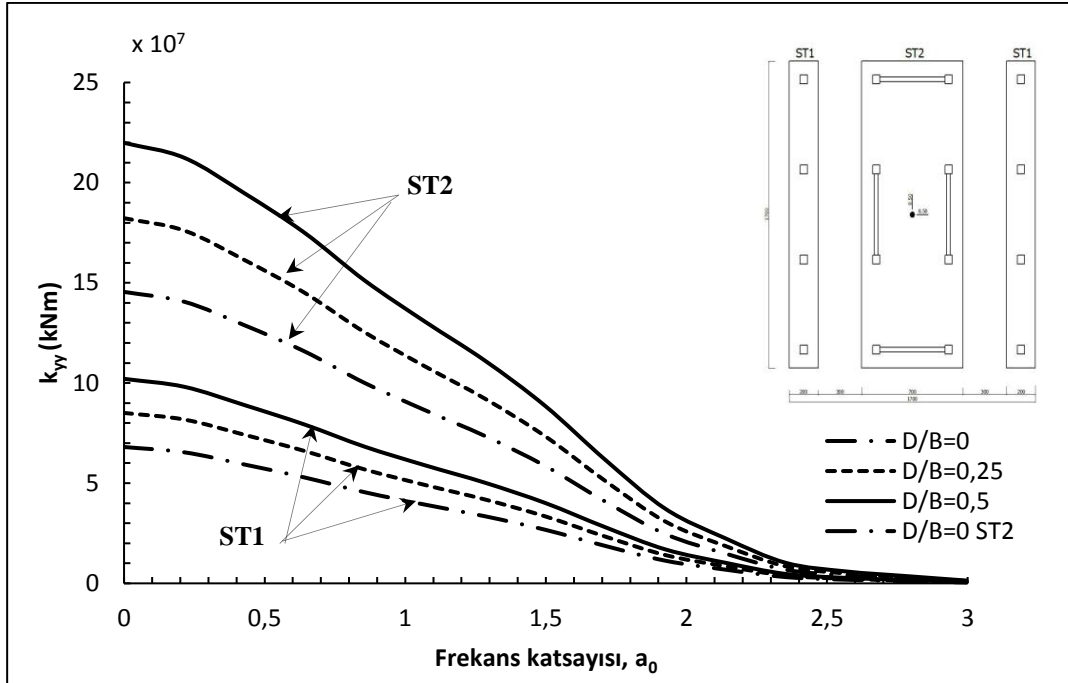
Şekil 4.52. D/B oranına göre katı killi zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değişimine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

Kayma modülü azalım ($G_{(i)}/G_{maks}$) eğrisine göre değişiklik gösteren statik rijitlikler katı kil zemin açısından incelendiğinde temelin gömülme oranı arttıkça ötelenme ve dönme titreşim modlarında artış gözlemlenmektedir. Statik rijitliklerin temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi ötelenme titreşim modu (K_x) için ST1 de % 27

ST2 içinde % 40 artmakta olduğu, dönme titreşim modunda (K_{yy}) ise ST1 için % 50 ST2 içinde % 51 olduğu görülmektedir. Zemin etütlerinde elde edilen maksimum kayma modülü doğrudan kullanıldığında çok küçük şekil değiştirmeler için büyük statik rijitlik değerleri kullanılır. Ancak azaltılmış kayma modülü dikkate alındığında kullanılacak olan statik rijitlikler, orta derecede kayma şekil değiştirmelerde % 18 çok büyük şekil değiştirmelerde % 98 azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Örnek binaya ait sürekli temelin boyutu arttıkça ($ST1 < ST2$) statik rijitliklerin artmakta olduğu ve bu artış % 70 civarında olduğu görülmektedir.

Şekil 4.53.'de dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonların) ötelenme ve dönme modları için boyutsuz frekans parametresine bağlı ($0 \leq a_0 \leq 3$) değimi gömülme derinliğine (D/B) göre gösterilmiştir.

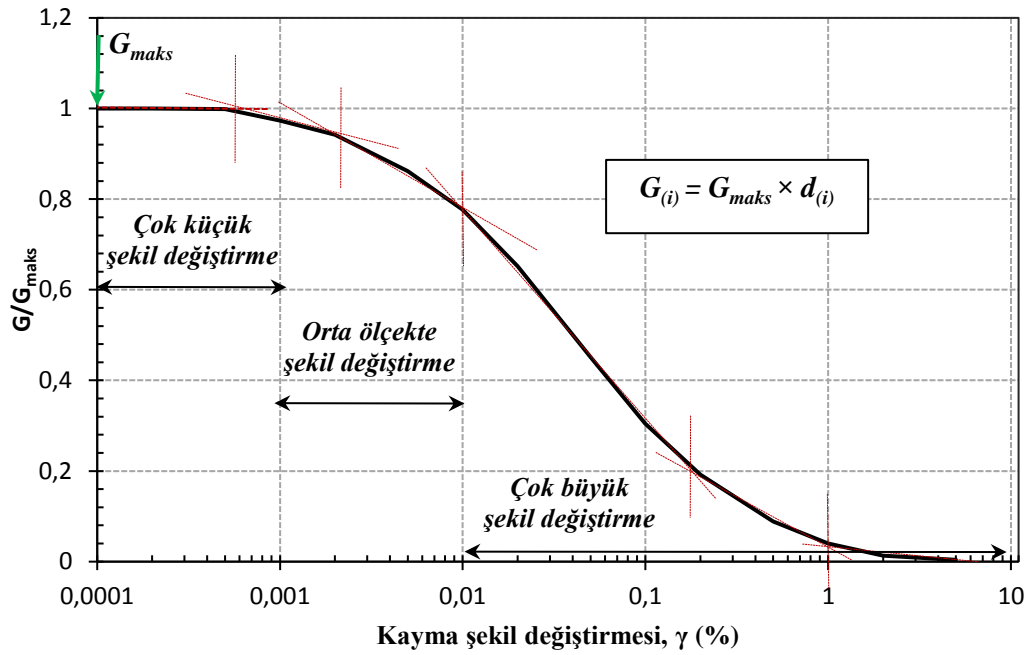




Şekil 4.53. Katı killi zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G(i) \neq G_{maks}$)

Zeminin kaymaya karşı göstereceği direncin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalmasıyla ($G(i) \neq G_{maks}$) çok büyük şekil değiştirmelere neden olacak depremlerde kullanılacak olan dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonları), hesaplarda önemli derecede azaltılması gerektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Kayma modülü azalım eğrisi dikkate alındığında daha önce frekanstan bağımsız olarak elde edilen ötelenme modundaki dinamik rijitlik (Şekil 4.48.) burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı Şekil 4.53.'den anlaşılmaktadır. Özellikle $a_0 < 1,5$ olduğu aralıkta dinamik rijitlik değerlerinde ötelenme titreşim modu için % 18, dönme titreşim modu için % 51 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $a_0 > 1,5$ değerleri için gözlemlenen dinamik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modunda % 97, dönme titreşim modunda ise % 98 azalmıştır. Taban alanı büyük olan sürekli temelin (ST2) diğer temele (ST1) göre dinamik rijitlikleri daha büyük değerler almaktadır. Yumuşak killi zeminde yer alan ST1 ve ST2 temellerinde dış yükün frekansına bağlı rijitlik kayıplarının sabit olduğu gözlemlenmiştir. Yani dış yükün frekansının artmasıyla rijitlik azalması temel geometrisinden bağımsızdır.

Yumuşak killi zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisi şekil değiştirme referans aralıklarına göre 6 bölgeye ayrıştırılarak doğrusallaştırılmıştır (Şekil 4.54.).



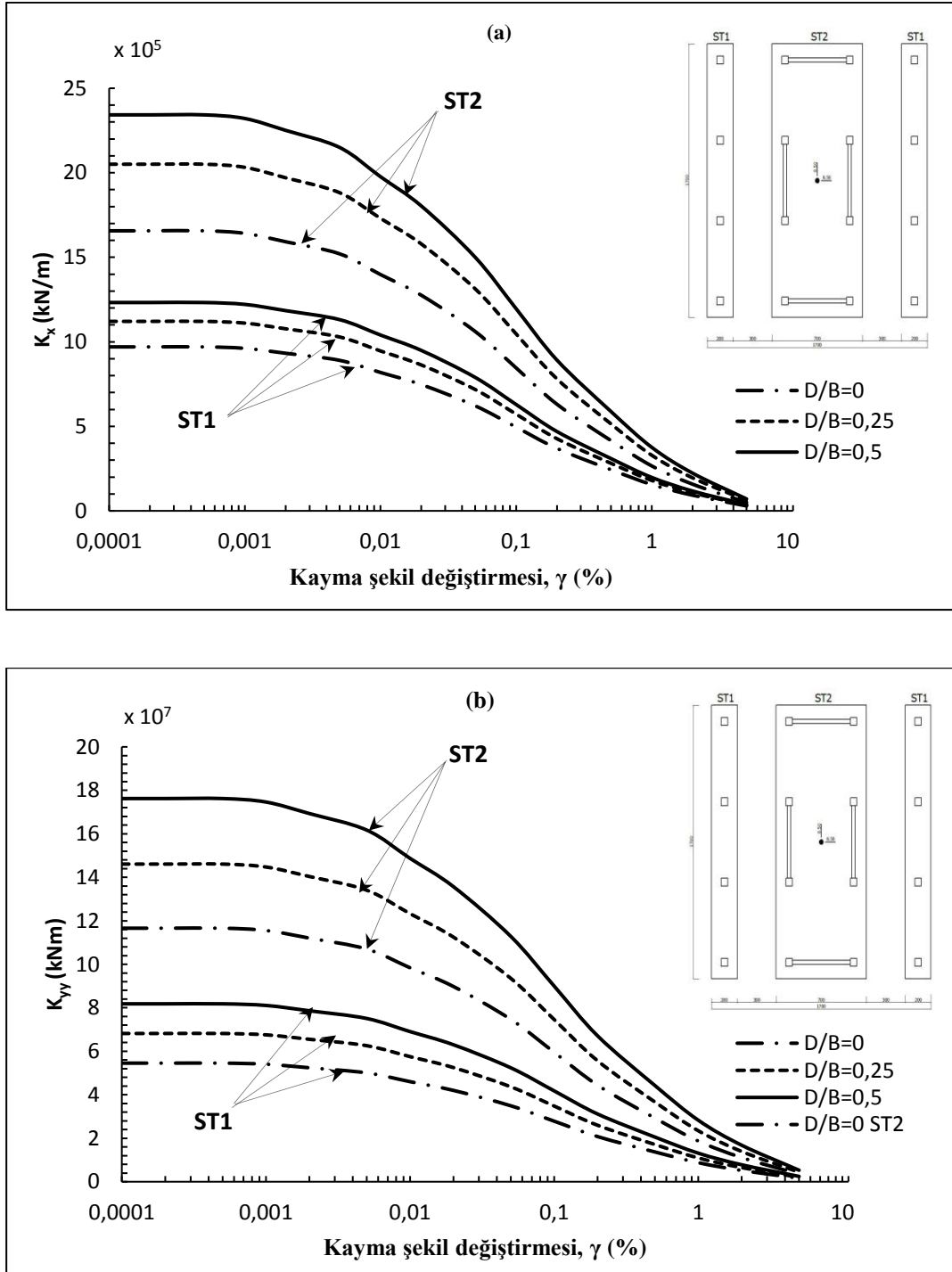
Şekil 4.54. Yumuşak killi (PI= % 13) zemin için elde edilen kayma modülü azalım eğrisinin linear bölgelere ayrılması

Kayma şekil değiştirmesinin referans aralıklarına (logaritmik) göre lineer duruma getirilen eğrinin elde edilmesiyle değişken kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri yumuşak killi zemin için Tablo 4.20.'de verilmiştir.

Tablo 4.20. Yumuşak killi (PI = % 13) zemin için kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen kayma modülünün ($G_{(i)}$) denklemleri

Lineer bölge	Referans aralığı	Denklemler [$d_{(i)}$]
1	$\gamma \leq 0,00059$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = 1$
2	$0,00059 < \gamma \leq 0,0022$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,1049 \times \log \gamma + 0,6612$
3	$0,0022 < \gamma \leq 0,01$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2585 \times \log \gamma + 0,2530$
4	$0,01 < \gamma \leq 0,18$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,4541 \times \log \gamma - 0,1382$
5	$0,18 < \gamma \leq 1$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,2282 \times \log \gamma + 0,0300$
6	$1 < \gamma$	$\frac{G_{(i)}}{G_{maks}} = -0,0429 \times \log \gamma + 0,03$

Şekil 4.55.'de ötelenme ve dönme davranışına karşı gelen statik rijitliklerin kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ST1 ve ST2 temellerinin her ikisi için gömülme oranına göre gösterilmiştir.

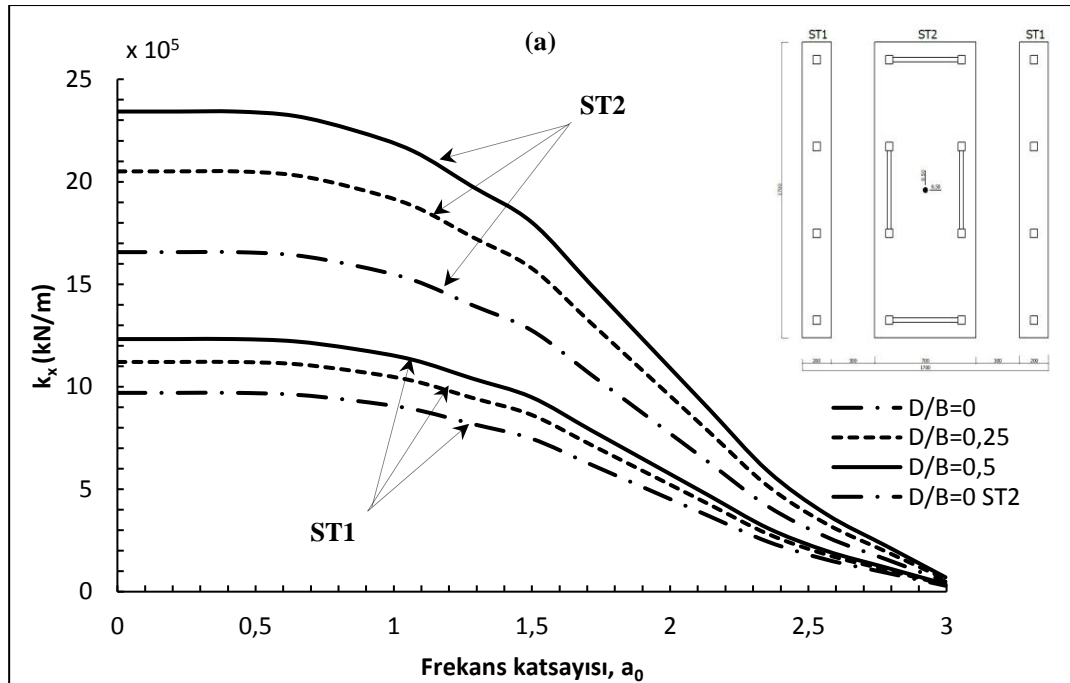


Şekil 4.55. D/B oranına göre yumuşak killi zeminde statik ötelenme (K_x) ve dönme rijitliklerinin (K_{yy}) kayma şekil değiştirmesine bağlı değişimi ($G_{(i)} \neq G_{maks}$)

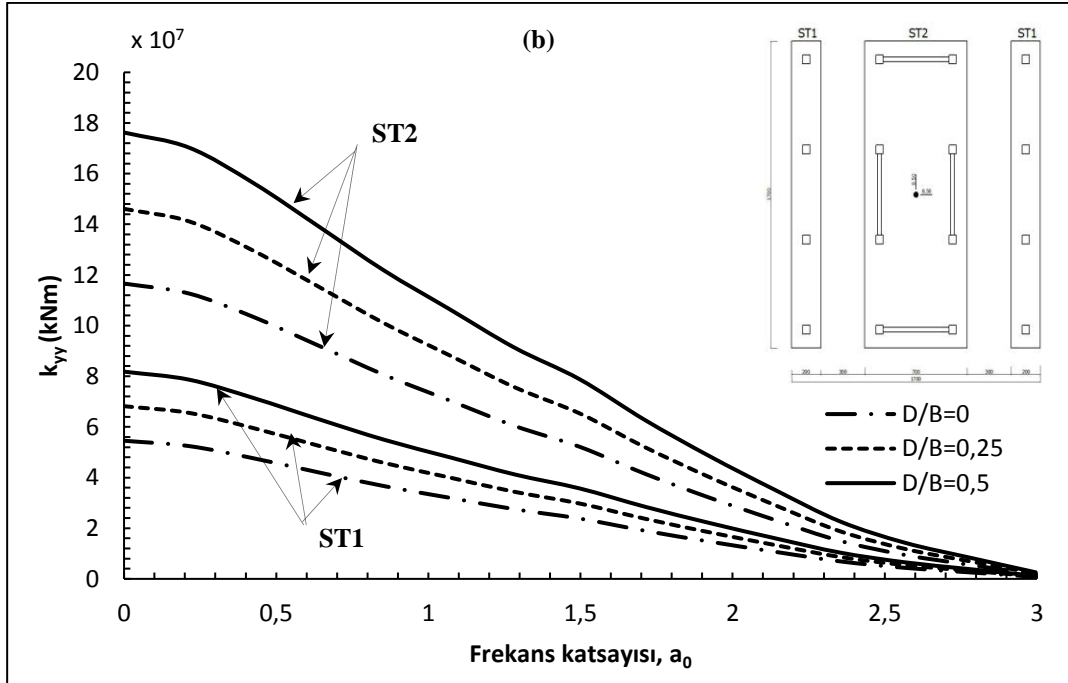
Ötelenme ve dönme titreşim modlarına karşı gelen statik rijitliklerin değerleri gömölme oranına bağlı olarak artmıştır. Zeminin kayma şekil değiştirme yüzdesi 0,01'den büyük olması durumunda statik rijitliklerin önemli derecede azalmaktadır. Ancak azaltılmış kayma modülü dikkate alındığında kullanılacak olan statik

rijitlikler, orta derecede kayma şekil değiştirmelerde % 15 çok büyük şekil değiştirmelerde % 96 azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Taban alanı büyük olan sürekli temelin (ST2) diğer temele (ST1) göre statik rijitlikleri % 73 oranında daha büyük değerler almaktadır. Yani, temelin zeminle temas yüzeyi büyüdükçe statik rijitlik değerleri artmaktadır.

Şekil 4.56.'da dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonların) ötelenme ve dönme modları için boyutsuz frekans parametresine bağlı ($0 \leq a_0 \leq 3$) değişimi temelin gömülme derinliğine (D/B) göre gösterilmiştir.



Şekil 4.56. Yumuşak killi zeminde D/B oranına göre dinamik ötelenme (k_x) ve dönme rijitliklerinin (k_{yy}) boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi ($G(i) \neq G_{maks}$)



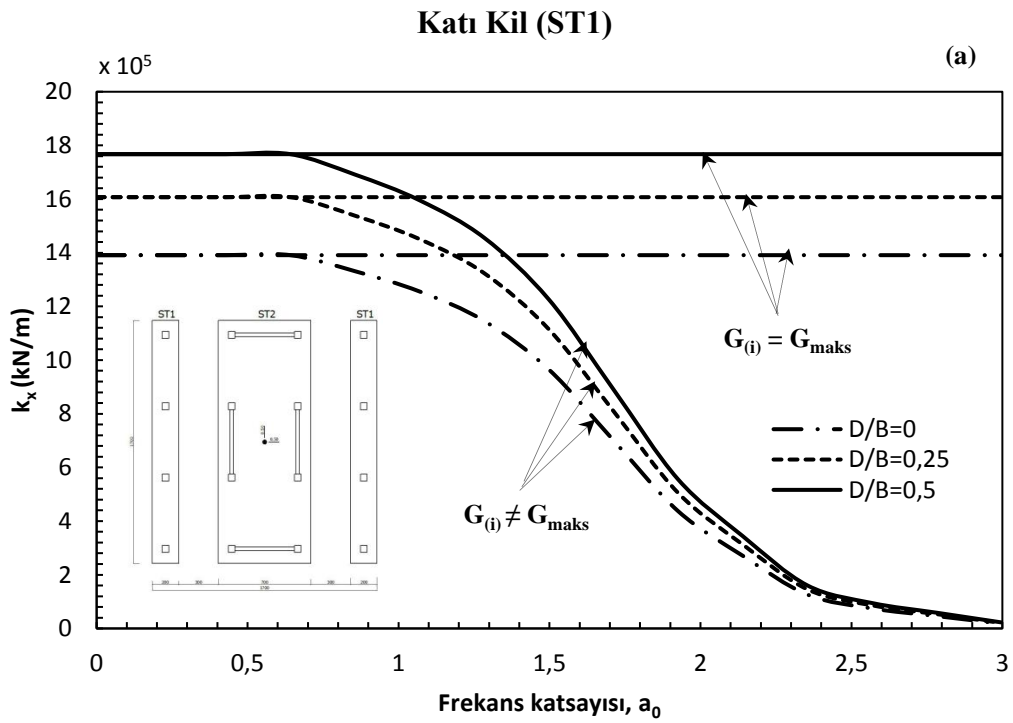
Şekil 4.56. (Devamı)

Zeminin kaymaya karşı göstereceği direncin kayma şekil değiştirmesine bağlı azalmasıyla ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) çok büyük şekil değiştirmelere neden olacak depremlerde kullanılacak olan dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonları), hesaplarda önemli derecede azaltılması gerektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Kayma modülü azalım eğrisi dikkate alındığında daha önce frekanstan bağımsız olarak elde edilen ötelenme modundaki dinamik rijitlik (Şekil 4.48.) burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı Şekil 4.56.'dan anlaşılmaktadır. Özellikle $a_0 < 1,5$ olduğu aralıkta dinamik rijitlik değerlerinde ötelenme titreşim modu için % 15, dönme titreşim modu için % 49 azalma meydana gelmiştir. Aynı şekilde $a_0 > 1,5$ değerleri için gözlemlenen dinamik rijitlik değerleri ötelenme titreşim modunda % 95, dönme titreşim modunda ise % 96 azalmıştır. Yumuşak killi zeminde yer alan ST1 ve ST2 temellerinde dış yükün frekansına bağlı rijitlik kayıplarının sabit olduğu gözlemlenmiştir. Yani dış yükün frekansının artmasıyla rijitlik azalması temel geometrisinden bağımsızdır.

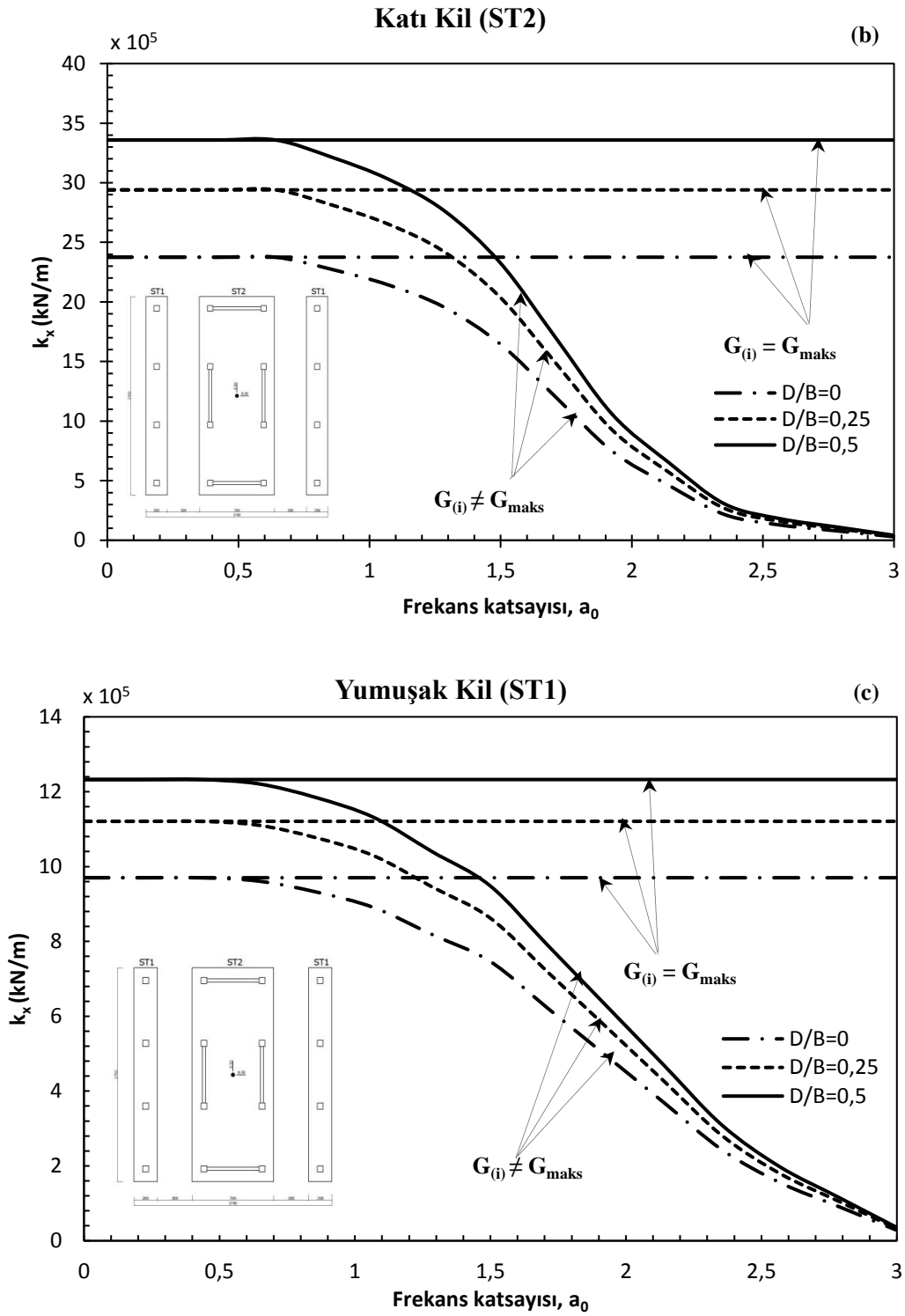
Bu sayısal uygulamaların sonucunda anlaşılıyor ki zemin koşullarının temel ve dolayısıyla yapı titreşimleri üzerindeki etkisini zeminde büyük kayma şekil değiştirmelerine neden olacak tasarım depremleri için dikkatlice ele almak gerekir. Büyük kayma şekil değiştirmelere karşı gelen kayma rijitliğinin, dinamik empedans

fonksiyonların hesabına katılması yapı-temel-zemin etkileşim problemlerinde önemli bir konudur.

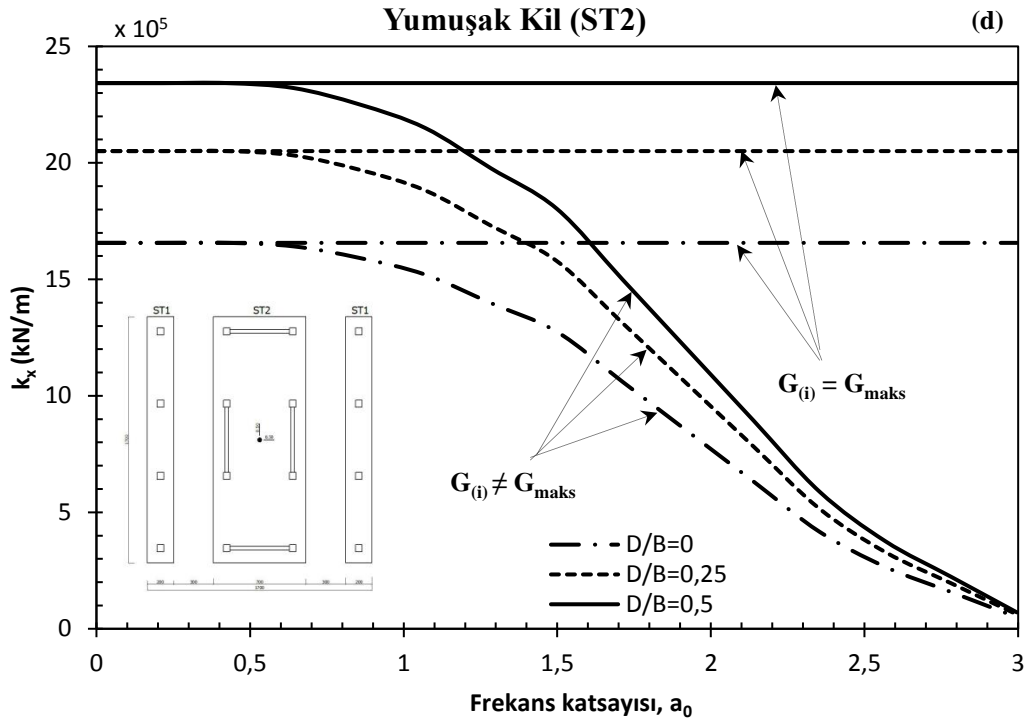
Zemin etütleri raporlarında zeminin küçük kayma şekil değiştirmesine karşı gelen zemin kayma modülünün verilmesi, tasarım depremine göre yapı-zemin etkileşim problemlerin çözümünde kullanılacak dinamik rijitliklerin yanıltıcı sonuç vermesine neden olabileceği ele alınan örneklerden açıkça görülmektedir. Farklı plastisite indisine sahip killi zeminlere oturan temellerin gömülme oranına bağlı dinamik rijitliklerinin (empedans fonksiyonlarının) değişimleri sabit zemin kayma rijitliğine ($G_{(i)} = G_{maks}$) ve azaltılmış zemin kayma rijitliğine ($G_{(i)} \neq G_{maks}$) göre geliştirilen MATLAB kodu çerçevesinde Şekil 4.57. ve Şekil 4.58.'de karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.



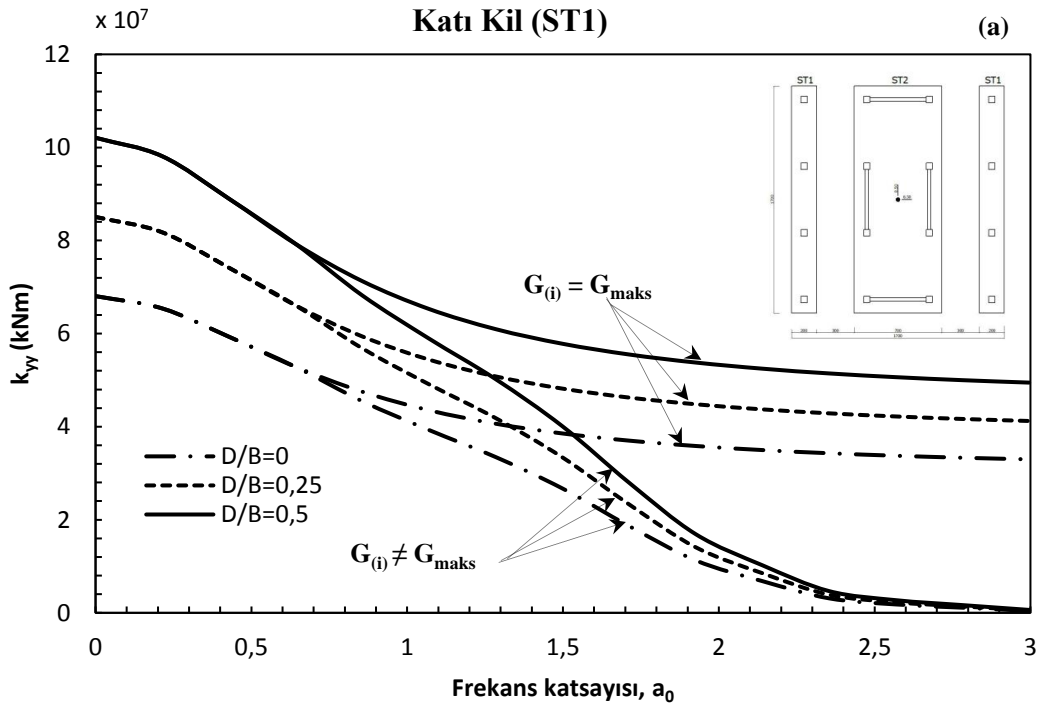
Şekil 4.57. Katı ve yumuşak killi zeminlere oturan sürekli temellerin $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik ötelenme rijitliğinin (k_x) frekansa bağlı değişimi

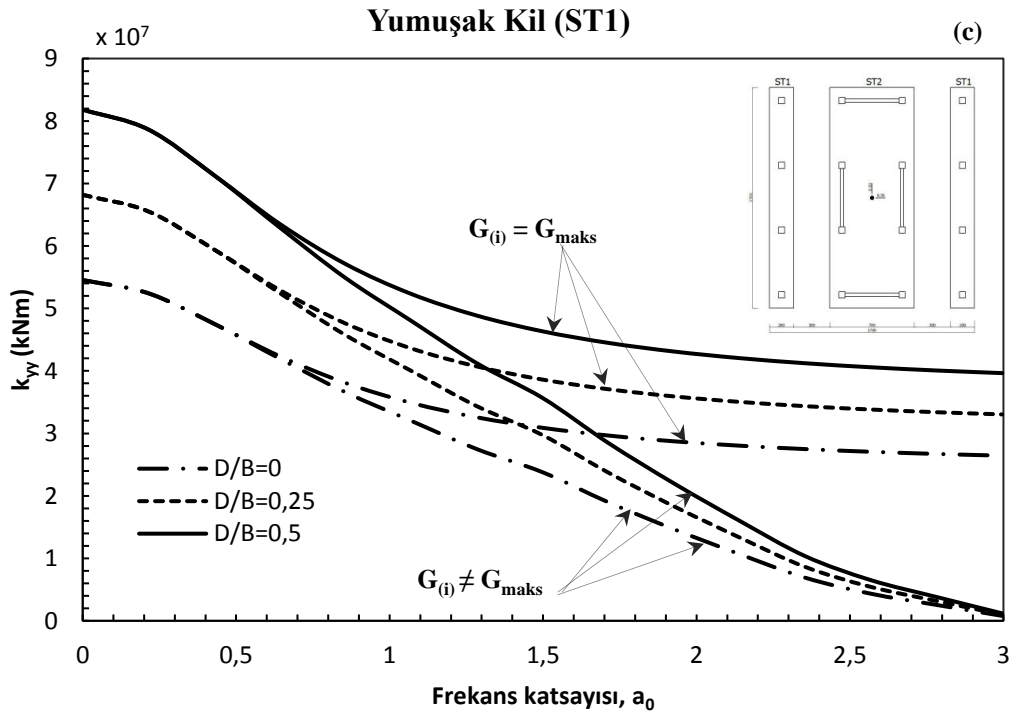
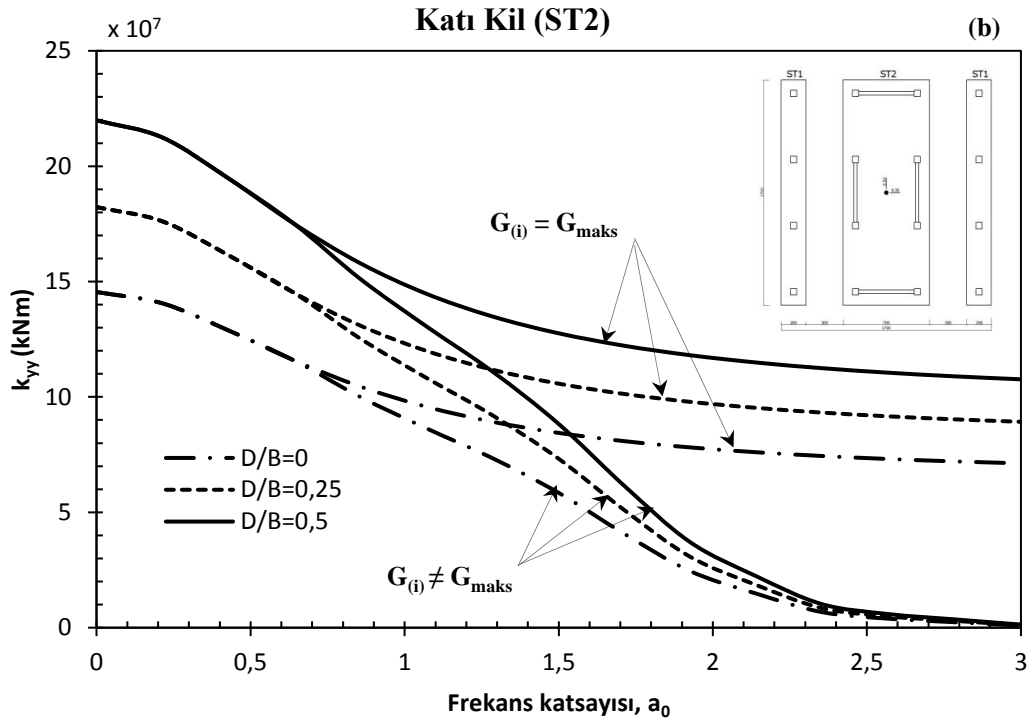


Şekil 4.57. (Devamı)

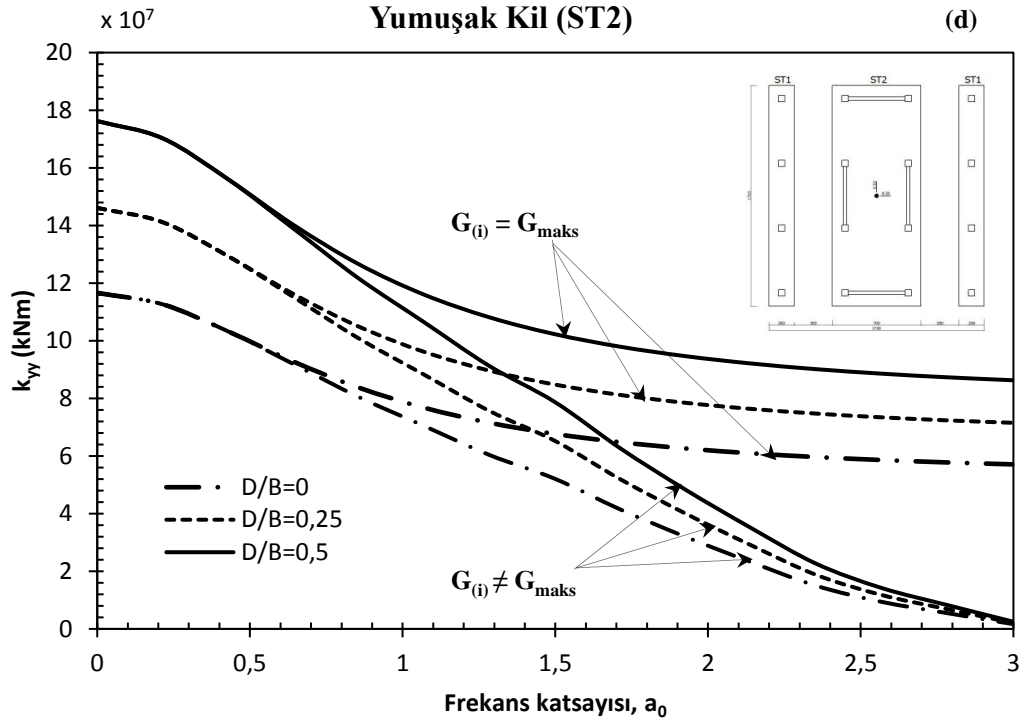


Şekil 4.57. (Devamı)

Şekil 4.58. Katı ve yumuşak killi zeminlere oturan sürekli temellerin $G_{(i)} = G_{maks}$ ve $G_{(i)} \neq G_{maks}$ durumları için dinamik dönme rijitliğinin (k_{yy}) frekansa bağlı değişimi



Şekil 4.58. (Devamı)



Şekil 4.58. (Devamı)

İstanbul Kadıköy yerleşim bölgesinde seçilmiş bir arsaya ait zemin etüt verileri empedans fonksiyonlarının hesabında dikkate alındığında, çok küçük şekil değiştirmelerin ($10^{-4} \leq \gamma \leq 10^{-3}$) söz konusu olduğu durumlarda zemin etütlerinde elde edilen kayma modülü doğrudan kullanılabilir. Orta derecede şekil değiştirmeleri ($10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-2}$) talep eden bir deprem için azaltılmış kayma modülü dikkate alınarak empedans fonksiyonları hesaplanır. Çok büyük şekil değiştirmelere ($10^{-2} < \gamma$) neden olan depremlerde ise kullanılacak olan empedans fonksiyonların önemli derecede azaltılması gerektiği ele alınan örneklerde görülmektedir.

Zeminin kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin dinamik rijitlik (empedans fonksiyonları) üzerindeki etkisi Tablo 4.21.'de verilmiştir.

Tablo 4.21. Farklı plastisite indisine sahip killi zemin koşullarında kayma rijitliğinin şekil değiştirmeye bağlı değişiminin empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi (%)

Boyutsuz frekans parametresi	Kıatı kil				Yumuşak kil			
	ST1		ST2		ST1		ST2	
	k_x	k_{yy}	k_x	k_{yy}	k_x	k_{yy}	k_x	k_{yy}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,21	0	0	0	0	0	0	0	0
0,42	0	0	0	0	0	0	0	0
0,64	0	0	0	0	1	1	1	1
0,85	4	4	4	4	4	4	4	4
1,07	10	10	10	10	8	8	8	8
1,28	18	18	18	18	16	16	16	16
1,49	31	31	31	31	23	23	23	23
1,71	50	50	50	50	36	36	36	36
1,92	69	69	69	69	49	49	49	49
2,14	81	81	81	81	62	62	62	62
2,35	91	91	91	91	75	75	75	75
2,57	95	95	95	95	84	84	84	84
2,78	97	97	97	97	91	91	91	91
3	99	99	99	99	97	97	97	97

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dinamik yükler etkisi altındaki yapıların titreşim davranışına temel-zemin etkileşiminin katkısını altsistem yaklaşımında kullanılan empedans fonksiyonlarıyla hesaplayabilmek için MATLAB programlama dilinde bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Temel ortamının kayma şekil değiştirmesine bağlı değişen dinamik rijitliğinin üst yapının sismik davranışına olan etkisini yönetici araştırma parametrelerine göre sayısal analizlerde değerlendirebilmek için betonarme bir köprü ayağı ve rijit bir bina temeli örnek model yapı olarak seçilmiştir. Bu iki örnek üzerinden elde edilen sayısal analiz sonuçları yapı ve geoteknik mühendisliği pratiğine bakan yönleriyle genelleştirilerek aşağıda özetlenmiştir:

- a. Deprem yönetmeliğinde gevşek kum ve yumuşak kil olarak sınıflandırılan D grubu zayıf zeminlere oturan yapıların titreşim hareketi temel-zemin etkileşiminden dolayı değiştiği ortak sistemin doğal titreşim periyodunun önemli derecede artmasından anlaşılmaktadır. Yönetmelikçe A grubu olarak tanımlanan kum ve kil zeminlerde yapı-zemin etkileşimi dinamik parametreler üzerinde önemli rol oynamamıştır.
- b. Temelin kötü derecelendirilmiş zeminde gömülme derinliğinin artırılması, ortamın rijitlik parametrelerini büyütürken sistemin etkileşimli periyodunu azaltmıştır. Temelin gömülme derinliğinin iyi derecelendirilmiş zeminde etkisi olmadığı açıkça görülmüştür.
- c. Yapının mesnetlendiği zemin ortamının rijitliği azaldıkça geometrik (radyasyon) ve malzeme sönümüne bağlı tüketilen sismik enerji, eylemsizlik kuvvetlerine bağlı temelde dönme ve ötelenme yer değiştirmeleri yaptırarak sistemin sönüm değerini değiştirmektedir. İncelenen zayıf zemin gruplarında sistemin sönüm oranı yapısal davranışı önemli derecede değiştirecek şekilde artmıştır. Beklenildiği gibi temelin gömülme oranı artıkça, tüketilen enerjiye

bağlı olarak sönüm değeri de artmıştır. Yönetmelikçe D grubu kapsamındaki gevşek kum ve yumuşak killi zeminlerde ortak sistemin sönüm oranı farklı derecelerde etkilenmiştir.

- d. Zayıf zemin koşullarının ortak sistemin sönüm değerini önemli derecede artırarak değiştirmesinden dolayı incelenen deprem kayıtlarının frekans içeriklerine bağlı olarak deprem ivme spektrum eğrilerinde fark edilir azalmalar meydana gelmiştir. Yumuşak ve gevşek zemin koşullarında ve deprenselliği yüksek bölgelerde tasarlanacak kısa periyotlu yapıların deprem hesabında yapı-zemin dinamik etkileşimini çözüm sürecine katmak mühendislik açısından önemli bir olgu haline gelmiştir.
- e. Yapı-temel-zemin etkileşiminin dikkate alındığı özel mühendislik problemlerinin analizinde dönme titreşim moduna karşı gelen statik rijitlik parametreleri titreşim kaynağının yüksek frekans değerlerinde yetersiz kalabilmektedir. Deprem yönetmeliğinde iyi derecelendirilmiş A grubu ve zayıf olarak tanımlanmış D grubu zeminlerde dönme titreşimine karşı gelen temelin rijitlik değerleri titreşim frekansının artmasıyla birlikte azalmaktadır. Temel-zemin etkileşim probleminde, dış yükün titreşim frekans içeriğine bağlı olarak dinamik rijitlik terimlerinin kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir. Ancak ötelenme rijitliği söz konusu olduğunda bu parametrelerin titreşim kaynağının frekansından etkilenmediği görülmüştür.
- f. Kayma birim şekil değiştirmesinin temel ortamının dönme ve ötelenme rijitlik parametreleri üzerindeki etkisi kum ve killi zeminin farklı koşulları için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Birim şekil değiştirmeler arttıkça zeminin enerji sönümleme özelliğinin de hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. Ancak yüksek birim şekil değiştirmelerde sönümün artmasına karşın zemin ortamının rijitliği dinamik kayma modülünün değişimine bağlı olarak hızlı bir şekilde azalmıştır. Bu durum dönme ve ötelenme titreşim moduna karşı gelen temel rijitlik parametrelerin de açıkça gözlemlenmiştir. Sağlam ve zayıf zeminler için elde edilen temelin dinamik rijitlik parametreleri zeminin kayma modülünün şekil değiştirmeye bağlı değişimin dikkate alınıp alınmamasına göre önemli farklılıklar göstermektedir. Bu fark ötelenme titreşimine karşı gelen rijitlik parametresinde daha büyük önem taşımaktadır.

- g. Temelin gömülme derinliğine bağlı olarak geometrik sönümün dönme ve ötelenme bileşenlerinin incelenen farklı plastisite indisine sahip killerde birbirinden ayrı davranış göstermektedir. Bu bileşenler her iki kil grubu için frekansla birlikte artmıştır.
- h. Farklı kıvamlardaki killi zeminlerde temel gömülme derinliğine bağlı elde edilen sayısal sonuçlar, sürekli temellerin zeminle temas yüzeyinin büyüklüğüne göre değerlendirildiğinde statik ve dinamik rijitlik parametrelerinin taban alanıyla birlikte doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.
- i. Kayma modülü azalım eğrisinin etkisi hesaplara katıldığında daha önceden frekanstan bağımsız olarak elde edilen ötelenme titreşim moduna karşı gelen rijitlik parametresi burada frekansa bağlı bir karakter kazandığı görülmektedir. Frekans değeri büyüdükçe ötelenme titreşimine bağlı dinamik rijitlik kaybı önemli derecede artmaktadır.
- j. Zeminin büyük birim kayma şekil değiştirmesi değerleri dinamik rijitlik parametrelerini etkilediği gibi statik rijitlik parametrelerini de önemli derecede etkilemektedir.
- k. Buradan anlaşılmaktadır ki, şekil değiştirebilme özelliği yüksek zeminlerde (alüvyon zeminler) zemin ortamının sönümlenme özelliği yüksek olmasına rağmen rijitliği yani dayanımı düşüktür. Bu sonuçlar doğrultusunda, alüvyon zeminlere sahip bölgelerde zemin etüt raporlarında verilen kayma modülü yerine, o bölgede oluşabilecek büyük deprem etkileri dikkate alınarak hesaplanmış birim şekil değiştirmelere karşı gelen kayma modüllerinin hesaplanması ve üstyapının deprem analizlerinde temel ortamı için bu değerlerin kullanılması daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyacaktır.
- l. Bu sayısal uygulamaların sonucunda zemin koşullarının temel ve dolayısıyla yapı titreşimleri üzerindeki etkisini zeminde büyük kayma şekil değiştirmelerine neden olacak tasarım depremleri için dikkatlice ele almak gerekir. Büyük kayma şekil değiştirmelere karşı gelen kayma rijitliğinin, dinamik empedans fonksiyonların hesabına katılması yapı-temel-zemin etkileşim problemlerinde önemli bir konudur.

- m. Söz konusu çözüm algoritması kapsamında yapı-zemin ortak sisteminin periyodunu ve sönümünü dinamik rijitlik parametrelerine bağlı her türlü zemin sınıfı ve yapı türü için incelemek mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] NIST GCR 12-917-21, Consultants joint venture; soil-structure interaction for building structures. U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology, 2012.
- [2] Kausel, E., Early history of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 822-832, 2010.
- [3] Lamb, S. H., On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. *philosophical transactions of the royal society of london. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Vol. 203: p.1., 1904.
- [4] Bycroft, G. N., Forced vibrations of a rigid circular plate on a semi-infinite elastic space and on an elastic stratum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 248: p. 327., 1956.
- [5] Parmmelee, R. A., Building-foundation interaction effects. *ASCE*, 93(EM2): pp. 294., 1967.
- [6] Menglin, L., Huaifeng, W., Xi, C., Yongmei, Z., Structure-soil-structure interaction: Literature review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, pp. 1724-1731, 2011.
- [7] Mindlin, R. D., Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 195–202, 7 (May), 1936.
- [8] Reissner, E., Freie und erzwungene Torsionsschwingungen des elastischen Halbraumes. *Ingenieur-Archiv*, VIII.Band,4.Heft.S229–S245, 1937.
- [9] Sung, T. Y., Vibration in semi-infinite solid due to periodic surface loadings. In: *Symposium on Dynamic Testing of Soils*, Special Technical Publication 156, ASTM, pp. 35–54, 1953.
- [10] Barkan, D.D., *Dynamics of bases and foundations*. McGraw-Hill, 1962.

- [11] Thomson, W. T., Kobori, T., Dynamical compliance of rectangular foundations on an elastic half-space. *Journal of Applied Mechanics*, ASME, 30, 579–584, 1963.
- [12] Lysmer, J., Richart, F. E., Dynamic response of footings to vertical loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 92, SM1, 65–91, 1966.
- [13] Gibson, R. E., Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space. *Geotechnique*, 17, 58–67, 1967.
- [14] Whitman, R. V., Richart, F. E., Design procedures for dynamically loaded foundations. *ASCE, J. Soil Mech. and Found. Div.*, Vol. 93, No SM6, Nov., pp. 169-193, 1967.
- [15] Seed, H. B., Idriss, I. M., Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. *Earthquake Research Center, University of California*, Report EERC70-10, Berkeley, 1969.
- [16] Newmark, N. M., Torsion of symmetrical buildings. In: *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, 1969.
- [17] Richardson, J. D., *Forced vibrations of rigid bodies on a semi-infinite elastic medium*. Nottinghamshire, England: University of Nottingham, 1969.
- [18] Whitman, R. V., The current status of soil dynamics. *Applied Mechanics Reviews*, 22: 1–8, 1969.
- [19] Lysmer, J., Kuhlemeyer R. L., Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, 95(4): 759–877, 1969.
- [20] Hradilek, P. J., Luco, J. E., Dynamic soil–structure interaction. *IDIEM Technical Report No.14*, University of Chile, Santiago, Chile, 1970.
- [21] Richart, F. E., Hall Jr., J. R., Woods, R. D., *Vibrations of soils and foundations*. Prentice-Hall, 1970.
- [22] Luco, J. E., Westman, R. A., Dynamic response of circular footings. *Journal of the Engineering, Mechanics Division*, ASCE, 97 (EM5), 1381–1395, 1971.
- [23] Veletsos, A. S., Wei, Y. T., Lateral and rocking vibration of footings. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 97, 1227–1248, 1971.
- [24] Lysmer, J., Wass, G., Shear waves in plane infinite structures. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 98, 85–105, 1972.

- [25] Roesset, J. M., Whitman, R. V., Dobry, R., Modal analysis of structures for foundation interaction. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 99 (ST3), 399–416, 1973.
- [26] Kausel, E., Forced vibrations of circular foundations on layered media. MIT Research Report R74-11, Soils Publication No.336, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA02139, 1974.
- [27] Luco, J. E., Impedance functions for a rigid foundation in a layered medium. *Nuclear Engineering and Design*, North-Holland Publishing Company, 31, 204–217, 1974.
- [28] Veletsos, A. S., Meek, J. W., Dynamic behavior of building-foundation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, 121–138, 1974.
- [29] Chopra, A. K., Gutierrez, J. A., Earthquake response analysis of multistory buildings including foundation interaction. *Earthquake Engineering Structure Dynamics*, 3, 65–77, 1974.
- [30] Seed, H. B., Soil–structure interaction analysis for seismic response. *ASCE*, 101(5): 439–57, 1975.
- [31] Apsel, R. J., Luco, J. E., Torsional response of rigid embedded foundations. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 102 (6), 957–970, 1976.
- [32] Bielak, J., Modal analysis for building–soil interaction. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 102 (EM5), 771–786, 1976.
- [33] Gazetas, G., Roesset, J. M., Forced vibrations of strip footings on layered soils. *Methods of Structural Analysis*, vol. 1, ASCE Specialty Conference, University of Wisconsin, 1976.
- [34] Kausel, E., Soil–structure interaction. *Soil Dynamics for Earthquake Design*. International Centre for Computer-aided Design (ICCAD), Santa Margherita, Italy, 1976.
- [35] Seed, H. B., Whitman, R. V., Lysmer, J., Soil–structure interaction effects in the design of nuclear power plants. In: Hall, W. J. (Ed.), *Structural and Geotechnical Mechanics*, a Volume Honoring Nathan M. Newmark. Prentice-Hall (Chapter13), 1977.

- [36] Aydinoglu, M. N., Cakiroglu, A., Dynamic interaction between soil and a group of buildings. In: Proceedings of the sixth world conference on earthquake engineering, New Dehli, India, p. 1596–601, 1977.
- [37] Dominguez, J., Dynamic stiffness of rectangular foundations. Research Report R78-20, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, 1978a.
- [38] Dominguez, J., Response of embedded foundations to traveling waves. Research Report R78-24, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, 1978b.
- [39] Savidis, S. A., Richter, T., Dynamic response of elastic plates on the surface of the half-space. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3, 245–254, 1979.
- [40] Roesset, J. M., Soil structure interaction: The status of current analysis methods and research (seismic safety margins research program). in NUREG/CR-1780, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, California, 1980.
- [41] Kausel, E., Peek, R., Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72 (5), 1459–12481 (see also Errata in BSSA 79 (4), p. 1508), 1982.
- [42] Rucker, W., Dynamic behaviour of rigid foundations of arbitrary shape on a halfspace. *Earthquake Engng. and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp 675-690, 1982.
- [43] Gazetas, G., Analysis of machine foundation vibrations. *State of the Art Soil Dynamics and Earthquake Engng.*, Vol. 2, No 1, pp 2-42, 1983.
- [44] Karabalis, D. L., Beskos, D. E., Dynamic response of 3-D rigid surface foundations by time domain boundary element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 73–93, 1984.
- [45] Pecker, A., *Dynamique des Sols*. Presses de Ecole Nat. Des Ponts et Chaussees, Paris, 1984.
- [46] Wolf, J. P., *Dynamic Soil–Structure Interaction*. New York: Prentice hall, 1985.
- [47] Triantafyllidis, T., Dynamic stiffness of rigid rectangular foundations on the half-space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14 (3): 391–411, 1986.

- [48] Haupt, W., *Bodendynamik- Grundlagen und Anwendung* Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1986.
- [49] Lin, H. T., Roesset, J. M., Tassoulas, J. L., Dynamic interaction between adjacent foundations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15, 323–343, 1987.
- [50] Pais, A., Kausel, E., Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations. *Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 7 No. 4 pp. 213–227, 1988.
- [51] Karabalis, D. L., Mohammadi, M., 3-D foundation–soil–foundation dynamics by frequency domain BEM. In: *Proceedings of the thirteenth conference on boundary element*, Istanbul, Turkey: Computational Mechanics Publications, 1991.
- [52] Wang, S., Schmid, G., Dynamic structure–soil–structure interaction by FEM and BEM. *Computational Mechanics*, 9: 347–57, 1992.
- [53] Beskos, D. E., Applications of the boundary element method in dynamic soil–structure interaction. In *Development in Dynamic Soil–Structure Interaction*, Dordrecht: Kluwer Academic, p. 61–90, 1993.
- [54] Karabalis, D. L., Huang, C. F. D., 3-D foundation–soil–foundation interaction. In: *Proceedings of the ninth international conference on boundary element technology*, Paris, France, p. 197–209, 1994.
- [55] Wolf, J. P., *Foundation vibration analysis using simple physical models*. Englewood Cliffs: PTR Prentice Hall, 1994.
- [56] Sieffert, J. G., Cevaer, F., *Handbook of impedance functions. Surface Foundations*, Ouest Editions, Presses Academiques, France, 173 pp. 1992.
- [57] Karabalis, D. L., Mohammadi, M., 3-D dynamic foundation–soil–foundation interaction on a layered soil medium. Edinburgh, England, p. 73–80, 1996.
- [58] Karabalis, D. L., Mohammadi, M., 3-D dynamic foundation–soil–foundation interaction on layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17: 139–52, 1998.
- [59] Stewart, J. P., Seed, R. B., Fenves, G. L., Seismic soil-structure interaction in buildings I: Analytical aspects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 1, 1999.

- [60] Mylonakis, G., Gazetas, G., Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental? *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 4, pp. 377-40, 2000.
- [61] Lehmann, L., Antes, H., Dynamic structure–soil–structure interaction applying the symmetric Galerkin boundary method(SGBEM). *Mechanics Research Communicattons*, 28 (3): 297–304, 2001.
- [62] Darendeli, M. B., Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, Texas, 2001.
- [63] Stewart, J. P., Kim, S., Bielak, J., Dobry, R., Power, S. M., Revisions to soil-structure interaction procedures in NEHRP design provisions. *Earthquake Spektra, UCLA Previously Published Works*, V. 19, No. 3, 677-696, 2003.
- [64] Broc, D., Soil structure interaction: theoretical and experimental results. In: *Proceedings of the 2006 ASME pressure vessels and piping division conference (PVP2006/ICPVT-11): pressure vessel technologies for the global community, Vancouver, British Columbia, Canada*, p. 886–91, 2006.
- [65] Çelebi, E., Fırat, S., Çankaya, İ., Dikdörtgen rijit temellerin dinamik empedans fonksiyonları. *İmo Teknik Dergi*, 3827-3849, Yazı 252, Ankara, 2006.
- [66] Mylonakis, G., Nikolaou, S., Gazetas, G., Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 824-853, 2006.
- [67] Livaoglu, R., Dogangun, A., Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid–structure-soil interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 27, Issue 9, Pages 855-863, 2007.
- [68] Semblat, J., Kham, M., Bard, P., Seismic-wave propagation in alluvial basins and influence of site-city interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (6): 2665–78, 2008.
- [69] Pitilakis, D., Dietz, M., Muir Wood, D., Clouteau, D., Modaressi, A., Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*. 28 (6): 453-467, 2008.
- [70] Han, Y. C., Dynamic analysis for foundation of vibrating equipments considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 71-76, 2010.

- [71] Aydınöğlu, M. N., Zayıf zeminlerde yapılan binalarda dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi için uygulamaya yönelik bir hesap yöntemi. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Rapor No. 2011/1, 2011.
- [72] Rayhani, M., El Naggar, M.H., Physical and numerical modelling of seismic soil- structure interaction in layered soils. *Journal Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2): 331-342, 2012.
- [73] Ptilakis, D., Moderessi-Farahmand-Razavi, A., Clouteau, D., Equivalent-linear dynamic impedance functions of surface foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (7): 1130-1139, 2013.
- [74] Celebi, E., Kirtel, O., Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations. *Construction and Building Materials*, Vol.42, pp.122-131, 2013.
- [75] Givens, M. J., Dynamic soil-structure interaction of instrumented buildings and test structures. Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, California, Advisor: Jonathan P. Stewart, 2013.
- [76] Gazetas, G., Anastasopoulos, I., Adamidis, O., Kontoroupi, T., Nonlinear rocking stiffness of foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 47, pp.83-91, 2013.
- [77] Galvin, P., Romero, A., Technical note a MATLAB toolbox for soil-structure interaction analysis with finite and boundary elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 57, Pages 10-14, 2014.
- [78] Adamidis, O., Gazetas, G., Anastasopoulos, I., Argyrou, C., Equivalent-linear stiffness and damping in rocking of circular and strip foundations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12(3), 1177-1200, 2014.
- [79] Ptilakis, D., Karatzetzou, A., Dynamic stiffness of monumental flexible masonry foundations. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 13(1): 67-82,2015.
- [80] Ntritsos, N., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Static and cyclic undrained response of square embedded foundations. *Géotechnique* 00, 14, p 205, 2015.

- [81] Durante, M. G., Di Sarno, L., Mylonakis, G., Taylor, C. A., Simonelli, A. L., Soil-pile-structure interaction: experimental outcomes from shaking table tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 45, pp. 1041-1061, 2016.
- [82] Givens, M. J., Mylonakis, G., Stewart, J. P., Modular analytical solutions for foundation damping in soil-structure interaction applications. *Earthquake Spectra*, Vol. 32., pp. 1749-1768, 2016.
- [83] Çetinkaya, M. Y., Çelebi, E., Kırtel O., Yapı-temel-zemin etkileşim probleminin Adapazarı bölgesi için empedans fonksiyonları yardımıyla analizi. *Politeknik Dergi*, 20 (2): 325-332, 2017.
- [84] Karatzia, X., Mylonakis, G., Horizontal stiffness and damping of piles in inhomogeneous soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 143, 2017.
- [85] Apsel, R. J., Luco, J. E., Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: an integral equation approach. *J. Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 15, 213-231, 1987.
- [86] DBYBHY, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [87] MATLAB, The language of technical computing.2014a.
- [88] Veletsos, A. S., Nair, V. V., Seismic interaction of structures on hysteretic foundations. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 101, pp. 109-129, 1975.
- [89] Bielak, J., Dynamic behavior of structures with embedded foundations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 3, pp. 259-274, 1975.
- [90] Givens, M. J., Stewart, J. P., Haselton, C. B., Mazzoni, S., Assessment of soil-structure interaction modeling strategies for response history analysis of buildings. 15 WCEE, LISBOA, 2012.
- [91] Veletsos, A. S., Dynamics of structure-foundation systems. *Structural and Geotechnical Mechanics*, W. J. Hall, ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 333-361, 1977.
- [92] Tümsek, Y., Çelebi, E., The effect of geometrical (radiation) damping on soil-structure interaction problems. *International Science and Technology Conference, ISTEC 2016, Vienna, Austria, 2016.*

- [93] EZ-FRISK 7.52, Software for earthquake ground motion estimation. March, 2011.
- [94] İzmit Belediyesi, Zemin ve temel etüt raporu. Kent Konut Tuana Evleri, Rapor No 09/004, İzmit, Kocaeli, 2013.
- [95] SeismoSoft, SeismoSignal 5.1.2., Computer program for earthquake engineering software solutions. URL: licensing@seismosoft.com, 2015.
- [96] PEER, Pacific earthquake research center strong motion database.
- [97] Sakarya Üniversitesi Döner Sermaye İşletmesi, Zemin ve temel etüt raporu. 23 Pafta, 189 Ada, 66 Parsel, Adapazarı, Sakarya, 2013.
- [98] Sakarya Üniversitesi Döner Sermaye İşletmesi, Zemin ve temel etüt raporu. 52 Pafta, 493 Ada, 37 Parsel, Adapazarı, Sakarya, 2014.
- [99] Bedirhanoğlu Zemin Yapı Mühendislik Hizmetleri San. Tic. Ltd. Şti., Zemin ve temel etüt raporu. 8 Pafta, 1429 Ada, 79 Parsel, Kadıköy, İstanbul, 2016.
- [100] Kramer, S. L., Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Inc., 1996.
- [101] Bozkurtoğlu, E., Yazıcı, M., İş, M., Trakya formasyonu silt taşlarının zemin özellikleri. Uygulamalı Yerbilimleri, No 1, 42-55, Ayazağa, İstanbul, 2010.
- [102] Pala, M., Caglar, N., Elmas, M., Cevik, A., Saribiyik, M., Dynamic soil-structure interaction analysis of buildings by neural networks. Construction and Building Materials, Vol. 22, pp. 330-342, 2008.
- [103] Gazetas, G., Foundation vibrations. Foundation Engineering Handbook, 2nd Edition, Chapter 15, H.-Y. Fang, ed., Chapman and Hall, New York, 1991.

EKLER

EK A: STATİK RİJİTLİK (K_x ve K_{yy}) KATSAYILARI HESAPLAYAN MATLAB KODU

```
clear all          % Killi Z1 zemin sınıfı için;
clc
Vs=192;           % Kayma dalga hızı (m/sn)
B1=3.5;           % Temel genişliği yarı (m)
h=12;             % Yapı yüksekliği (m)
L=8.5;           % Temel uzunluğu yarı (m)
B=1;
D=0.5;           % D/B Temel gömülme derinliği
v=0.388;         % Poisson oranı
G=52600;         % Kayma modülü (kN/m^2)
nx=(1+(0.33+(1.34/(L/B1+1)))*((D/B)^0.8));           % Ötelenme gömülü
düzeltme katsayısı
nyy=(1+(D/B)+(1.6/(0.35+((L/B1)^4)))*((D/B)^2));     % Dönme gömülü
düzeltme katsayısı
Kx_sur=(G*B1/(2-v))*(6.8*((L/B1)^0.65)+2.4);         % Yüzeysel temel için
statik ötelenme rijitliği
Kyy_sur=((G*B1^3)/(1-v))*(3.73*((L/B1)^2.4)+0.27);   % Yüzeysel temel için
statik dönme rijitliği
Kx_emb=Kx_sur*nx;          % Gömülü temel için statik ötelenme rijitliği
Kyy_emb=Kyy_sur*nyy;      % Gömülü temel için statik dönme rijitliği
```

**EK B: EMPEDANS FONKSİYONLARINI (k_x ve k_{yy}) HESAPLAYAN
MATLAB KODU**

```

clear all
clc
% Killi Z1 zemin sınıfı için;

Vs=192;           % Kayma dalga hızı (m/sn)
B1=3.5;           % Temel genişliği yarısı (m)
h=12;             % Yapı yüksekliği (m)
L=8.5;           % Temel uzunluğu yarısı (m)
B=1;
D=0.5;           % D/B Temel gömülme derinliği
v=0.388;         % Poisson oranı
G=52600;         % Kayma modülü (kN/m^2)

nx=(1+(0.33+(1.34/(L/B1+1)))*((D/B)^0.8));           % Ötelenme gömülü
düzeltilme katsayısı
nyy=(1+(D/B)+(1.6/(0.35+((L/B1)^4)))*((D/B)^2));     % Dönme gömülü
düzeltilme katsayısı
Kx_sur=(G*B1/(2-v))*(6.8*((L/B1)^0.65)+2.4);         % Yüzeysel temel için
statik ötelenme rijitliği
Kyy_sur=((G*B1^3)/(1-v))*(3.73*((L/B1)^2.4)+0.27);   % Yüzeysel temel için
statik dönme rijitliği
Kx_emb=Kx_sur*nx;                                     % Gömülü temel için statik ötelenme rijitliği
Kyy_emb=Kyy_sur*nyy;                                  % Gömülü temel için statik ötelenme rijitliği

```

```

n=3;
j=1;

for a0=0:0.214:3; % Elastik yarı uzay için boyutsuz frekans parametresi

    alfax(j)=1; % Ötelenme dinamik rijitliği dönüşüm katsayısı
    alfayy(j)=(1-((0.55*(a0^2))/((0.6+(1.4/((L/B1)^3)))+a0^2))); % Dönme
    dinamik rijitliği dönüşüm katsayısı
    kx(j)=alfax(j)*Kx_emb; % Ötelenme dinamik rijitliği
    kyy(j)=alfayy(j)*Kyy_emb; % Dönme dinamik rijitliği

j=j+1;
end

a0=0:0.214:3;
figure(1)
plot(a0,alfayy,'. '),xlabel('a0'),ylabel('alfayy'),grid
figure(2)
plot(a0,kx,'. '),xlabel('a0'),ylabel('kx'),grid
figure(3)
plot(a0,kyy,'. '),xlabel('a0'),ylabel('kyy'),grid
figure(4)
plot(a0,alfax,'. '),xlabel('a0'),ylabel('alfax'),grid

```

EK C: YAPI-TEMEL-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN SÖNÜMÜNÜ (β_0) HESAPLAYAN MATLAB KODU

```

clear all
clc % Killi Z1 zemin sınıfı için;
Vs=192; % Kayma dalga hızı (m/sn)
B1=3.5; % Temel genişliği yarası (m)
h=12; % Yapı yüksekliği (m)

```


$L=8.5;$ % Temel uzunluğu yarısı (m)
 $B=1;$
 $D=0.5;$ % D/B Temel gömülme derinliği
 $k=100000;$ % Yanal ötelenme rijitliği (kN/m)
 $m=500;$ % Ağırlık (kN)
 $\nu=0.388;$ % Poisson oranı
 $y=\sqrt{(2*(1-\nu))/(1-2*\nu)};$
 $Betas=0.05;$ % Zeminin histeresiz sönümü
 $Betai=0.05;$ % Ankastre bağlı üst yapının yapısal sönümü
 $G=52600;$ % Kayma modülü (kN/m²)

$T=2*3.14*\sqrt{m/k};$ % Zemine rijit bağlı sistemin periyodu
 $n_x=(1+(0.33+(1.34/(L/B1+1))))*((D/B)^{0.8});$ % Ötelenme gömülü düzeltme katsayısı
 $n_{yy}=(1+(D/B)+(1.6/(0.35+((L/B1)^4))))*((D/B)^2);$ % Dönme gömülü düzeltme katsayısı
 $K_{x_sur}=(G*B1/(2-\nu))*(6.8*((L/B1)^{0.65})+2.4);$ % Yüzeysel temel için statik ötelenme rijitliği
 $K_{yy_sur}=((G*B1^3)/(1-\nu))*(3.73*((L/B1)^{2.4})+0.27);$ % Yüzeysel temel için statik dönme rijitliği
 $K_{x_emb}=K_{x_sur}*n_x;$ % Gömülü temel için statik ötelenme rijitliği
 $K_{yy_emb}=K_{yy_sur}*n_{yy};$ % Gömülü temel için statik dönme rijitliği

$n=3;$
 $j=1;$

$\text{for } a_0=0:0.214:3;$ % Elastik yarı uzay için boyutsuz frekans parametresi

$\text{alfax}(j)=1;$ % Ötelenme dinamik rijitliği dönüşüm katsayısı
 $\text{alfayy}(j)=(1-((0.55*(a_0^2))/((0.6+(1.4/((L/B1)^3))+a_0^2))));$ % Dönme dinamik rijitliği dönüşüm katsayısı
 $k_x(j)=\text{alfax}(j)*K_{x_emb};$ % Ötelenme dinamik rijitliği

```

kyy(j)=alfayy(j)*Kyy_emb; % Dönme dinamik rijitliği
Toran(j)=sqrt(1+(k/kx(j))+((k*h^2)/kyy(j))); % YZDE periyodunun zemine rijit
bağlı sistemin periyoduna oranı
Tyzde(j)=T*sqrt(1+(k/kx(j))+((k*h^2)/kyy(j))); % YZDE sistemin periyodu
Tx(j)=2*3.14*sqrt(m/kx(j));
Tyy(j)=2*3.14*sqrt((m*(h^2))/kyy(j));
Betax(j)=((4*((L/B1)+((D/B)*(y+(L/B1)))))/(Kx_emb/ (G*B1)))*(a0/(2*alfax(j)));
% Ötelenme doğrultusundaki radyasyon sönüm
Betayy(j)=((((4/3)*(((L/B1)^3)*(D/B)+(y*((D/B)^3)*(L/B1))+((D/B)^3)+(3*(D/B)*
((L/B1)^2))+y*((L/B1)^3)))*(a0)/ ((Kyy_emb/(G*(B1^3)))*((1.8/(1+1.75*(L/B1-
1)))+a0^2))) +((4/3)*(L/B1+y)*((D/B)^3)/(Kyy_emb/(G*(B1^3)))))*
(a0/(2*alfayy(j))); % Dönme titreşimi sonucunda oluşan radyasyon sönüm
Betaf(j)=(1-(1/(Toran(j)^2)))*Betas+((Betax(j))/ ((Tyzde(j)/Tx(j))^2))+
((Betayy(j))/((Tyzde(j)/ Tyy(j))^2)); % Temel ortamında oluşan sönüm

Beta0(j)=Betaf(j)+(Betai/((Toran(j))^2)); % YZDE sisteminin sönümü

j=j+1;
end

a0=0:0.214:3;
figure (1)
plot(a0,Toran,'-'),xlabel('a0'),ylabel('Toran'),grid
figure (2)
plot(a0,Beta0,'-'),xlabel('a0'),ylabel('Beta0'),grid
figure(3)
plot(a0,alfayy,'. '),xlabel('a0'),ylabel('alfayy'),grid
figure(4)
plot(a0,kx,'. '),xlabel('a0'),ylabel('kx'),grid
figure(5)
plot(a0,kyy,'. '),xlabel('a0'),ylabel('kyy'),grid

```

```

figure(6)
plot(a0,Betax,','),xlabel('a0'),ylabel('Betax'),grid
figure(7)
plot(a0,Betayy,','),xlabel('a0'),ylabel('Betayy'),grid
figure(8)
plot(a0,alfayy,','),xlabel('a0'),ylabel('alfayy'),grid

```

**EK D: ZEMİNİN KAYMAYA KARŞI GÖSTERMİŞ OLDUĞU DİRENCİN
DEĞİŞİMİ DİKKATE ALINMASIYLA HESAPLANAN EMPEDANS
FONKSİYONLARIN MATLAB KODU**

```

clear all
clc
close all

Gmax=942600;      % Kayma modülü (kN/m^2)
v=0.31;          % Poisson oranı
B=4;             % Temel genişliği yarısı (m)
L=4;             % Temel uzunluğun yarısı (m)
D=0,5;          % Gömülme oranı (D/B)

nx=(1+(0.33+(1.34/(L/B)+1))*(D^0.8));    % Ötelenme gömülü düzeltme katsayısı
nyy=(1+D*(1.6/(0.35+((L/B)^4)))*(D^2));  % dönme gömülü düzeltme katsayısı

i=1;

psz=logspace(-4,0,15); % psz= Kayma şekil değiştirme(Strain)
lpsz=length(psz);
G =zeros(lpsz,1);
Kx =zeros(lpsz,1);
Kyy =zeros(lpsz,1);
d=zeros(lpsz,1);

```

```

for i=1:lpsz                                % G(i-1)deki d(i-1) hesabına yerleştir

    G(1)= Gmax;                            % Araziden alınan kayma modülü(kN/m2)
    sigma=psz(i);
    if(sigma)<=0.0016                        %1.Bölge
        d(i)=1;
    elseif(sigma >0.0016 && sigma<=0.01)    %2.Bölge
        d(i)=-0.1256*log10(sigma)+0.6488;
    elseif( sigma>0.01 && sigma<=0.036)     %3.Bölge
        d(i)=-0.2696*log10(sigma)+0.3608;
    elseif( sigma>0.036 && sigma<=0.24)     %4.Bölge
        d(i)=-0.4976*log10(sigma)+0.0316;
    elseif( sigma>0.24 && sigma<=1)         %5.Bölge
        d(i)=-0.3388*log10(sigma)+0.1300;
    elseif( sigma>1 )                       %6.Bölge
        d(i)=-0.1287*log10(sigma)+0.13;
    end

    G(i)=((Gmax)*d(i));                    % Değişken kayma modülü (kN/m2)
    Kx(i)=(G(i)*B/(2-v))*(6.8*((L/B)^0.65)+2.4); % Yüzeysel temel için statik
ötelenme rijitliği
    Kyy(i)=(G(i)*B^3)/(1-v)*(3.73*((L/B)^2.4)+0.27); %Yüzeysel temel için statik
dönme rijitliği
    end

j=1;

for a0=0:0.214:3;                          % Elastik yarıuzay için boyutsuz frekans parametresi

    Kxemb(j)=Kx(j)*nx;                    % Gömülü temel için statik ötelenme rijitliği
    Kyyemb(j)=Kyy(j)*nyy;                % Gömülü temel için statik dönme rijitliği
    alfax(j)=1;                          % Ötelenme dinamik rijit dönüşüm katsayıları

```

```

alfayy(j)=(1-(0.55*((a0)^2))/((0.6+(1.4/((L/B)^3)) +(a0)^2)));
kx(j)=alfax(j)*Kxemb(j);      % Ötelenme dinamik rijitliği
kyy(j)=alfayy(j)*Kyyemb(j);   % Dönme dinamik rijitliği

j=j+1;
end

a0=0:0.214:3;
figure(1)
plot(a0,kyy,'. '),xlabel('a0'),ylabel('kyy'),grid
figure(2)
plot(a0,kx,'. '),xlabel('a0'),ylabel('kx'),grid
figure3 = figure('Color',[1 1 1]);

xt=[ 0.0001 0.0002 0.0005 0.001 0.002 0.005 0.01 0.02 0.05 0.1 0.2 0.5 1 2 5];
% Kayma şekil değiştirme aralığı
semilogx(psz,Kx); % Create axes
grid on;
set(gca,'xtick',xt)
set(gca,'xminorgrid','on')
xlabel('Kayma şekil değiştirmesi (%)','FontName','Times New Roman');
ylabel('Kx (kN/m)','FontName','Times New Roman');

```

ÖZGEÇMİŞ

Yeşim Tümsek, 15.05.1991'de Ağrı'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2009 yılında Çamlıca Kız Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl içerisinde başladığı Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2013 yılında Onur belgesini almaya hak kazanarak bölümünü başarıyla tamamladı. 2013-2014 yılları arasında Yapı Denetim ve Kentsel Dönüşüm Hizmetlerinde İnşaat Mühendisi olarak çalıştı. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği EABD, Yapı EBD' da yüksek lisansa başladı. 2015-2016 tarihleri arasında Sakarya Üniversitesinde aktif olarak kısmi asistan görevi yaptı. Ayrıca uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan 3 çalışması (NatHaz'16 Karabük, ICRES 2016 Bodrum ve ISTEÇ 2016 Vienna) ve uluslararası dergide yayınlanan özet (ICUEEUS 2017 Prague, Czechia) çalışması bulunmaktadır. Halen akademik çalışmalarını devam ettirmektedir.