

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAZIK TEMELLİ YAPILARIN DEPREM ETKİSİ ALTINDA
YAPI – KAZIK – ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ozan BiLAL

1109091002

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin FAHJAN

OCAK 2021

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAZIK TEMELLİ YAPILARIN DEPREM ETKİSİ ALTINDA
YAPI – KAZIK – ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ
Ozan BİLAL
1109091002

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Program: Yapı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin FAHJAN

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Murat TÜRK

Öğr. Gör. Dr. Gökhan Yazıcı

Öğr. Gör. Dr. Hadi Khanbabazadeh

Öğr. Gör. Dr. Abdullah Can Zülfikar

OCAK 2021

TEŐEKKÜR

“Kazık Temelli Yapıların Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşiminin İncelenmesi” adlı Doktora tez çalışmasının en başından itibaren desteğini, anlayışını, sabrını ve en kötü zamanda bile insanı ayağa kaldıracak enerjisini esirgemeyerek bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan, değerli ve pek kıymetli hocam, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yasin FAHJAN’a sınırlarını sahiden belirleyemeceğim sonsuzluktaki şükranlarımı sunarım.

Tezime zaman ayırarak okuyan, değerlendirmede bulunup önümü açan Prof. Dr. Murat Türk, Öğr. Gör. Dr. Gökhan Yazıcı, Öğr. Gör. Dr. Hadi Khanbabazadeh, Öğr. Gör. Dr. Abdullah Can Zülfikar’e, İnş. Yük. Müh. Emre Erbek’e, Yapı modellemesinin SAP2000’de yapılmasına olanak sağlayan İnş. Müh. Berkan Yunt’a, eğitim hayatım boyunca beni destekleyen, doğru olanı bulmama yardımcı olan bütün hocalarıma, çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Her şeyden önce O’na sonra doğaya, hayata, insanlığa ve Doktora çalışmalarının yan etkisi olarak ortaya çıkan huysuzluğa katlanan aileme, dostlarıma, yakınlarıma, çevremdeki insanlara şükranlarımı sunarım.

Ocak 2021, İstanbul

Ozan BİLAL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	2
3. TEORİ	11
3.1. Giriş	11
3.2. Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi	11
3.2.1. Kinematik Etkileşim	13
3.2.2. Eylemsizlik Etkileşimi	14
3.3. Dinamik Yapı-Zemin-Etkileşimi Çözüm Prosedürleri	16
3.3.1. Ortak Yöntem	16
3.3.2. Altsistem Yöntemi	17
4. YÖNETMELİKLERDE YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ	19
4.1. EUROCODE	19
4.2. NEHRP	20
4.3. AASHTO	24
4.4. TBDY 2018	25
5. SONLU ELEMANLAR/FARKLAR YÖNTEMLERİYLE ZEMİN ORTAMININ SAYISAL MODELİ	29
5.1. Kiriş Sonlu Eleman	30
5.2. Kabuk Sonlu Eleman	31
5.2.1. DKT-CST Hibrit Kabuk Elemanı	32
5.2.2. DKT-CST Kabuk Elemanı	33
5.2.3. Liner Yapısal Eleman	34
5.3. Kazık Elemanlar	35

5.4.	Zemin Modellemesi	36
5.4.1.	Hexahedral Izgara Ağı.....	36
5.4.2.	Izgara Ağı Büyüklük Seçimi	38
5.4.3.	<i>sig</i> ³ Histeretik Model	39
5.5.	Rayleigh Sönüm Parametreleri	41
5.6.	Sınır Koşulları.....	41
5.6.1.	Sessiz Sınırlar	42
5.6.2.	Geçirgen Sınırlar	43
6.	YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ İÇİN HAZIRLANAN NÜMERİK ANALİZ MODELLERİNİN DOğRULANMASI	45
6.1.	Kazık Modeli Doğrulaması.....	45
6.1.1.	Kazık Modeli Doğrulama Analizleri	50
6.2.	Zemin Modeli Doğrulama Analizleri.....	54
6.3.	Gömme Derinliği Doğrulama Analizleri	58
6.4.	Yapısal Elemanların Doğrulama Analizleri.....	62
7.	NÜMERİK ANALİZLER	65
7.1.	Üst Yapı.....	65
7.2.	Kazık Modellemesi	67
7.3.	Zemin Modellemesi	69
7.4.	Deprem Kaydı.....	71
8.	ANALİZ ÇIKTILARI	74
8.1.	Zemin Modeli Parametreleri – Deprem İvmesi Çarpanı.....	74
8.2.	Gömme Derinliği – Deprem İvmesi Çarpanı	86
8.3.	Kat telenmeleri – Zemin Parametreleri Değişimi	99
8.4.	Temel Seviyesindeki Spektral İvme Sonuçları	104
8.5.	DD1 Seviyesi Depremleri - Gömme Derinliği	111
9.	SONUÇLARIN TARTIŞILMASI VE ÖNERİLER	119
10.	KAYNAKÇA	126

KISALTMALAR

DİÇ	Deprem İvmesi ÇARPANI
1B	1 Boyutlu
2B	2 Boyutlu
YKZE	Yapı Kazık Zemin Etkileşimi
YZE	Yapı Zemin Etkileşimi
D_1	Ortak Yöntem, DİÇ 1
K_0.8	Kinematik Analiz, DİÇ 0.8
Ex_0.6	Gömme derinliğinin etkisi, DİÇ 0.6
YPT_FN	Yarımcı İstasyonu Faya Normal Doğrultudaki Deprem İvme Kaydı
YPT_FP	Yarımcı İstasyonu Faya Paralel Doğrultudaki Deprem İvme Kaydı
PEER NGA	Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi

TABLO LİSTESİ

Tablo 6.1 Deepsoil Zemin Modellemesi için kullanılan $V_s=150$ için örnek parametreler	56
Tablo 6.2 Gömme Derinliği Doğrulaması için histeretik malzeme modeli parametreleri	59
Tablo 6.3 Temel ve Duvar Parametreleri	60
Tablo 6.4 Gömme derinliği doğrulaması için kullanılan Deprem Kaydı bilgileri	60
Tablo 6.5 Doğrulama Analizleri Üst Yapı ve Temel Model Parametreleri	63
Tablo 7.1 Üst Yapı ve Temel Model Parametreleri	65
Tablo 7.2 ETABS yazılımıyla yapılan analiz sonuçları	67
Tablo 7.3 Kazıkların Özellikleri ve Arayüzey Parametreleri	69
Tablo 7.4 Zemin Parametreleri	70
Tablo 7.5 17 Ağustos Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu Deprem Kaydı Özellikleri (RSN 1176)	71
Tablo 8.1 DİÇ ve Zemin Özellikleri değişimine bağlı Kesme Kuvveti (F2) yüzdesel değişimi (%K/D)	74
Tablo 8.2 DİÇ ve Zemin Özellikleri değişimine bağlı Moment (M3) yüzdesel değişimi (%K/D)	75
Tablo 8.3 Gömme Derinliğine ve DİÇ'ye Bağlı Kazık Kesme Kuvveti (F2) Değişim Tablosu (Ortak Yöntem)	86
Tablo 8.4 Gömme Derinliğine ve DİÇ'ye Bağlı Kazık Moment (M3) Değişim Tablosu (Ortak Yöntem)	86
Tablo 8.5 Gömme Derinliğine ve DİÇ'ye Bağlı Kazık Kesme Kuvveti (F2) Değişim Tablosu (Kinematik Analiz)	86
Tablo 8.6 Gömme Derinliğine ve DİÇ'ye Bağlı Kazık Moment (M3) Değişim Tablosu (Kinematik Analiz)	86
Tablo 8.7 Temel orta noktasında oluşan maksimum deplasmanlar (m) (Üstyapı var)	99
Tablo 8.8 Temel orta noktasında oluşan maksimum deplasmanlar (m) (Üstyapı yok)	99
Tablo 8.9 11 Adet DD1 Seviyesi Deprem Bilgileri	111

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3-1 Kaya ve Zemin üzerindeki yapıların sismik tepkisi. (a) Arazi modeli (b) Mostra olarak gözüken kaya (c)Serbest alan (d) kinematik etkileşim (e) eylemsizlik etkileşimi (Wolf, 1985).....	12
Şekil 3-2 Derin ve Yüzeysel temeller için kinematik etkileşim tipleri (Lu, 2016)	14
Şekil 3-3 Eylemsizlik etkileşimi içerisindeki titreşen temelin (a) yatay salınım modu ve (b) dönme salınımı modu ile etrafındaki zemine boşalttığı dalga enerjisi (Lu, 2016).....	15
Şekil 3-4 Ortak Yöntem için hazırlanan model örneği (Aydınoglu, 2011).....	16
Şekil 3-5 Altsistem Yöntemiyle YKZE'nin incelenmesi (Aydınoglu, 2011)	17
Şekil 4-1 Zeminle çevrili bir bodrum katı ve etrafı düz bir eğime sahip gömülü bir bina.....	22
Şekil 4-2 Gömülü temeller için modelleme yaklaşımları	22
Şekil 5-1 Kiriş elemanları koordinat sistemi ve sonlu elemanın 12 serbestlik dereceleri (Itasca, 2012)	31
Şekil 5-2 Kabuktaki eğilme durumunu gösteren şekil: (a) plaka eğilme yüklemesine maruz kalan homojen, doğrusal elastik bir plakanın diferansiyel elemanı üzerinde oluşan gerilmeler (b) bu gerilmeler sonucu oluşan bileşke kuvvetler (Itasca, 2012)	31
Şekil 5-3 Bir kabuktaki membran hareketi: (a) düzlem-gerilme yüklemesine maruz kalan homojen, doğrusal elastik bir plakanın diferansiyel elemanı üzerinde oluşan gerilmeler (b) bu gerilmeler sonucu oluşan bileşke kuvvetler (Itasca, 2012).....	32
Şekil 5-4 Kabuk sonlu elemanlar için mevcut 18 serbestlik derecesi	32
Şekil 5-5 XY düzleminde DKT-CST hibrit kabuk sonlu elemanı: (a) Membran etkisiyle ilişkili serbestlik dereceleri (b) Eğilmeyle ilişkili serbestlik dereceleri (Itasca, 2012)	33
Şekil 5-6 PileSEL koordinat sistemi ve her bir pileSEL tarafından kullanılan kiriş sonlu elemanın 12 aktif serbestlik derecesi (Itasca, 2012)	35
Şekil 5-7 (a) Normal kuvvet yayları için eğrileri (b) Kayma kuvveti yayı için eğriler (Itasca, 2012)	36
Şekil 5-8 Karışık ayrıklaştırmanın en verimli olabileceği deformasyon modu	38
Şekil 5-9 Gerilim-Gerinim eğrisi	Şekil 5-10 Kayma Modülü ve Sönüm Sabiti
40	
Şekil 5-11 Kayma gerilmesi/gerinimi döngüsü – Elastik model ile Hardin/Drnevich histeretik sönüm modeli.....	41
Şekil 5-12 Geçirgen ve Sessiz Sınırlar (Itasca, 2012).....	43
Şekil 6-1 Raporda çalışılan sistem ve zemin profili.....	48
Şekil 6-2 Kinematik Deplasman Faktörünün İdealize Edilmiş Genel Şekli $I_u=I_u(a_0)$	49
Şekil 6-3 Doğrulama için kullanılan ivme-hız-deplasman grafikleri ($a_0=0.05$, $T=0.67sn$)....	51
Şekil 6-4 Doğrulama İçin Hazırlanan Modelin Karşıdan ve Perspektif görünümü	52
Şekil 6-5 Homojen Zemin Tabakası İçindeki Tekil Kazık Kinematik Etkileşimi ($\rho_s/\rho_p=0.7$, $\beta=0.05$ ve $v_s=0.4$).....	53
Şekil 6-6 Homojen Zemin Tabakası İçindeki 2x2 Kazık Grubunun Kinematik Etkileşimi ($\rho_s/\rho_p=0.7$, $\beta=0.05$ ve $v_s=0.4$)	53
Şekil 6-7 Vucetic&Dobry $I_p=15$ ile Darendeli düzeltilmesi yapılmış eğriler.....	54
Şekil 6-8 Flac3D için Deepsoil Eşlenik Modeli.....	56

Şekil 6-9 Flac3D ve Deepsoil İvme Spektrumu Karşılaştırması	57
Şekil 6-10 Kayma dalgalarına maruz kalan temel çizimi (a) şematik geometri ve (b) yatay ötelenme ve dönmeler için transfer fonksiyonları.....	59
Şekil 6-11 Northridge P0885 Deprem Kaydı.....	60
Şekil 6-12 Gömme derinliği doğrulama analizleri için oluşturulan model.....	61
Şekil 6-13 Temel ivmesi (u_{fn}) ve Yer ivmesi (u_g) karşılaştırması.....	61
Şekil 6-14 Analiz sonucu oluşan Hu ve NEHRP sonuçlarının karşılaştırması	62
Şekil 6-15 Yapının ETABS Modeli	62
Şekil 6-16 Yapı Flac3D Modeli.....	63
Şekil 6-17 ETABS ve Flac3D Sapma oranı, Moment ve Kesme Kuvveti karşılaştırılması ..	64
Şekil 7-1 Üstyapı Modeli	66
Şekil 7-2 Analizlerde kullanılan Kazık-Temel Modeli	68
Şekil 7-3 Zemin Modeli	69
Şekil 7-4 $I_p=15$ için G/Gmax eğrileri	70
Şekil 7-5 $I_p=15$ için Sönüm Eğrileri	71
Şekil 7-6 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu YPT_FN İvme-Zaman Grafiği	72
Şekil 7-7 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu YPT_FP İvme-Zaman Grafiği.....	72
Şekil 7-8 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu YPT_FN/FP İvme Spektrum Grafiği.....	73
Şekil 8-1 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1)	76
Şekil 8-2 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1)	76
Şekil 8-3 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8)	77
Şekil 8-4 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8)	77
Şekil 8-5 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6)	78
Şekil 8-6 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6)	78
Şekil 8-7 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4)	79
Şekil 8-8 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4)	79
Şekil 8-9 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2)	80
Şekil 8-10 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2)	80
Şekil 8-11 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1)	81
Şekil 8-12 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1)	81
Şekil 8-13 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8)	82
Şekil 8-14 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8)	82

Şekil 8-15 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6)	83
Şekil 8-16 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6)	83
Şekil 8-17 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4)	84
Şekil 8-18 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4)	84
Şekil 8-19 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2)	85
Şekil 8-20 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2)	85
Şekil 8-21 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Ortak Yöntem-Kesme Kuvveti)	87
Şekil 8-22 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Ortak Yöntem-Moment)	87
Şekil 8-23 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Kinematik Analiz-Kesme Kuvveti)	87
Şekil 8-24 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Kinematik Analiz-Moment).....	88
Şekil 8-25 Gömme derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1).....	89
Şekil 8-26 Gömme derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1).....	89
Şekil 8-27 Gömme derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8).....	90
Şekil 8-28 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8).....	90
Şekil 8-29 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6).....	91
Şekil 8-30 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6).....	91
Şekil 8-31 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4).....	92
Şekil 8-32 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4).....	92
Şekil 8-33 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2).....	93
Şekil 8-34 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2).....	93
Şekil 8-35 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1).....	94
Şekil 8-36 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1).....	94
Şekil 8-37 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8).....	95
Şekil 8-38 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8).....	95

Şekil 8-39 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6).....	96
Şekil 8-40 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6).....	96
Şekil 8-41 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4).....	97
Şekil 8-42 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4).....	97
Şekil 8-43 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2).....	98
Şekil 8-44 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2).....	98
Şekil 8-45 Vs200 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi	100
Şekil 8-46 Vs250 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi	100
Şekil 8-47 Vs350 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi	101
Şekil 8-48 Vs450 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi	101
Şekil 8-49 DİÇ=1 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi	102
Şekil 8-50 DİÇ=0.8 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi.....	102
Şekil 8-51 DİÇ=0.6 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi.....	103
Şekil 8-52 DİÇ=0.4 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi.....	103
Şekil 8-53 DİÇ=0.2 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi.....	104
Şekil 8-54 DİÇ=0.2 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)	105
Şekil 8-55 DİÇ=0.4 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)	105
Şekil 8-56 DİÇ=0.6 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)	105
Şekil 8-57 DİÇ=0.8 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)	106
Şekil 8-58 DİÇ=1 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)	106
Şekil 8-59 DİÇ=0.2 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)	106
Şekil 8-60 DİÇ=0.4 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)	107
Şekil 8-61 DİÇ=0.6 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)	107
Şekil 8-62 DİÇ=0.8 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)	107

Şekil 8-63 $DİÇ=1$ için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K).....	108
Şekil 8-64 $DİÇ=0.2$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D).....	108
Şekil 8-65 $DİÇ=0.4$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D).....	108
Şekil 8-66 $DİÇ=0.6$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D).....	109
Şekil 8-67 $DİÇ=0.2$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K).....	109
Şekil 8-68 $DİÇ=0.4$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K).....	109
Şekil 8-69 $DİÇ=0.6$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K).....	110
Şekil 8-70 Ölçeklendirilmiş İvme Spektrumları ve Deplasman Spektrumları.....	112
Şekil 8-71 $D_f=3m$ için Ötelenme ve Sapma Oranı değişimleri	113
Şekil 8-72 $D_f=9m$ için Ötelenme ve Sapma Oranı değişimleri	113
Şekil 8-73 $D_f=15m$ için Ötelenme ve Sapma Oranı değişimleri	114
Şekil 8-74 $D_f=3m$ için Kesme Kuvveti değişimleri.....	114
Şekil 8-75 $D_f=9m$ için Kesme Kuvveti değişimleri.....	115
Şekil 8-76 $D_f=15m$ için Kesme Kuvveti değişimleri.....	115
Şekil 8-77 $D_f=3m$ için Kazık Moment değişimleri	116
Şekil 8-78 $D_f=9m$ için Kazık Moment değişimleri	116
Şekil 8-79 $D_f=15m$ için Kazık Moment değişimleri	117
Şekil 8-80 $D_f=3m$ için Temel Seviyesi İvme Spektrum Eğrileri.....	117
Şekil 8-81 $D_f=9m$ için Temel Seviyesi İvme Spektrum Eğrileri.....	118
Şekil 8-82 $D_f=15m$ için Temel Seviyesi İvme Spektrum Eğrileri.....	118

SEMBOL LİSTESİ

G	: Kayma modülü
ν	: Poisson oranı
K	: Sıkışmazlık modülü
$sig3$: Histeretik (Döngüsel) model
D	: Kazık çapı
L/L_p	: Kazık boyu
s	: Kazık merkezleri arasındaki mesafe (açıklık)
u_x	: x yönündeki kazık deplasmanı
u_y	: y yönündeki kazık deplasmanı
u_z	: z yönündeki kazık deplasmanı
H_u	: Transfer fonksiyon ordinatı
V_s	: Kayma dalgası hızı
$p-y$: Doğrusal olmayan kazık eksenine dik yük-deplasman eğrisi
$t-z$: Doğrusal olmayan kazık eksenine paralel yük-deplasman eğrisi
$Q-Z$: Kazık ucu için tanımlanan düşey yay
u_h	: Salınım yer değiştirmesi
P	: Genleşme dalgaları
S	: Kesme dalgaları
θ	: Dönme Açısı
M	: Kütle matrisi
k	: Rijitlik matrisi
$P-\delta$: P-Delta
a_{gS}	: Girdi hareketinin maksimum ivmesi
$V_{s,30}$: Temel tabanından itibaren 30 m derinlik için ortalama Kayma dalgası hızı
k_j^p	: Statik rijitlik parametresi
c_j^p	: Statik sönüm parametresi
E_p	: Kazık Elastisite Modülü
E_s	: Zemin Elastisite Modülü
ρ_p, ρ_s	: Birim hacim ağırlık
ω	: Zemin doğal frekansı
a_0	: Frekans faktörü
β_s	: Histeretik sönümü
$U_{ffexp(i\omega t)}$: Harmonik kesme dalgalarından etkilenmeyen alandaki yatay salınım
U_p	: Kazıklı durumda yatay ötelenme
I_u	: Deplasman faktörü
Φ_p	: Açısal dönme
U_{ff}	: Serbest alan yatay ötelenmesi
E_p	: Kazık elastisite modülü
E_s	: Zemin elastisite modülü
T	: Periyod
ρ_s/ρ_p	: Birim hacim ağırlık oranı (Zemin/Kazık)
I_p	: Plastisite İndisi
K_n	: Kazık eksenine dik zemin sürtünme-rijitlik yay katsayısı
K_t	: Kazık eksenine paralel zemin sürtünme-rijitlik yay katsayısı

c_s, c_n	: Kohezyon
p	: Çevre uzunluğu
φ_s, φ_n	: İçsel sürtünme açısı
σ_m	: Efektif çevresel basınç
s_u	: Drenajsız kayma dayanımı
$DİÇ$: Deprem İvmesi Çarpanı
$Vs150$: $V_s = 150$ m/s değerine göre zemin ortamı oluşturulan model
$Vs200$: $V_s = 200$ m/s değerine göre zemin ortamı oluşturulan model
$Vs250$: $V_s = 250$ m/s değerine göre zemin ortamı oluşturulan model
$Vs350$: $V_s = 350$ m/s değerine göre zemin ortamı oluşturulan model
$Vs450$: $V_s = 450$ m/s değerine göre zemin ortamı oluşturulan model



ÖZET

Kazıklı temellerin deprem hareketi etkisi altındaki davranışı, yumuşak zeminlerdeki yüksek yapıların tasarımı kapsamında anlaşılmasına ihtiyaç duyulan bir konudur. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY) (2018) içeriğinde de detaylı bir şekilde tasarım için yöntemler belirlense de konunun kendisinin doğası gereği disiplinler arası olması ve her aşamada seçilen parametrelerin çeşitliliği sebebiyle anlaşılması ve tasarlanması halen karmaşık bir süreçtir. Bu problemlerin çözülmesi amacıyla literatürde kabul gören metod, 1B Eşdeğer Doğrusal/Doğrusal olmayan model ivme çıktılarının kullanıldığı, kazıklı 2B sonlu eleman analizlerinin yapıldığı ve buradan elde edilen çıktılarla tasarım yapılmasıdır. Bu yaklaşım, TBDY 2018'de Deprem Tasarım Sınıfı (DTS), Zemin Sınıfı, Bina Yükseklik sınıflarıyla kategorilendirilerek bu tür mühendislik problemlerinin çözümünde hangi yöntemlerin kullanılması gerektiğinin sınırları belirlenmiştir. Tezin literatür bölümünde de tartışılacağı üzere yumuşak zemin üzerine inşa edilen yüksek yapılarda 3B Sonlu Elemanlar/Farklar yöntemleriyle analizlerin yapılmasının zaruri olduğu belirtilmiştir. Sayısal analizler, Üst yapı-Kazıklı temel-Zemin tabakalarının hep birlikte gözönüne alınması yaklaşımı (Ortak Yöntem) veya üst yapı ile temel-kazık-zemin sisteminin ayrı ayrı ele alınması yaklaşımı (Altsistem Yöntemi) olarak ayrılmıştır. Her iki yöntemin de avantajlı yönleri olmakla birlikte ele alınan problemin boyutuna ve ihtiyacına göre yöntem belirlenmektedir. Bu çalışma kapsamında 20 katlı bir yapının Flac3D yazılımı kullanılarak kazıklı temel ve zemin ortamının birlikte modellendiği (Ortak Yöntem) ve Kinematik Etkileşimin etkisinin (Üst yapı olmadan) araştırılması amacıyla oluşturulan modellerin dinamik analiz çıktıları irdelenmiştir. Analizlerde malzeme modeli olarak, kayma modülü azalım eğrileri Vucetic ve Dobry'nin (1991) eğrileriyle kalibre edilerek kullanılan veriler sig3 histeretik (döngüsel) modelinde girdi olarak kullanılmıştır. Model sınırlarında Geçirgen Sınırlar (*Transmitting Boundaries-Free Field*) ve Sessiz Sınır (*Quiet Boundary*) şartları kabul edilmiştir. Deprem kaydı olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonundan alınan deprem kaydı, Faya Normal ve Dik yönlerde sisteme tabandan farklı oranlarda (0.2-0.4-0.6-0.8) etki ettirilmiştir. Ayrıca TBDY 2018'de belirtildiği biçimiyle 11 deprem kaydı seçilip analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Modellerdeki kazıkların çapları $D=80$ cm, boyları $L=20$ m, açıklık $s=3$ m olarak seçilmiştir. Bu varsayımlar ve koşullar doğrultusunda malzeme model parametrelerinin, gömme derinliğinin ve deprem ivme oranının dinamik analiz çıktılarının üzerindeki etkisi araştırılmış, YKZE'nin literatürel bağlamda daha iyi anlaşılması ve bu modellemeler açısından bir yol açması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda kazıklarda oluşan iç kuvvetler, bina ötelenmeleri ve ötelenme oranları, ivme spektrumları irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapı Zemin Etkileşimi, Yapı Kazık Zemin Etkileşimi, Dinamik Analiz, Sonlu Farklar, Gömme Derinliği Etkisi

ABSTRACT

The behavior of piled foundations under the effect of earthquake motion is an issue that needs to be understood in the context of design of high-rise buildings on soft soils. Although the methods for detailed design are outlined in the Turkish Building Seismic Code (2018), it is still a complex issue in the way of understanding and designing, due to multidisciplinary subject by its nature, and the variety of parameters has to be chosen by designer at every stage. To simplify this complex issue, 1D equivalent-linear/nonlinear model acceleration results are used in 2D finite element analysis software, to model and the obtain the behavior of piled-foundation in response to earthquake excitation and then use the outputs in design. This approach was based on Earthquake Design Class (DTS) and Soil Class categories in TBDY 2018, and outlines the solution of these type of civil engineering problems. As it will be discussed in the literature section of the thesis, it will be seen that it is obligatory to run 3D Numerical analysis if there is any High-Rise building on Soft Soil condition. In this context numerical analyses are performed by the approach of taking into account the superstructure-piled foundation and soil layers (Direct Method), and the approach of modeling the superstructure and the foundation-pile-soil system separately (Substructure Method). Although both methods have advantages, which one should be chosen base on the size and the needs of the problem. Scope of this study, modeling of a 20-storey building with a piled foundation and soil medium by using Flac3D software (Direct Method) and in order to investigate the effect of Kinematic Interaction, dynamic analysis without superstructure outputs were examined. In the analyses, linear elastic material model and *sig3* hysteretic (cyclic) model is implemented as soil material model. Shear modulus degradation curves are calibrated according to Vucetic and Dobry (1991) degradation curves. Transmitting Boundaries (Free Field) and Quiet Boundary conditions were assigned to the model boundaries. In dynamic analysis, as ground motion 17 August 1999 Kocaeli-Yarımca Station earthquake record selected, and arranged for Fault Normal and Fault Parallel, and the excitation is applied at the bottom of the model are scaled for various factors (0.2-0.4-0.6-0.8). Also 11 Different EQ Records were selected and applied based on TBDY 2018 regulations and results were examined in this study. The diameter, length and spacing of the piles are $D=80$ cm, $L=20$, $s=3$ m respectively. With these assumptions and conditions; It is aimed to better understand SPSI in the literary context and find better ways for these modeling by interpreting the dynamic analysis outputs of ground parameters, embedment depth and variable factored earthquake effect. As a result of these analysis, moment and shearing forces occurring in the piles due to seismic input motion, spectral acceleration at the base of the model, and drifts were examined.

Keywords: Soil Structure Interaction, SSI, Soil Pile Structure Interaction, SPSI, Dynamic Analysis, Finite Difference, Embedment Effect

1. GİRİŞ

Kazık problemleri ile ilgili teorik ayrıntılandırmalar... tamamıyla bambaşka bir dünyadır ve güvenli bir şekilde ihmal edilebilir. (Terzaghi ve Peck, 1967)

Büyükşehirlerde nüfus yoğunluğunun artmasına bağlı olarak yapılaşmanın artmasıyla merkeze yakın bölgelerdeki parsel birim m² fiyatları yükselmiş, yapı teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte konut yükseklikleri de bu ihtiyacı karşılamak amacıyla artmıştır. Bu parsellerdeki zemin profilinin, yapıların taşıma gücü ve/veya oturma kriterlerinden herhangi birini sağlamaması durumunda, derin temel/zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak yapı yükleri zemine derin temeller aracılığıyla aktarılmaktadır. Yapılan bu uygulamalar sonucunda yapı yükleri statik durumda zemin tarafından karşılanırsa da ülkemizin deprem kuşağında bulunmasından dolayı sismik etkiler dikkate alındığında yapı-zemin etkileşiminden (kinematik-eylemsizlik) kaynaklanan betonarme yapı davranışları değişmektedir. Bu konular detaylı olarak ilerleyen bölümlerde incelenecektir.

Bu çalışma, zemin ortamını *sig3* (Flac3D) eliptik modelinin kullanılarak oluşturulabileceğini varsayan bir yaklaşımla ve gerçek deprem verileriyle tahrik edilen bir sistemin tepki davranışının literatürdeki analitik ve nümerik yaklaşımlarla doğrulanmasının sağlanıp, elastik malzeme parametreleri, gömme derinliği değişiklikleri yapıldığında; kazıklarda oluşan iç kuvvet değişimlerinin hangi mertebede olduğunu anlamayı ve zemin dayanım parametreleri kullanılmadan uygulanan bu sonlu-farklar yönteminin uygulamada kullanımının bu şekilde kolaylaştırıcı etkisinin olup-olmadığını, üstyapının tepki davranışını da ötelenmeler ve sapma oranları bağlamında dikkate alarak, tezin içeriğinde belirlenen varsayımlar doğrultusunda araştırmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR

Yapı-Zemin Etkileşiminin (YZE) incelenmesi 1920'lerde Mononabe ve Okabe tarafından zeminlerin istinat duvarlarının sismik davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması olarak bu çalışmalara dayandırılmıştır. Dinamik YZE'nin araştırılması ise Erich Reissner'in (1936) yayınladığı makale ile başlamaktadır. Bu çalışmada Elastik yarım-alandaki dairesel temellerin, düşey harmonik yük altındaki davranışını incelemiştir.

Martel (1940), ABD'de meydana gelen Long Beach depreminin etkisi altındaki Hollywood Storage Binası'nın sismik davranışını gözlemsel olarak değerlendirmiştir. Merritt ve Housner (1954) bu probleme tekrar dönmüş, yatay ötelenme ve dönme etkilerini incelediklerinde dönmenin daha çok etkisinin olduğunu belirtmiştir. Ayrıca binanın uzun olan kısmında yatay ötelenme hareketinin genliğinde kayda değer bir azalmanın olduğunu gözlemlemişlerdir. Housner'in (1957) konuyu tekrar ele almasıyla, Hollywood Storage Binasının hemen altındaki ve uzağındaki hareketleri karşılaştırdığında binanın uzun kenarı boyunca zeminde oluşan dalgalarda önemli derecede filtreleme olduğunu gözlemlemiştir.

Asıl gelişmeler ise teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrikli-elektronik aletlerin artması sonucu enerji ihtiyacının karşılanması hususunda problem yaşamaya başlayan ülkelerde Nükleer Enerji Santrallerinin kurulmasıyla 1960-70'li yıllarda yaşanmıştır. Biggs'in (1964) Yapı dinamiği kitabında 3 serbestlik dereceli bir çerçevenin basit modeli bu uygulamaya örnek olarak verilmiştir.

Kausel (1974) sismik durumlarda, eylemsizlik etkileşiminden kaynaklanan zemin deformasyonlarının tek başına yeterli olmayacağını, örnek olarak rijit bir temelin hareket eden trenin sismik dalgalarına etkisinin, yüksek frekanstaki yatay ötelenme hareketlerinin filtrelenmesi ve dönme hareketlerinin ortaya çıkması olarak bahseder. İlk olarak Whitman (1970) *eylemsizlik etkileşimi* ve *kinematik etkileşim* olarak bu etkilerin ayrımını ortaya koymuştur.

Dinamik kazık davranışının sonlu eleman teknikleriyle incelenmeye başlaması Blaney, Kausel ve Roesset (1976) ve Kuhlemeyer (1979a, 1979b) tarafından

kullanılmaya başlamıştır. Buna ek olarak, elastik temel üzerindeki kiriş teorisine dayalı olarak geliştirilen, görece daha az karışık olan (yatak katsayısı yaklaşımı) Novak (1974), Matlock (1970), Reese, Cox ve Koop (1974), Reese ve Welch (1975) tarafından kullanılmıştır ($p-y$, $t-z$ eğrileri). Çoğu çalışma genel olarak yüzeysel temelli, homojen ve kalın bir zemin tabakasını baz alan, pratikte mühendisler için kullanışlı olması gözetilen, elastik yarım-alan üzerine dayanmaktadır. Seed (1975) bu etkileşimin, malzeme ve yayılım sönümünün analizden çıkarılmasından dolayı uygun olmayacağını; üstyapı, temeller, topografik ve jeolojik durumlar karmaşık olduğunda matematiksel bir model oluşturmanın zorlaştığından bahsetmiştir.

Kazıklı temeller üzerinde desteklenen çerçeve yapılarla ilgili ilk çalışmalar Buragohain vd. tarafından 1977 yılında, basitleştirilmiş varsayımlar kullanarak zemin-yapı etkileşiminin etkisini ölçmek amacıyla, kazık temel üzerine oturan uzay çerçevelerini rijitlik matrisi metodu ile değerlendirmiştir. Bu çalışmada kazık başlığı rijit kabul edilmiştir. Bütün kazık grubu için rijitlik matrisinin elde edilmesi süperpozisyon ilkesinin rijit cisim dönüşümü kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra temelin rijitlik matrisi; yapı-zemin etkileşiminin, iç kuvvetler ve oturmalar açısından yapının davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için tek bir adımda yapılan etkileşimli analizi gerçekleştirmek üzere üstyapı matrisi ile birleştirilmiştir.

Kazık gruplarının tabakalı yarı-sonsuz zemin ortamındaki dinamik davranışını araştırmak amacıyla Kaynia (1982) doktora çalışması yapmıştır. Kazığın u_z kadar deplasmanı, kazık yerine zemin olması durumunda aynı miktarda yapması için ek olarak ne kadar kuvvete ihtiyaç olması gerektiği mantığıyla matris denklemlerini oluşturmuştur. Yaptığı analitik çalışmalar sonucunda kazık davranışının frekans temelli olduğunu bulgulamıştır. Poulos'un (1980) statik grup kazık davranışının uzantısı sayılabilecek bu çalışma, etkileşim faktörlerinin homojen bir ortamda geçerli olduğunu fakat homojen olmayan ortamlarda (zemin) geçerliliğin azaldığı gözlenmiştir.

Kaynia ve Kausel (1982) dinamik kazıkların tekrarlı yükler altında, belirli bir frekansa bağlı olarak davranışını incelediğinde, kazık aralıklarının azalmasıyla birlikte ($s/d \sim 5$) grup kazıkların dinamik rijitliklerinin azaldığı bulgulanmıştır. Kazık

aralıklarının $s/d=5$ olduğu durumlarda imal edilen 4x4, 3x3, 2x2 kazıkların düşük frekanstaki yayılım sönümlenmeleri temel genişliğine bağlı olarak artmaktadır.

Fan K. vd. (1991), kendinden önceki çalışmaları özetler nitelikteki düşey olarak gelen sismik dalgaların ankastre başlıklı kazıkların yatay rijitliği üzerindeki çalışmasını paylaşmıştır. Yapılan çalışmanın içeriği bu tezin ilerleyen bölümlerinde detaylı olarak incelencektir. Kaynia ve Kausel'in (1982) çalışmalarını ileri götürür nitelikteki bu çalışmada; transfer fonksiyonlarının ordinatlarının (H_u), Kim ve Stewart'ın (2003) arazide gözlemlenen sonuçlarla karşılaştırmasını yaptığı çalışmalarında, kaydadeğer bir şekilde farklı olduğu bulgulanmıştır.

El-Marsafawi vd.'nin (1992) yaptığı deneysel çalışmada 2x3 (6 kazık) kazık grubu ile tekil kazık sonuçları irdelenmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında, kazık çapının 1/1000'i derecesindeki deplasman genliklerinde bile kazık grupları makul derecede doğrusal olmayan davranış sergilemiştir. Daha çok teorik ve deneysel çalışmanın yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Kavvads ve Gazetas'ın (1993) serbest başlıklı kazıkları incelediği çalışmada, özellikle kayma dalgası hız (V_s) değeri kontrastının yüksek olduğu zemin tabakalarında kinematik etkileşimin eğilme momentleri üzerinde çok yüksek etkisi olduğu bulgulanmıştır. Eğer bu geçiş tabakalarındaki oluşabilecek momentler dikkate alınmazsa, kazıkların tasarlanan eksenel taşıma kapasitelerinin de aşılabileceği vurgulanmıştır.

Boulanger vd. (1999) yaptığı santrifüj testleriyle dinamik $p-y$ eğrilerini karşılaştırdığı çalışmasında, dinamik $p-y$ kullanılması durumunda pik üstyapı hareketlerinin (ivme ve deplasman), santrifüj testlerinin sonuçlarına göre %15-20 daha az çıktığını bulgulanmıştır. Benzer sonuçlar kazık eğilme momentleri için de geçerlidir. Saha tepki analizleri gerçekleştirilmeyip doğrudan serbest alan hareketleri (free field motion) kullanıldığında bu sefer de pik üstyapı hareketleri %5-10 görece yukarda kalmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda daha ileri fiziksel modellere ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Mylonakis ve Gazetas'ın (2000) yılında yayınladığı makalede, geleneksel yönetmeliklerdeki spektrumla aktüel spektrum karşılaştırıldığında YZE'den kaynaklı

birincil doğal periyodun artışının her zaman yapı mühendislerinin beklediği gibi binanın lehine olan bir davranış sergilemeyeceğini bulgulamışlar ve bu tarz bir bakış açısının devam etmesinin güvenli olmayan tasarımlara yol açabileceği bildirilmiştir.

Nikolaou vd. (2001), *dinamik winkler temeli üzerindeki kiriş (BDWF)* metodu kullanılarak tekil kazıkların homojen ve tabakalı zeminlerdeki davranışının analitik olarak incelendiği çalışmanın sonuçlarını paylaşmıştır. Çalışmada Margason ve NEHRP tarafından sunulan metodların oluşturduğu trendlerin tersine, verilen eğriler ve kazık çapı arasında net bir ilişki kurulamadığı belirtilmiştir. Ayrıca kazık eğilme deformasyonları sonuçları için makalede sunulan metodla, Japonya'daki bir binanın altındaki 2 kazığın 6 farklı konumundan alınan okumalar karşılaştırıldığında uyumlu olduğu bulgulanmıştır. Belirli bir derinlikteki kazık eğilme geriniminin, zaman-tanım alanındaki kayıtların incelenmesi sonrasında baskın periyodunun, zemin tabakasının doğal periyoduna yakın olduğunu bulgulamışlardır. Bunun da grup etkisinin kinematik davranışta çok az bir önemi olduğunu göstergesi olduğunu belirtmişlerdir.

Yingcai'nin (2002) DYNAN yazılımını kullanarak 20 katlı bina temelini kazıklar üzerine oturtulduğu yapı modelinde, doğrusal olmayan yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik davranış incelenmiştir. Bu çalışmada varılan sonuca göre; yapı-zemin etkileşiminin çok iyi ele alınmadığı ankastre taban üzerine kurulu yüksek yapılar gerçek sismik davranışı yansıtmamaktadır çünkü rijitlik gerçeğin çok üstünde, sönüm ise çok altında kalmaktadır.

Lu vd. (2003) kazıklı temel üzerindeki 12 katlı bir yapıyı ANSYS kullanarak zemin özelliklerinin, yapının sertliğinin, gömme derinliğinin ve dinamik özelliklerin yapı-kazık-zemin etkileşiminin üzerindeki etkisini çalışmıştır. Bu çalışmanın sonucunda a) Sistemin doğal frekansı, zeminin dinamik kayma modülü arttıkça artmaktadır. b) YZE dikkate alındığında yapının sismik davranışı, dinamik kayma modülü de dikkate alındığında karmaşıklaşmaktadır. c) Yapının alt kısmının pik deplasman değeri üstünde, yapının üst kısmına nazaran daha çok etkisi olmuştur d) Zeminin kayma modülü azaldıkça yapının pik deplasman değeri artmaktadır. e) Kazıklar çok uzun olduğunda ve sert tabakaya girdiğinde, binanın gömme derinliğinin etkisi YZE'de çok az olmaktadır.

Zemin plastisitesinin sismik YKZE'nin üzerindeki etkisini 3 boyutlu sonlu elemanlar analizleriyle araştıran Maheswari vd. (2004) eylemsizlik etkileşiminin kazık başlık tepkisini artırdığını fakat genel olarak bina tepkisini azalttığını bulgulanmıştır. Düşük frekanslı harmonik titreşim analizlerinde zemin doğrusalsızlığının (nonlinearity), kazık başlığının ve yapının tepki davranışlarını artırıcı yönde etkilediği, yüksek frekanslarda fazla etkilemediği bulgulanmıştır. Zaman-tanım alanında yapılan analizlerin Fourier spektrumlarına bakıldığında ise yine düşük ve orta frekanslarda zemin doğrusalsızlığının kazık başlığı ve yapı üzerindeki etkisinin olduğu fakat yüksek frekanslarda fazla etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Kazık grup etkisinin, harmonik ve sismik etkilerinin pik değerlerini düşürdüğu (i.e. zemin doğrusalsızlık etkilerini düşürdüğünü) bulgulanmıştır.

Lu vd. (2005) sarsma tablasıyla yapılan deneysel çalışmalarla, ANSYS yazılımla modellediği sistem sonuçlarının karşılaştırmasını yapmıştır. Bu sonuçlara göre a) Yumuşak zeminlerde doğrusalsızlık veya zemin-yapı arayüzeyinin doğrusalsızlığı dikkate alınmazsa kayda değer hatalar ortaya çıkar b) Kazıklar ve zemin arasında ayrılma-kapanma-sıyrılma gibi durumlar şiddetli depremlerde oluşmaktadır c) Köşedeki kazıkların gerinim genliği, kenar-orta kazığın ve tam ortadakinin geriniminden daha büyüktür.

Chore ve Ingle'nin (2008 a) yaptığı çalışmalarda, çerçeve sistemli bir yapının temeli altındaki kazık grubu düzeninin (aralık, kazık sayısı, kazık çapı) YKZE üzerindeki etkisinin 3 Boyutlu Sonlu eleman yöntemiyle incelenmesi bulunmaktadır. Aynı zamanda bu çalışmalarda kazık başlığı ve zemin arasındaki etkileşim de dikkate alınmıştır. Kazık sayısı, çapı ve aralığı arttıka çerçeve sistemin en üst kısmındaki deplasman azalmıştır. YKZE'den kaynaklı kolon maksimum pozitif momentleri %14.01, maksimum negatif momentleri %27.77 oranında artmıştır. 2008(b)'de yaptığı diğer bir çalışmada temeli plak eleman, kazıkları kiriş eleman, zemin tabakasını ise doğrusal elastik bağımsız yaylar olarak modellemiştir. Bu şekilde analiz için gereken RAM miktarı 3 boyutlu model için gerekeninin 1/10'una düşmüştür. Bu iki makalede de alt sistem yöntemini kullanan Chore, daha sonra yaptığı (Chore, 2009) bir çalışmada, Ortak metodla analizler gerçekteşirmiş ve sonuçlar arasında makul derecede uyum olduğunu bulgulanmıştır.

2010 yılında Chore vd. yaptığı bir çalışmada tek katlı 2 açıklıklı, kil üzerinde oturan grup kazıklar üzerindeki esnek temelli bir yapının sonlu eleman yöntemiyle analizleri altsistem yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Kazık aralığı, yerleşimi ve çapının, çeşitli kazık ucu durumları için etkisinin araştırıldığı parametrik çalışmada; YKZE dikkate alındığında çerçevinin üst kısmında deplasmanlar %42 ila 103 arasında artmıştır. Yine bu çalışmada da kazık aralığı 3D'den 5D'ye artırıldığında çerçevenin en üst kısmındaki deplasmanlar azalmıştır. Fakat bu çalışmada yaylar kullanıldığı için kinematik ve atalet etkileşimleri dikkate alınmamış, analitik sonuçlarla uyumu araştırılmıştır.

Sushma'nın (2013) doktora tezi çalışmasında, kazık temelli 3 boyutlu sonlu elemanı modelini SAP2000 yazılımı ile oluşturmuştur. Edindiği sonuçlara göre tekil kazık ve serbest alan analiz sonuçları arasında herhangi bir farklılık bulgulanmamıştır. Deprem durumundaki tekil kazık davranışı için ileri çalışmalar gerektiğinin belirtildiği çalışmada, sabit tabanlı model ile YZE'nin dikkate alındığı modeller karşılaştırıldığında, binanın doğal frekansında kayda değer değişiklikler olduğu bulgulanmıştır. Ayrıca kazık-zemin etkileşim yüzeyinin gerilim durumu üzerindeki etkisinde, bağlantı (link) durumunun çok büyük farklılıklar yaratacağı anlaşılmıştır. Analizlerde kazık-zemin arayüzeyinde herhangi bir sürtünme etkisi dikkate alınmadığı, sadece kazık yaylarına atanan boşluk (gap) dikkate alındığı için böyle bir fark yaratacağı düşünülmektedir. Aynı dinamik karakteristiğe sahip benzer yapılarda YZE'nin etkisinin çok önemli olduğu bulgulanmış, özellikle birbirine yakın binaların bulunması durumunda ortada bulunan yapılarda sismik dalgalar daha çok hapsedildiği için daha çok etkilendiği bulunmuştur. Değişik yüksekliklerdeki binaların etkileşimleri incelendiğinde 15 katlı binanın tepkisi 10 katlı binaya göre daha düşük olmuştur ki bu tepki sabit tabanlı analizlerde gözlenmemiştir. Yapılan çalışmalar ışığında, doğrusalsızlık, kazık-zemin ve kazık-kazık etkileşiminin dinamik analizler üzerinde büyük etkisinin olduğu bulgulanmıştır.

Martinelli ve Tamagininin (2013) boşluk suyu basınçlarının oluşmasının ve sönmelenmesinin de dikkate alındığı, uç direnci kazıklı ve 2 zemin tabakasının bulunduğu, 3 boyutlu tam birleştirilmiş (*fully coupled*) dinamik analizlerin sonuçlarının paylaşıldığı doktora tezinde, göreceli olarak yüksek geçirimsizliği olan zeminlerde bile kayda değer boşluk suyu basınç artışları bulgulanmıştır. Bu durum da

kazık-zemin sisteminin (kazık yükleri – yüzey alan ivmeleri) tasarımını önemli ölçüde etkileyecektir. Yaptıkları karşılaştırmalara göre, basitleştirilmiş metodlar arasında en iyi performans gösteren çalışma, ağırlıklı olarak saha tepki analizi sonuçlarına dayanan Di Laora vd. (2012) tarafından yapılmış olmasına rağmen halen basitleştirilmiş bu metodların aşırı boşluk suyu basıncını dikkate alınmamasının bir eksiklik olduğu belirtilmiştir.

Hokmabadi vd. (2014) tarafından yapılan yüzen kazıklar üzerindeki binanın deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının değerlendirildiği çalışmada, ankastre temelli binalara göre yüzen kazıklı temelli binalar daha fazla yatay deplasman sergilemiştir (%34 deneysel - %27 nümerik analiz sonuçlarına göre). Bu fark yüzeysel temellerle karşılaştırıldığında daha da fazladır (%55 deneysel - %59 nümerik analizler). Bu sonuçlardan dolayı yumuşak zeminler üzerindeki binalardaki YZE'nin dikkate alınmaması durumunda (ankastre temelli çözülmesi durumunda) tasarımın neredeyse binanın yıkımına yol açabilecek duruma geldiği bulgulanmıştır.

Luo vd. (2016) sismik YKZE etkileşiminin incelendiği çalışmasında eşdeğer doğrusal zemin modeli ve doğrusal olmayan zemin modeliyle yapılan analizler karşılaştırılmıştır. Sismik YKZE'nin zemin doğrusalsızlığından çok yüksek ölçüde etkilendiği ve eşdeğer doğrusal zemin modelinin yapısal ivme tepkisini gerçekte olandan daha az hesapladığı bulgulanmıştır. Deprem etkisi altındaki YKZE'nin araştırılmasında mutlaka doğrusal olmayan zemin modellerinin tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Zemin-kazık arayüzeyinin doğrusalsızlığının sistemin dinamik tepkisi üzerinde büyük etkisinin olduğu bulgulanmış ve genişleme açısının (*dilation angle*) YKZE üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Hussein vd. (2016) tarafından yapılan, tekil ve 3x3 grup kazıkları üzerinde 40g ivmeli santrifüj çalışmaları yapılmıştır. 12 adet sinüsoidal dalga birleşiminin girdi ivmesi olarak kullanıldığı deneylerde, sismik hareketin baskın frekansının zemin rezonansına yakın olduğu durumlarda kinematik etkileşimin mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle serbest başlıklı kazıklarda grubun merkezinde bulunan kazıklarda en yüksek momentin oluştuğu, onu kenardaki kazıkların izlediği ve en son olarak da köşedeki kazıklarda en düşük momentin oluştuğu belirtilmiştir. Yapının desteklendiği kazıklarda (başlıklı kazıklar) uygulanan titreşimin baskın

frekansı, zemin-yapı-kazık sisteminin efektif doğal frekansına yaklaştığında, yapısal titreşimler kazıklar üzerinde çok yüksek eğilme momentleri oluşturmaktadır. Serbest başlı grup kazıkların aksine, merkezdeki kazıklarda en düşük momentler bulgulanmakta, kenardaki kazıklardan köşeye gittikçe artmaktadır.

Zhang ve Liu (2017) tarafından sismik YKZE'nin incelenmesi (özellikle kazık eğilme momentinin ve üstyapı davranışının) için kil zeminde hiperbolik-histeretik zemin modellerinin kullanıldığı 3 boyutlu sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonuçları da önceki çeşitli çalışmalarda kullanılan santrifüj deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve iyi sonuçların alındığı bulgulanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda kazık eğilme momentinin hesaplanabilmesi için de bir formülasyonun sunulduğu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalarda belirtildiği gibi üstyapının YKZE üzerinde çok önemli etkisinin olduğu ve beraber modellenmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Ullah vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, frekans tanım alanındaki dinamik davranış analizinde kazıklı bir sistemin deneysel sonuçları, *altsistem metodunun* doğrulamasını yapmak amacıyla analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sarsma tablasıyla bütün zemin tabakası titreştirilmiş ve ayrıca kazık başlığından da yükleme yapılarak kazık rijitlik matrisi (empedans fonksiyonu) elde edilmiştir. Makale içerisinde bahsedilen analitik formüller vasıtasıyla yapıya empoze edilen bu sonuçlar, deneysel sonuçlarla da karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edilmiş, bununla birlikte de süperpozisyon (kinematik-atalet etkileşimi) ilkesinin geçerliliğini doğrulamışlardır. Ayrıca yapı ve zemin için baskın frekans modlarının olduğu bölgelerdeki büyütme oranları, deneysel ve analitik sonuçlarda kayda değer farklılık göstermiştir. Bunun sebebinin ise yayılım/döngüsel (radiation/hysteretic) sönümden ve/veya kazık-zemin rijitlik farkından dolayı kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür. Yaptıkları çalışmanın frekans-tanım alanında olması dolayısıyla, süperpozisyon metodunun sadece bu alanda geçerli olduğunu belirtmiş ve bu çalışmanın yapılara, zemin tabakalarına genellenmemesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Baziar vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, kazıklı temel üstündeki 2 farklı rijitliğe sahip üstyapının, 2 fiziksel test (sarsma tablası ve santrifüj) sonucu irdelenmiştir. Yapılan incelemelerde, sisteme düşük ivme (0.14g) uygulandığında

sistemin davranışı, yapısal frekanstan daha çok etkilenmiş ve rezonans durumu tarafından domine edilmiştir fakat yüksek ivmeli bir yer hareketi uygulandığında (0.4g) sistemin davranışının daha çok deprem hareketinin bir fonksiyonu haline geldiği belirtilmiştir. Güçlü yer hareketinin olduğu durumlarda zemin ve yapının doğrusalsızlığı daha baskın hale geldiği için sistemin davranışı daha çok yer hareketinin frekansına bağlı hale geldiği ayrıca yorumlanmıştır. Bu çalışmanın asli olarak bulduğu şey; güçlü sarsma olduğunda sistemin frekansı düştüğü için, sistemin doğal frekansından daha düşük frekanslarda daha yüksek tepki gösterdiği. Sonuç olarak tasarımcıların, sistemin davranışını elde etmek ve temeldeki kuvvetleri doğru elde edebilmesi için bütün sistemi modellemeleri gerektiği belirtilmiştir.

Rahmani vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada API (American Petroleum Institute) tarafından önerilen ve çeşitli yönetmeliklerde de kullanılması önerilen p - y eğrilerinin güvenilirliğini araştırmak amaçlı olarak 27 adet orijinal ölçekte deneylerin (arazi-statik-santrifüj) simülasyonları ve sonuçları değerlendirilmiştir. Kazık başlarındaki deplasmanlar için hata %5-150 arasında değişirken kazık eğilme momentleri %5-90 arasında değişmektedir. API'nin sağladığı p - y eğrileri, kumlar için kullanıldığında deplasmanlar ve eğilme momentleri (%72) daha az çıkarken killer için gerçek değerlere göre daha yüksek (%47) çıkmaktadır. Ayrıca *pushover* analizlerinden elde edilen p - y eğrilerinin gerçek durumdaki yükleme-boşaltma davranışını iyi sergilemediği için sonuçları da iyileştirmediği bulgulanmıştır. Bunların asli nedenlerinin arasında kazık-zemin etkileşiminin 3 boyutlu doğasından ve bu durumun kinematik – atalet etkileşimlerinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Sonuç olarak yazılım ve donanımın gelişmesiyle birlikte tam ölçekli modellemelerin yapılıp, en uygun maliyetli tasarımların yapılması önerilmiştir.

3. TEORİ

3.1. Giriş

Yapı Zemin Etkileşimi'nin (YZE) son yıllarda hemen hemen bütün yönetmeliklerde de dikkate alınmasıyla birlikte bu alanda yapılan analitik, nümerik ve deneysel çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle enerji ihtiyacı dolayısıyla çok sayıda yapılmaya çalışılan ve fakat deprem anında da hizmet vermesi gereken Nükleer Santral yapılarının çoğalması, bilgisayarların hafıza/işlem kapasitesinin de artmasıyla birlikte modellemeler hız kazanmıştır. Tasarlanan modellerin kolaylıkla bilgisayar yazılımlarıyla oluşturulup analiz edilebilmesiyle birlikte etkileşimler daha anlaşılır hale gelmeye başladı.

Konuya dair literatür önceki bölümde incelenmiş olmasına rağmen, genel olarak bakıldığında ilk olarak bina temelleri ankastre olarak çözülmüş ve zeminin etkisi dikkate alınmamıştır. 60'ların sonlarına (Seed ve Idriss 1969), 70'lerin ortalarına gelindiğinde zeminin etkisinin de dikkate alındığı analitik çözümler oluşturulmaya başlanmıştır. [Luco (1974), Kausel (1974)] Fakat daha sonra bu analitik çözümlerle, sonlu elemanların da etkin kullanımıyla birlikte yapılan analizler karşılaştırıldığında farklılıkların ortaya çıkmaya başladığı bulguları ve çözüm yöntemleri aranmaya başlandı. İlk olarak altsistem yöntemiyle çözüm Vaish ve Chopra'nın (1974) yazdığı makalede anlatılmıştır. İlk etapta temelin çözümü yapıdan bağımsız olarak yapılmış ve daha sonrasında yapıyı da ayrıca frekans-tanım alanında çözmüştür.

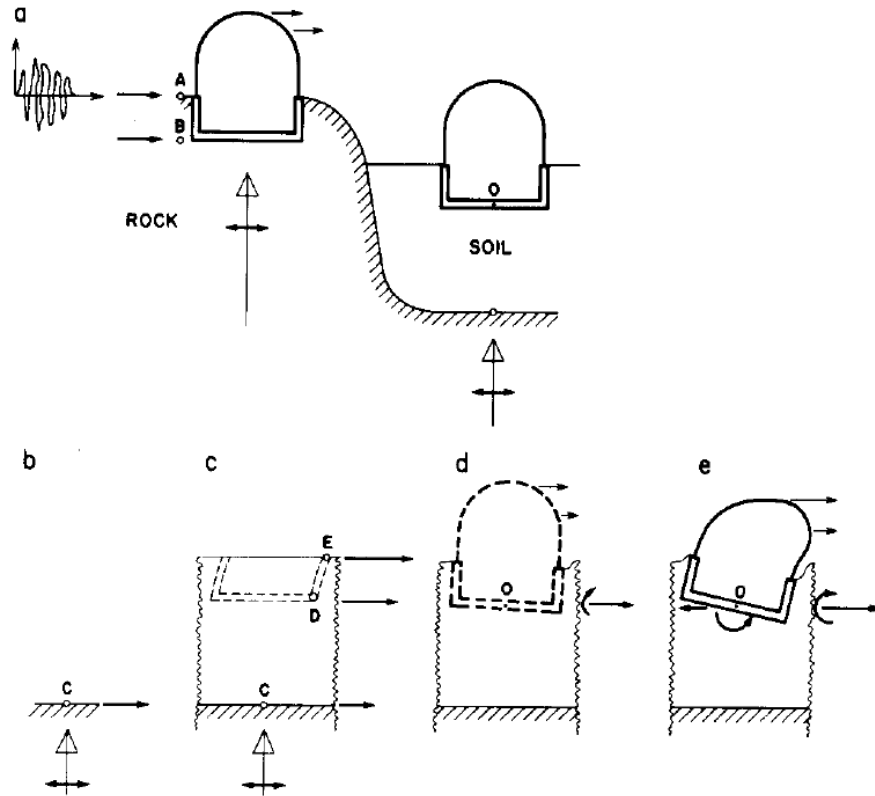
YZE'nin çözümü olarak direkt ve altsistem yönteminin anlatıldığı rapor 1976 yılında Kausel tarafından yayımlanmıştır. Bu raporda ayrıca kinematik ve eylemsizlik etkileşimi detaylı olarak incelenmiştir. Günümüzde de halâ kullanılan bu çözüm prosedürleri aşağıdaki başlıkların altındaki bölümlerde açıklanacaktır.

3.2. Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi

Wolf (1985), kaya üzerine oturtulmuş bir yapı ile zemin üzerine oturtulmuş bir yapının karşılaştırmasını sunarak YZE'nin belirgin özellikleri Şekil 3-1a'da örneklendirmiştir. Yapıların arasındaki mesafe az olduğu için, deprem kaynağından gelen sismik dalgaların ulaşması aynı zamanda olduğu varsayılmıştır. Modelin

basitliği açısından da düşey olarak yayılım sergileyen yatay hareket seçilmiştir. şekil 2-1'a gösterilen okların büyüklüğü deprem hareketinin büyüklüğüne oranlı olarak çizilmiştir. Kontrol noktası olarak kayanın yüzeyindeki 'A noktası' seçilmiştir. Pratik olarak 'B noktası'ndaki hareket de aynı olacaktır.

Kaya zerindeki yapı için, pratik anlamda A ve B noktalarındaki hareketler birbirinden çok da farklı olmayacağı için yatay deprem hareketi direkt olarak yapıya etkitilebilir. Eğer binanın yanal yapısal rijitliği çok yüksekse, yapı yüksekliği boyunca sabit olan yatay ivmeler ortaya çıkar. Buna bağlı olarak da tabanda kesme kuvvetleri ve momentler ortaya çıkar. Bu durumda kaya çok rijit olduğu için yatay kesme kuvvetleri ve sallanma hareketleri, yapının etrafındaki zeminde ek olarak bir deformasyona yol amayacaktır. Bu bağlamda aslında zemin ve yapı birbirine bitişik ve beraber hareket eden bir sistem olacaktır.



şekil 3-1 Kaya ve Zemin zerindeki yapıların sismik tepkisi. (a) Arazi modeli (b) Mostra olarak gözüken kaya (c)Serbest alan (d) kinematik etkileşim (e) eylemsizlik etkileşimi (Wolf, 1985)

Zeminin zerine inşa edilen yapı incelendiğinde kayadaki yapıya görece farklı bir davranışın sergilendiği görülecektir. Bu farklılığın neden olduğuunu anlamak için 3

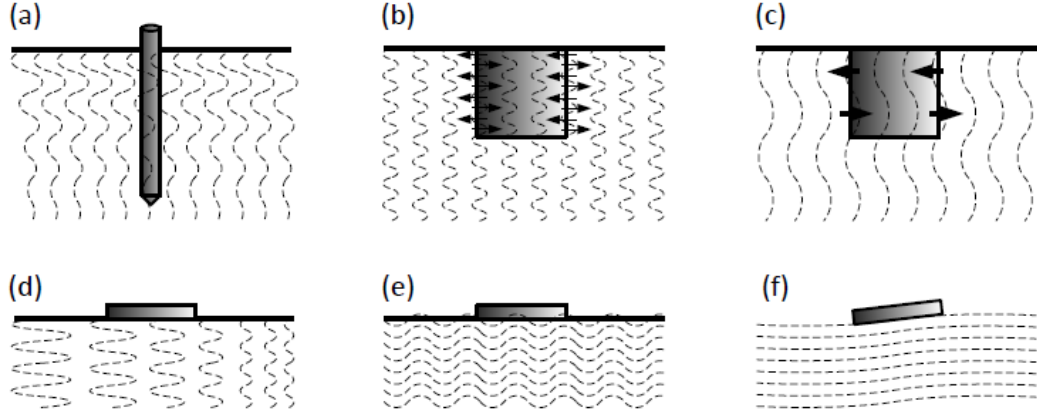
temel ayırımından bahsedilebilir. *Birincisi*, serbest alan (free field) hareketi zeminden dolayı değişmiş olacak (Şekil 3-1c). C noktasının üzerinde herhangi bir zemin tabakası olmasaydı A noktasındaki hareketle neredeyse birebir aynı davranışı sergileyecektir. Zemin tabakasının olması aynı zamanda C noktasındaki hareketi de azaltıyor. C noktasından düşey olarak zemin tabakasından yukarıya doğru yayılan dalga D ve E noktalarında farklılık gösterecektir. Bu D ve E noktaları en nihayetinde yapı-zemin etkileşiminin olduğu noktalar ve hareketin amplifiye olması (yatay deplasmanların artması) bu noktaları etkilediği gibi etkileşimi de doğrudan etkileyecektir. Bu davranışın anlaşılabilmesi için Saha Tepki Analizi gerçekleştirmek gereklidir. *İkinci olarak*, kazı yapılıp yerine temel sisteminin inşası sonucunda yine deprem hareketi modifiye edilmiş olacaktır (Şekil 3-1d). Rijit taban, ortalama yatay hareket ve ek dönmelere maruz kalacaktır. Bu rijit cisim hareketi, kayaya oturan temelin tam tersine bir davranış göstererek, yapı yüksekliği boyunca değişecek olan ivmeye (eylemsizlik yüklerine yol açan) yol açar. Bunun temel sebebinin ise zemin ile kütesiz-sonsuz rijit temelin rijitlik karşıtlığından kaynaklandığı söylenebilir ve buna analizin *kinematik etkileşim* kısmı denilebilir. *Üçüncü olarak*, yapıya uygulanan bu eylemsizlik yükleri, O noktasında döndürme momenti ve kesme kuvvetlerine yol açacak ve böylelikle o noktadaki girdi hareketini değiştirecektir (Şekil 3-1e). Binanın hareketinin etrafındaki zemini etkilemesinden dolayı oluşan etkileşim de *eylemsizlik etkileşimi* olarak adlandırılmıştır.

3.2.1. Kinematik Etkileşim

Kinematik etkileşimin temel olarak yapı ile zemin arasındaki rijitlik farkından dolayı ortaya çıktığı söylenebilir. Serbest bir alanda zemin partikülleri, dalga yayılımından kaynaklanan hareketin formunu takip edecektir. Yüzeyde ya da gömülü çok rijit bir temel olduğunu varsayıp bunun serbest-alan deplasman hareketini takip edemediğini düşünelim. Bu rijitlik farklılığından kaynaklanan fenomene *kinematik etkileşim* denir.

Bu etkileşimin baskın olduğu durumlar Şekil 3-2’de verilmiştir. Şekildeki bütün temeller kütesizdir ve kesikli çizgiler serbest-alan yer hareketini imlemektedir. Şekil 3-2a’da zemin tabakası boyunca düşey olarak hareket eden ve yukarı çıktıkça genliği artmakta olan kesme dalgalarına maruz kalmış bir kazığı göstermektedir. Bir taraftan

kazığın esneklik rijitliği serbest alan hareketini takip etmekte direnç gösterip, etrafındaki zemin deplasmanlarını değiştirirken (serbest alan deplasmanlarına göreceli olarak) diğer yandan kazık etrafındaki zemin, kazıkta eğilme momentleri oluşturmakta ve stabilitesine bozmaya yönelik kuvvetler açığa çıkarmaktadır.



Şekil 3-2 Derin ve Yüzeysel temeller için kinematik etkileşim tipleri (Lu, 2016)

Şekil 3-2 b ve c ise frekans içeriğine bağlı olarak gömülü temellerin davranışını karşılaştırmaktadır. Temel, yatay olarak değişken yüksek frekanslı bir harekete maruz kaldığında (b), üzerine uygulanan kuvvetler dalga girişiminden dolayı birbirini iptal eder ve dalga hareketinden neredeyse etkilenmez. Fakat tam tersine temel, düşük frekanslı tamamen yatay bir harekete maruz kaldığında, dönme ve yatay harekete maruz kalır ve salınım içeriği olan temel girdi hareketini oluşturur.

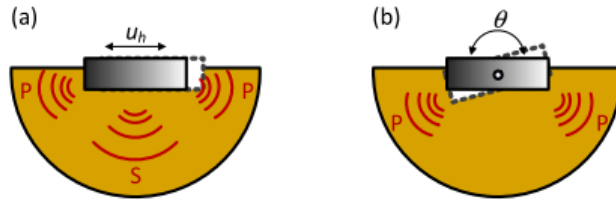
Kinematik etkileşim gömülü temellerde ve de özellikle derin temellerde daha yaygın olsa da bazı yüzeye yakın bulunan temellerde de önem arz edebilir. Örnek olarak (d) şeklinde görüldüğü üzere düzlem içine doğru olan rijitliğinden dolayı temel yer hareketini takip etmesine izin vermeyebilir ya da (b) ve (c)'deki örneklerde olduğu gibi dalga frekansının yüksekliğine bağlı olarak yüzeyde bulunan temellerin etkilenimleri(e)(f) farklı olabilir.

3.2.2. Eylemsizlik Etkileşimi

Eylemsizlik etkileşiminde üstyapı, temel girdi hareketiyle aktive olur ve yapı içerisinde eylemsizlik kuvvetleri ortaya çıkar. Bu etkileşimden 2 önemli özellik ortaya çıkar. İlk olarak, temelin tabanında oluşan eylemsizliğe-bağlı kesme kuvveti ve devrilme momenti, serbest alan hareketi nedeniyle zeminin deformasyonuna yol açar.

Deformasyonun büyüklüğü; titreşimin genliği ve zeminin bu titreşime (frekans içeriği) uyumluluğuna bağlıdır. Temelin altında deforme olabilen zeminin bulunması tüm YZE sistemini daha esnek hale getirir ve böylece yer hareketinin daha uzun periyotlarına daha yatkın hale gelir.

İkinci olarak; titreşen temel, zeminden sonsuza doğru ilerleyen dalgaları yayan sonlu bir titreşim kaynağı olarak davranır. Gömülü yüzeysel bir temel için, Şekil 3-3 (a) 'da gösterilen yatay salınım tepkisi (u_h olarak gösterilen salınım yer değiştirmesi) P-dalgaları (P ile gösterilen genişleyen dalgalar) ve S-dalgalarını, (kesme dalgaları S ile gösterildi) sırasıyla basınç/çekme (düşey arayüzeylerde) ve zeminle temel arasındaki sürtünme (yatay arayüzeyde) yoluyla üretir. Dönme salınımı modunda (Şekil 3-3 (b)'de ' θ ' ile gösterilen dönme açısı), P dalgaları temel tabanından zemine aktarılan basınç gerilmelerinden dolayı oluşur.



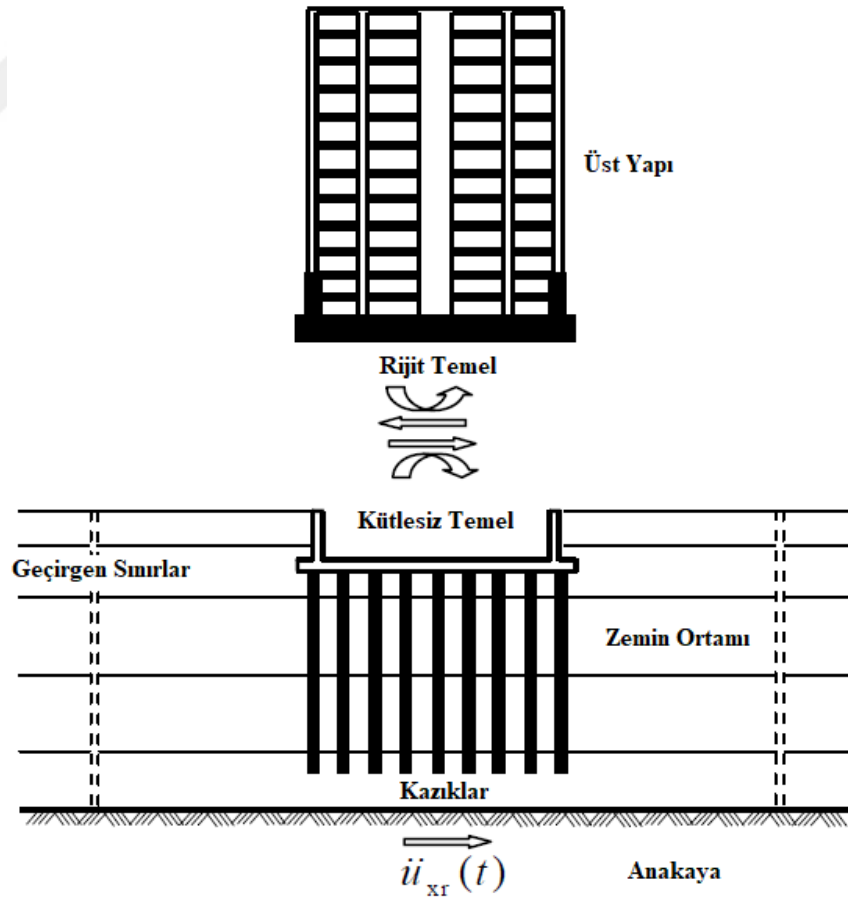
Şekil 3-3 Eylemsizlik etkileşimi içerisindeki titreşen temel için (a) yatay salınım modu ve (b) dönme salınımı modu ile etrafındaki zemine boşalttığı dalga enerjisi (Lu, 2016)

Eylemsizlik etkileşiminde 2 ana enerji dalgası yayılımı olmaktadır. Birincil enerji kaybı, dalga yayılımının bir nokta kaynağından genişlemesinin meydana getirdiği dalga yayılımı sırasındaki geometrik zayıflamadır. Bu mekanizma genellikle "radyasyon sönümlenme" (*radiation damping*) olarak adlandırılır, çünkü temel titreşimi zemin ortamının içine doğru dağılır. Diğer mekanizma ise doğrusal olmayan zemin davranışına karşılık gelir ve 'histeretik sönüm' olarak adlandırılır. Zemin dinamiğinde deformasyon arttıkça zeminin sönüm özelliği artmaktadır ve bununla birlikte sistemin hareketi için gerekli enerji miktarı artmaktadır. (Seed ve Idriss, 1970)

Her ne kadar sistem tamamen modellenip çıktılar doğrudan elde edilebilse de her adımda yapılan varsayımlar, birçok parametrenin analizde etkisinin olması ve sistemi değerlendirme hususunda disiplinler arası bilgi ve tecrübe ihtiyacından dolayı genellikle mühendisler *Altsistem* yöntemini tercih etmektedir.

3.3.2. Altsistem Yöntemi

Altsistem Yönteminde kazıklarla birlikte zemin ortamı ve üstyapı ayrı ayrı birer altsistem olarak modellenir. Üstyapı altsistemi ile kazık–zemin altsisteminin arakesitindeki bina temeli ile ve eğer varsa bodrum katların dış perdeleri (bodrum kutusu) üç boyutlu sonsuz rijit bir eleman olarak idealleştirilmiştir. Günümüzde radye temel sisteminin yaygın olarak kullanılması, bodrum döşemelerinin de dış bodrum perdeleri için birer rijitlik artırıcı eleman gibi çalışmalarını nedeni ile, sonsuz rijit bodrum kutusu idealleştirmesi kabul edilebilir bir yaklaşıklık olarak değerlendirilebilir. (Şekil 3-5)



Şekil 3-5 Altsistem Yöntemiyle YKZE'nin incelenmesi (Aydınöğlu, 2011)

Altsistem Yönteminde ise varsa zemin iyileştirmeleri gözönüne alınarak buna göre doğrusal olmayan zemin özellikleri hesaplanmalı, temel geometrisi ve sınır koşulları (sonsuz rijit yüzeysel veya gömülü temel sınır koşulu) oluşturulmalı varsa kazıkların da doğrusal olmayan dinamik özellikler girilmelidir. Altsistem yönteminde temel kütlesi gözönüne alınmaz ve modelin sınır koşullarında geçirgen sınırlar kullanılmalıdır.



4. YÖNETMELİKLERDE YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Yapı – Zemin etkileşimi ilk olarak NEHRP’in öncülü olan ATC’nin (ATC, 1978) ‘*Tentative provisions for the development of the seismic regulations for buildings*’ başlıklı raporunda sunulmuştur. Bu raporda basitçe sabit temele görece olarak SSI dikkate alındığında azaltılmış taban kesme kuvveti önerilmiştir. Fakat bazı durumlarda da halâ görüldüğü üzere YZE’nin tam ters etkisi de olabileceği için, direkt olarak belirlenen bir azaltma katsayısının yönetmeliklerde bulunmaması ve gerekli çalışmaların yapılması gerekli olduğu görülmüştür.

4.1. EUROCODE

Doğrudan bir tasarım yöntemi bulunmasa da YZE’nin dikkate alınması gereken durumlar Ek-D’de belirtilmiştir:

- P- δ ’nın etkisinin önem arzettiği yapılar;
- Köprü ayakları, açıkdenizdeki uygulanan temeller, silolar gibi derinlere oturmuş temellerde ve/veya masif yapılarda;
- Kule ve baca gibi ince uzun yapılarda;
- Kayma dalgası hızı 100 m/s’den daha düşük olan çok yumuşak zeminler üzerine inşası planlanan yapılarda YZE çalışması yapılmalıdır

YKZE hesabında kullanabilmek için Ek C’de kazık başlığı rijitlik hesabı verilmiştir. Statik kazık rijitliği(*stiffness*); birim deplasman/dönme oluşması için gerekli aynı yönde uygulanan kuvvet/moment olarak tanımlanmıştır. Bunun için, Kazık ve Zemin elastisite modülü, kazık çapı ve boyu parametreleri yeterli görülmüştür.

Kazıkların dizaynında kinematik ve eylemsizlik etkilerinin dikkate alınması gerektiği, Eurocode 8 (EN-1998-5: 2004) Bölüm 5.4.2’de belirtilmiştir. Kinematik etkinin dikkate alınması için aşağıdaki koşulların hep birlikte sağlanması şart koşulmuştur:

- $a_{gs} > 0.1g$,
- Zemin Sınıfı, Tip D'den daha kötü olacak ($V_{s,30} > 180$ m/s),
- Kazıkların içinde bulunduğu iki tabakanın (V_{s2}/V_{s1}) oranının çok yüksek olması (tabakalar arası rijitlik kontrastının çok yüksek olması)
- Bina Önem Sınıfı'nın III veya IV olması durumu.

Genel olarak Eurocode'da kinematik etkileşim, tabakalar arası rijitlik oranının yüksek olduğu durumlarda dikkate alınmakta, ve kazık başlığındaki eğilme durumunda daha az etkisi olduğu dolaylı olsa da belirtilmektedir.

4.2. NEHRP

National Earthquake Hazards Reduction Program tarafından hazırlanan hazırlanan *Soil-Structure Interaction for Building Structures* (2012) raporunda eylemsizlik ve kinematik etkileşim başlıkları altında temellerin kazıklı olması durumu ele alınmıştır.

Eylemsizlik etkileşiminin, $h/(V_s T) < 0.1$ olduğu durumlarda ihmal edilebilir olduğundan ve yumuşak zeminlerde inşa edilen yapılarda öneminin arttığından bahsedilmiştir (Stewart vd. 1999a; 1999b). Yumuşak Zemin üzerine inşa edilecek yapılarda genellikle kazıklı temeller tercih edildiği için eylemsizlik etkileşiminin gerekliliği vurgulanmış, bunu da statik rijitlik (k_j^p) ve sönüm (c_j^p) parametresi atayarak gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu parametrelerin hesabı, kazık ve zeminin Elastisite modülü (E_p , E_s), kazık çapı (d), Kazık boyu (L_p), Birim Hacim Ağırlık (ρ_p , ρ_s), poisson oranı(ν), kayma dalgası hızı (V_s), Zeminin doğal frekansı(ω) kullanılarak ve raporun içinde verilen tablolar yardımıyla yapılmıştır.

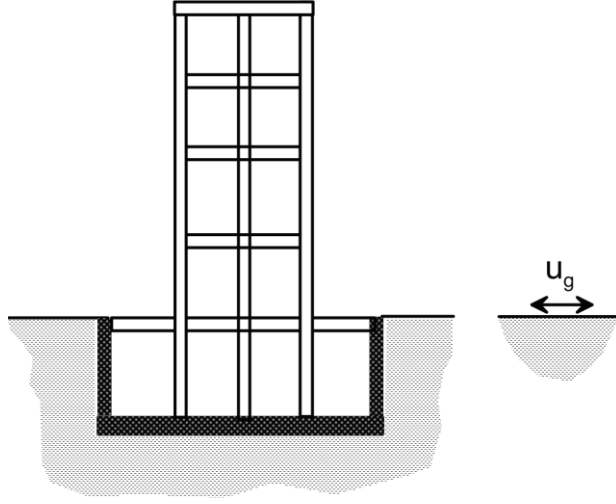
Grup kazıkların etkileşimi incelendiğinde ise Mylonakis ve Gazetas'ın (1999) çalışması baz alınarak grafikler vasıtasıyla, tekil kazık için hesaplanan statik rijitlik parametresi bir katsayıyla çarpılarak dikkate alınmıştır. Burada dikkat çeken durum; düşük frekans ($0 < a_0 < 0.6$) alanında, yanal yükleme durumunda, grup etkisinden kaynaklı statik rijitlik %50 azalırken, bu frekans alanı geçildiğinde ~2 katına

çıkılmaktadır. Bu grafiklerdeki pik ve vadi oluşumlarının ise negatif/pozitif dalga girişiminden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Ayrık Eleman Yöntemi olan, p - y (doğrusal olmayan yatay yay) ve t - z (doğrusal olmayan düşey yay) eğrilerinin yüksek deformasyon davranışını sergilemesi için geliştirildiğinden dolayı sismik durumdaki rijitlik ve sönüm durumunu yakalayamadıkları raporda belirtilmiştir. Buna bağlı olarak da rijitlik ve sönümün beraber yansıtıldığı, raporun içerisinde bulunan yöntemin kullanılması önerilmiş ve küçük deplasmanlarla zemin doğrusalsızlığını kapsayan yeni nesil eğrilerin geliştirilmesinin bir ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

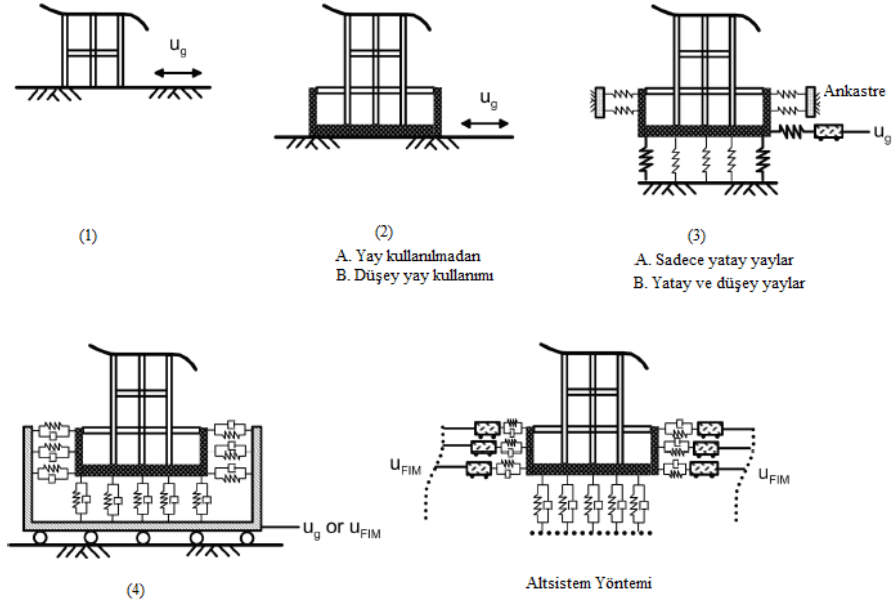
Kinematik etkileşim bölümünün ilk paragraflarında kazıklı temel durumu için kullanılabilir yöntemlerden bahsedileceği söylene de, kazıklı temel alt başlığında herhangi bir yöntem önerilmemiştir. Yapıda kinematik etkileşimin oluşmasından; taban plakası ortalaması, gömme etkisi ve kazıklı temeller sorumlu tutulmuştur. Taban plakası ortalaması (*base slab averaging*) yapının içerisindeki uzamsal olarak değişken yer hareketinin, temelin dayanım ve rijitliğinden dolayı temelin kontürünün olduğu yerdeki ortalamasının alınmasıdır. Gömme etkisi, derinlik arttıkça yer hareketinin etkisinin azalmasıyla kaynaklı temel girdi hareketinin değişimidir ve bu tür durumlar transfer fonksiyonları yardımıyla çözümlenmiştir. Kazıklı temellerdeki durum ise, gelen deprem dalgalarının ilk önce kazıklarla etkileşime girip, onların da kendi aralarında ve zeminle etkileşime gireceği (oturmalar, yanal etkiden dolayı oluşan boşluklar) varsayıp, herhangi iyi kalibre edilmiş bir mühendislik modelinin olmadığını belirtmişlerdir. Genel olarak taban plakası ortalaması ve gömülü temeller için transfer fonksiyonlarının uyumlu olduğunun fakat kazıklı temellerde hâlen geçerli analitik bir çözümün bulunmadığı ve önemli bir araştırma konusu olduğu belirtilmiştir.

Şekil 4-1’de etrafı düz zemin birimle çevrili, 1 bodrum katlı bir binanın çizimini göstermektedir.



Şekil 4-1 Zeminle çevrili bir bodrum katı ve etrafı düz bir eğime sahip gömülü bir bina

Böyle bir binayı analiz etmek için kullanılabilen çeşitli modelleme stratejileri Şekil 4-2'de gösterilmektedir.



Şekil 4-2 Gömülü temeller için modelleme yaklaşımları

Şekil 4-2'de gösterilen modelleme yaklaşımlarından, profesyonel mühendislerin arasında hangisinin en iyi yaklaşım ve en yaygın yaklaşım olduğu konusunda bir fikir birliği yoktur. Türkiye'de en çok kullanılan yaklaşım Model 2'dir. NEHRP tarafından yapılan açıklamalar aşağıda paylaşıldığı biçimdedir:

Model 1: Bu yaklaşımda, binanın zemin seviyesinde sabitlendiği varsayılır ve herhangi bir YZE etkisi dikkate alınmaz. Reaksiyonlar, modelin en alt seviyesinde hesaplanır ve ardından temele ayrı bir modelde uygulanır. Bazıları, bu modelin moment çerçevesi ve çapraz çerçeveli binalar için daha uygun, perde duvarlı binalar için daha az uygun olduğuna inandığını belirtmiştir. "Geri-kalma etkileri"nin (*back-stay*) olmadığı durumlarda da kullanılabilir bir modeldir. Geri-kalma etkileri, üst yapının yanal sisteminin temelini tüm kapladığı alanla aynı hizaya gelmediğinde ortaya çıkar. Böyle bir konfigürasyonun bir örneği, çevre duvarları olan daha geniş bir bodrum podyum yapısı üzerine kurulmuş bir beton perde duvar çekirdek sistemine sahip bir üst yapıdır (kule). Geri-kalma etkileri, üst yapıdaki yanal kuvvetlerin tipik olarak bir veya daha fazla katlardaki perde duvar yoluyla bodrumda bulunan ek elemanlara aktarılmasını içerir. Bu kuvvet aktarımı, yüksek binaların devrilme etkilerine direnmesine yardımcı olur ve konsol kirişinin arka açıklığına benzerliği nedeniyle arka dayanma etkisi olarak adlandırılır. İksa sistemlerinin ilave rijitliği ve tabanı oluşturan duvarların ve diyaframların görece rijitliği, bodrum seviyelerinde üst yapıdakinden daha büyük kesme kuvvetlerine yol açabilir. Bodrum perdelerinin düzlem içi esnekliğinin modellenmesi, bu etki için daha anlamlı sonuçlar sağlayabilir. Üst yapının yanal kuvvete direnç sistemi, bodrumun tüm ayak izini kapladığında, geri-kalma etkisi azaltılır veya ortadan kaldırılır.

Model 2: Bu yaklaşımda, iksa sisteminin etrafındaki zemin göz ardı edilir, ancak bodrum yapısı modele dahil edilmiştir. En düşük bodrum katı seviyesi, modelin temeli olarak alınmıştır. Herhangi bir önemi olan (dikkate alınması gereken) pasif basıncı geliştirmek için gereken hareket miktarının, bodrum istinat duvarlarında beklenen hareket miktarını çok aştığı, böylece perde etrafındaki zeminin ihtiyatlı bir şekilde göz ardı edilebileceği iddia edilmektedir. Bu modelin bir varyasyonu (Model 2A) sabit bir tabana sahiptir. Bu modelin ikinci bir varyasyonu (Model 2B) temel altında dikey yaylara sahiptir. Model 2A, bazıları tarafından projelerinin ön tasarım aşamalarıyla sınırlı olmakla birlikte, ara sıra kullanılmaktadır. Model 2B daha sık kullanılır (Türkiye), ancak bazıları tasarım için yapılan analizleri sınırlamak için hem Model 1 hem de Model 2B kullanır.

Model 3: Bu yaklaşımda, çevreleyen zeminin etkisini dikkate alabilmek için yatay yaylar kullanılır. Yayların uçları ötelemeye karşı sabitlenmiştir ve modelin tabanına yer hareketi girilir. Bu modelleme yaklaşımı artımlı itme (*pushover*) analizlerinde kullanılmaktadır. Bu modelin (Model 3A) bir çeşidi temel altını dikey yönde sabitlemektir. Diğer bir çeşidi (Model 3B) dikey yaylar içerir. Model 3A bazıları tarafından kullanılırken, Model 3B daha sık kullanılmaktadır. Bazı mühendisler asla bu modelleme yaklaşımının iki versiyonunu da kullanmazlar.

Model 4: Bu yaklaşımda, yatay yaylar rijit duvarlara tutturulur ("küvet" olarak adlandırılır) ve yer hareketi küvete uygulanır, böylece yatay yayların uçları giriş hareketi ile birlikte hareket eder. Bu modelleme yaklaşımı, "*Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings*" (PEER, 2010)'te önerilmesine rağmen nadiren kullanılmaktadır.

Altsistem Yöntemi: Bu modelleme yaklaşımı, Temel Model (veya TM) olarak adlandırılır. Zeminin sönümlenmesini ele almak için sönümleyici noktalarının (*dashpot*) kullanıldığı, temel dönmelerinin dikkate alındığı ve deprem hareketinin kazı derinliği boyunca bodrum perdelerine aktarıldığı bir modelleme yaklaşımını temsil eder. Bu model şu anda pratikte kullanılmamaktadır.

Bu tez kapsamında Altsistem Yöntemi de kullanılarak; pratikte kullanımının yaygınlaşabilmesi, etkilerinin ne olduğunun anlaşılabilmesi açısından çalışmalar aşağıdaki bölümlerde paylaşılacaktır.

4.3. AASHTO

American Association of State Highway Officials (AASHTO) tarafından hazırlanan *LRFD Bridge Design Specifications* (2014, 7. Edisyon) yönetmeliğinde kazıkların tasarımı için American Petrol Enstitüsü'nün (*API*) açıkdenizdeki petrol platformları için geçerli olan yöntemi, doğrusalsız davranışı daha iyi yansıttığı için önermiştir. Bu yöntem, başlangıç yatak katsayısı ve saha yükleme testleri sonucunda elde edilen deney sonuçlarına dayanarak, kumlar ve killer için oluşturulan *p-y* eğrilerini oluşturmaktadır.

“Köprü yapılarındaki” kazık momentlerinin hesaplanmasında kullanılan kazık rijitlik karakterleri; momentlerin sadece köprünün eylemsizlik etkileşiminden doğan yanal yüklerin etkisiyle oluştuğunu varsayan bir sahte-statik (*pseudo-static*) yaklaşıma sahiptir. Fakat bu eylemsizlik etkileşiminin, serbest-alan (*free field*) deprem hareketinin kazıklarla olan etkileşiminin köprüyü etkilemesinden kaynaklandığını ve ayrıca bu serbest-alan hareketinin de kazıkların moment değeri üzerinde etkisi olabileceğinin unutulmaması gerektiği belirtilmektedir. Bu varsayımlara da bağlı olarak tek-boyutlu davranış analizi sonucunda elde edilen serbest-alan deplasmanları kazıklara etki ettirilerek eğilme momentlerinin hesaplanacağı belirtilmektedir.

ASCE 7/10 ve *FEMA 440* yönetmelikleri YKZE ile ilgili herhangi bir çözüm yöntemi sunmamışlardır.

4.4. TBDY 2018

Yönetmelikler içerisinde YKZE'nin sınırlarını en net şekilde TBDY 2018 çizmiştir. EK 16C'de Kinematik ve Eylemsizlik etkileşiminin dikkate alınması için önerilen hesap aşamaları ve bunların *Yerel Zemin Sınıfı*, *Deprem Tasarım Sınıfı* ve *Bina Yükseklik Sınıfı*'na bağlı olarak hesap yöntemleri belirlenmiştir.

Yöntem I: Yerel Zemin Sınıfı'nın ZE, ZD, ZF; Deprem Tasarım Sınıfı'nın 1, 1a, 2, 2a, ve Bina Yükseklik Sınıfı = 1 olan binalarda uygulanacağı belirtilmiş, modellemenin “uygun” bir şekilde yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Genel hatlarıyla *altsistem* yöntemi için ayırdedici özellikler şunlardır:

- Zemin ortamı, 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar/Farklar yöntemiyle analiz yapan bir yazılımla doğrusal olmayan bir malzeme modeli tercih edilerek oluşturulacaktır. Bu malzeme modelinin tercihinde dikkat edilmesi gereken şey; deformasyona bağlı olarak kayma modülü azalımını içeren bir model olmasıdır. Sıvılaşıma potansiyeli olan zeminlerde *efektif gerilme analizi* yapılabilmesine olanak sağlayan *doğrusal olmayan zemin malzeme modellerinin* kullanılmasının gerekliliği belirtilmiştir.

- Kazıklar çubuk eleman olarak modellenecek, arayüz (*interface*) elemanlar kullanılacak ve deprem hesabından önce, düşey yüklerden dolayı kazıklarda oluşan aksel kuvvetler doğrusal olmayan statik hesap ile belirlenecektir.
- Bina temeli, bodrum kat çevre predeleri ile birlikte (zemin kat seviyesine kadar), kütesiz, sonsuz rijit bir eleman olarak modellenecektir.
- Deprem kayıtlar en az 11 (iki bileşenli) çift olmak üzere yine yönetmelikte belirtilen kriterlere göre seçilip, uyuşumları yapıp mühendislik kayasından etki ettirilecektir. Mühendislik kayası yoksa min 3B derinliğe kadar inilip ters evrişim (deconvolution) yapılarak etki ettirilecektir.
- Zaman tanım alanında yapılan bu kinematik etkileşim analizleri (en az 11) sonucunda kazıklardaki iç kuvvet ve deformasyonlar, her birinden elde edilen en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanacaktır.
- Yapılan analizler sonucunda yönetmelikte net olarak belirtilmese de temelin alt orta noktasından yapılacak çift yönlü birim yüklemelerinin çıktılarının tersi alınarak oluşturulacak rijitlik matrisi ile yine temel alt noktasında çıktı olarak oluşan ivme-zaman değerleri ve bu değerlerle hesaplanan temel seviyesi deprem spektrumunu *eylemsizlik etkileşimi* hesabında kullanılacaktır.
- Kinematik etkileşim analizlerinde elde edilen çıktılar, zemin-kazık altsisteminin eşdeğer rijitliği kullanılarak etkileşim analizi yapılacak yapısal modele bina temeli seviyesinde kullanılmalıdır. Daha sonra kinematik etkileşimden elde edilen *temel hareketi veya deprem tasarım spektrumunu* kullanılarak, bina temelinin ve bodrum kütlelerinin de dikkate alındığı analizler yapılmalıdır. Bu analizlerin sonucunda oluşan temel seviyesinde eklenen yaylardaki elastik yay kuvvetleri; kinematik etkileşim analizi aşamasında birim yatay/dönme kuvvetlerinin uygulanması sonucunda kazıklarda oluşan iç kuvvetlerle çarpılarak, *eylemsizlik etkileşimi* sonucunda oluşan kazık iç kuvvetleri elde edilmiş olacaktır.

- Kinematik ve eylemsizlik etkileşim analizleriyle hesaplanan iç kuvvetler, mutlak değerlerinin toplamı olarak değerlendirilmeye/tasarıma esas hesapta dikkate alınacaktır.

Yöntem I'in yukarıda bahsedilen aşamaları altsistem yöntemi kullanıldığında oluşmaktadır. Ortak yöntemle (Yapı-Zemin-Kazık sisteminin birlikte modellenmesi) bütün sistem çözüldüğünde yukardaki aşamalara gerek kalmamakta ve kazıklarda oluşan iç kuvvetler direkt olarak değerlendirilmeye/tasarıma esas hesapta dikkate alınabilecektir.

Yöntem II: ise zemin ortamının etkisi (kinematik etkileşim) dolaylı olarak, sahaya özel zemin davranış analizleri sonucunda elde edilen zaman-toplam yerdeğiştirme değerlerinin, kazık düğüm noktalarına etki edilmesi sonucu zaman-tanım alanında yapılan analizlerle yansıtılacaktır. Kazıklar $p-y$, $t-z$, $Q-Z$ yayları ile modellenecek olup, grup etkisi yönetmelikte bahsedilen ampirik bağıntı vasıtasıyla dikkate alınacaktır. Yöntem I'de olduğu bina temeli kütsüz ve sonsuz rijit bir eleman olarak modellenecek olup bina perdeleri ile zemin arasındaki yatay kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisini temsil etmek üzere $p-y$ benzeri doğrusalsız sadece basınca çalışan yaylar kullanılacaktır. Çift yönlü ve eşzamanlı olarak uygulanacak toplam yerdeğiştirme verileri sonucu yapılan deprem analizlerinin çıktıları Yöntem I'in çıktılarıyla aynıdır.

Yöntem II'nin eylemsizlik etkileşimi hesabının Yöntem I'den farkı, Yöntem I'de temel altına atanan yaylar yerine $p-y$, $t-z$ ve $Q-Z$ yaylarının atanmasıdır.

Yöntem II de aynı şekilde direkt yöntemle bütün sistem, Yöntem II'nin eylemsizlik etkileşimindeki hesabına benzer bir şekilde, sahaya özel zemin davranış analizlerinden elde edilen zaman tanım alanındaki toplam yerdeğiştirme çıktılarının kazık düğüm noktalarına etkilmesiyle çözülebilir.

Yöntem III: Temel-kazık-zemin kinematik etkileşim hesabı Yöntem II'nin basitleştirilmiş halidir. Artık kazık düğüm noktalarına uygulanacak kuvvet zamana bağlı toplam yerdeğiştirmeler değil de sahaya özel zemin davranışı analizi sonucunda çıkan toplam yerdeğiştirmelerin en büyük değerleri alınarak oluşturulan toplam yerdeğiştirme zarfı uygulanacaktır. Bu da *statik artımsal yerdeğiştirme yüklemesi* yapılarak uygulanacaktır.

Kinematik etkileşim hesabı sonucunda yapılan analizlerin her birinden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanacak ve bu değerler eğilme momentleri $R=2.5$ katsayısına bölünerek kullanılacaktır. Kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetler için herhangi bir azaltma yapılmayacağı belirtilmiştir.

Yöntem III'te, I ve II'de olduğu gibi temel altında oluşan etkin temel hareketleri'ne ilişkin yerdeğiştirme ve spektrumların hesaplanmasının söz konusu olmadığı söylenmiştir fakat halihazırda sahaya özel zemin davranışları için yapılan analizlerin temel tabanında elde edilen spektrumlarının ortalamasının tasarım spektrumu olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu spektrumun ordinatları, diğer bütün yöntemlerde olduğu gibi, tasarım spektrumunun ordinatlarından daha düşük olmayacaktır.

Yöntem III'ün eylemsizlik etkileşim hesabı, yönetmelikte ortak sistem modeli ile yapılabileceği yönündedir. Bir önceki paragrafta anlatıldığı şekilde elde edilen deprem spektrumu, kazıklar-temel-bina birlikte çözümlenip sonuçları belirli katsayılarla düzenlenip kinematik etkileşim çıktılarının birleştirilmesiyle hesaplanmaktadır.

5. SONLU ELEMANLAR/FARKLAR YÖNTEMLERİYLE ZEMİN ORTAMININ SAYISAL MODELİ

Fiziksel dünyada olagelen şeylerin matematiksel modellemelerinin yapılabilmesiyle birlikte çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir (Analitik, Sayısal, İstatistiksel, Deneysel). Analitik modellerle oluşturulan formüller kesin sonuçları verse de çok fazla değişkenin olduğu ve Analitik modellemenin parametrik değişiklik sonucu güncellenmesinin mümkün olmadığı durumlarda diğer modelleme yöntemleri tercih edilmektedir. Sonlu Farklar (FDM) sayısal olarak sıradan ve kısmi diferansiyel denklemlerin çözülmesine izin veren tekniktir ve her zaman adımında düğümsel yüklerin değiştirdiği hızların hesabında kullanılır. Her bir hesap adımında değişen hızları kullanarak ve Sonlu Hacim Yöntemiyle (FVM) birlikte şekil değiştirme hızları (*strain rate*) hesaplanacaktır. FDM tekniği, fonksiyonun kısmi türevlerinin koordinat yönlerinde belirli bir aralıkta tanımlanan sonlu farklarla değiştirilmesinden oluşur. Bu, modellenen alanın düğüm noktalarının aralarında sonlu farklılıkların tanımlandığı düğümler ızgarasına bölünmesi anlamına gelir (yani bütün sistem aslında sadece düğüm noktalarından oluşmaktadır). Önceden tanımlanmış düğümlerle ilgili bilinmeyenleri olan bir cebirsel denklem sistemi oluşturulmuştur. Daha sonra her denklem, kendi ve çevresindeki düğümlerdeki fonksiyon değerlerinin bir kombinasyonu olarak ifade edilir ve malzeme modeline bağlı olan şekil değiştirme hızlarıyla gerilmeler hesaplanır. Daha sonraki aşama iç gerilmeler ve dış yüklerden kaynaklı düğüm noktalarındaki kuvvetlerin hesaplanması olacaktır. Düğüm noktalarındaki kuvvetler hesaplandıktan sonra Sonlu Farklar yöntemi kullanılarak düğüm noktalarının hızları hesaplanır. Döngünün son aşamasında, hesaplanan hızlarla Sonlu Hacim Yöntemi kullanılarak bir sonraki döngünün başlangıcında kullanılacak şekil değiştirme hızları hesaplanır.

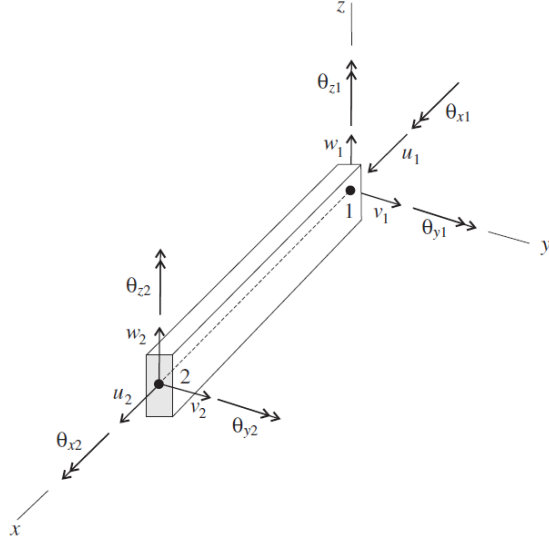
Bu tekniğin temel avantajları, malzeme deformasyonuna ve yenilmesine izin vermesi, karmaşık davranış ve mekanizmayı modelleme kapasitesi, yer altı suyu ve

boşluk suyu basıncının model etkisine yansıtılma özelliği ve buna dinamik analizi de dahil etme yeteneğidir.

Zemin-Kazık-Yapı dinamik etkileşimini çözmek için doğrudan yöntem de dahil olmak üzere, FDM tarafından çeşitli zemin mekaniği problemlerini çözmek için en iyi bilinen bilgisayar programlarından biri Flac3D'dir (*Fast Lagrangian Analysis Continua*). Bu çalışmada bu bilgisayar programının kullanılması nedeniyle, sismik yükleme altındaki zemin-temel-yapı sistemlerinin Flac3D modellemesiyle ilgili temel özellikler alt bölümlerde sunulmuştur.

5.1. Kiriş Sonlu Eleman

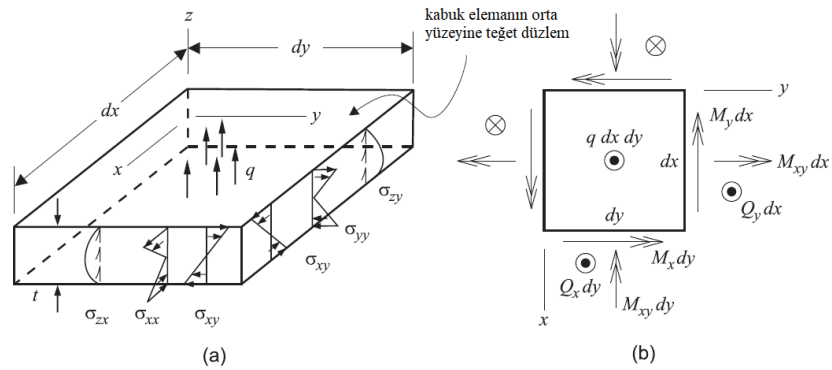
Flac3D içinde kullanılan Kiriş Sonlu Elemanı (*Beam Finite Element*) 2 düğüm noktalı, düz, her düğüm noktasına 6 serbestlik derecesi olacak şekildedir. Bu serbestlik derecelerinden 3 tanesi ötelenme bileşeni, 3 tanesi de dönme bileşenidir. (Şekil 5-1) Kiriş sonlu eleman rijitlik matrisi formülasyonu, McGuire ve Gallagher (1979) tarafından açık (explicit) formda verilmiştir. Eleman, her iki ana kesit eksenini etrafında (bisimetrik) düz, prizmatik ve simetrik olan ve izotropik malzemeden oluşan bir kirişin yapısal davranışını modeller. Formülasyon, uniform aksenal deformasyon, eğilme deformasyonu ve bükülme deformasyonundan kaynaklanan yer değiştirmeleri dikkate alır. Enine kesme deformasyonlarından kaynaklanan yer değiştirmeleri ve burulma kuvvetlerinin neden olabileceği bir kesitin düzlem dışı (uzunlamasına) bükülmesinden kaynaklanan yer değiştirmeleri ihmal eder. McGuire ve Gallagher'a göre, ortaya çıkan sertlik matrisinin somutlaştırdığı denklemler, yapısal mühendislik uygulamasında karşılaşılan çerçevelerin büyük çoğunluğunun analizi için yeterlidir.



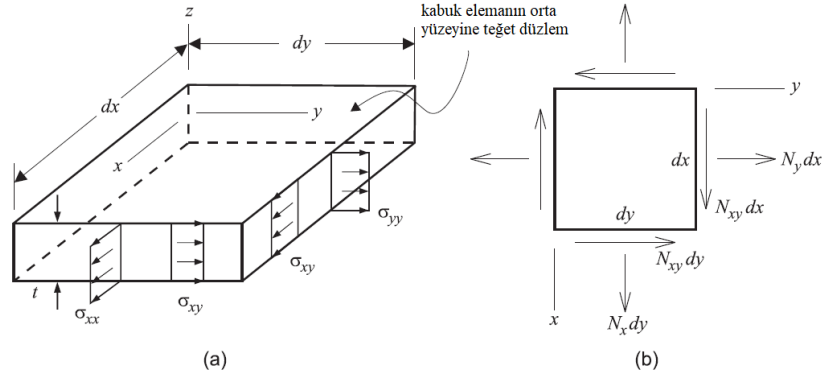
Şekil 5-1 Kiriş elemanları koordinat sistemi ve sonlu elemanın 12 serbestlik dereceleri (Itasca, 2012)

5.2. Kabuk Sonlu Eleman

Flac 3D temel ve duvar modellerinde kullanılan kabuk elemanlar için beş adet 3 düğümlü üçgen sonlu eleman mevcuttur: 2 düzlem gerilme elemanı (membran), 1 levha-eğilme (*plate-bending*) elemanı ve 2 kabuk (*Shell*) elemanı. Düzlem-gerilme elemanları yalnızca membran etkisini modeller, plaka eğilme elemanı yalnızca eğilme hareketini modeller ve kabuk elemanları, membran ve eğilme hareketlerinin süperpozisyonu olarak genel kabuk davranışını modeller (Şekil 5-2 ve Şekil 5-3). Bu elemanlar, kabuk tipi SEL'ler için mevcut olan 18 serbestlik derecesinde çalışır (Şekil 5-4).

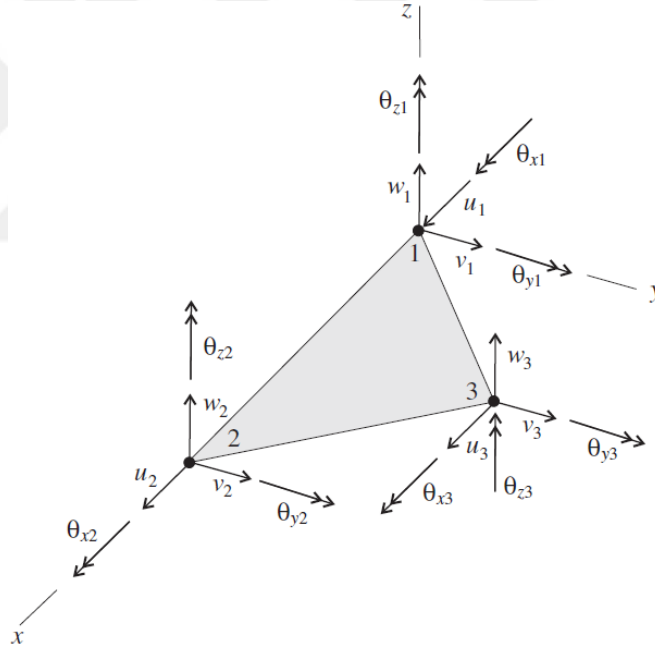


Şekil 5-2 Kabuktaki eğilme durumunu gösteren şekil: (a) plaka eğilme yüklemesine maruz kalan homojen, doğrusal elastik bir plakanın diferansiyel elemanı üzerinde oluşan gerilmeler (b) bu gerilmeler sonucu oluşan bileşke kuvvetler (Itasca, 2012)



Şekil 5-3 Bir kabuktaki membran hareketi: (a) düzlem-gerilme yüklemesine maruz kalan homojen, doğrusal elastik bir plakanın diferansiyel elemanı üzerinde oluşan gerilmeler (b) bu gerilmeler sonucu oluşan bileşke kuvvetler (Itasca, 2012)

Bu kabuk elemanlar ızgara noktalarına rijit olarak bağlanmış olup, ızgaradaki herhangi bir değişiklik olduğunda doğrudan etkilenmektedir.

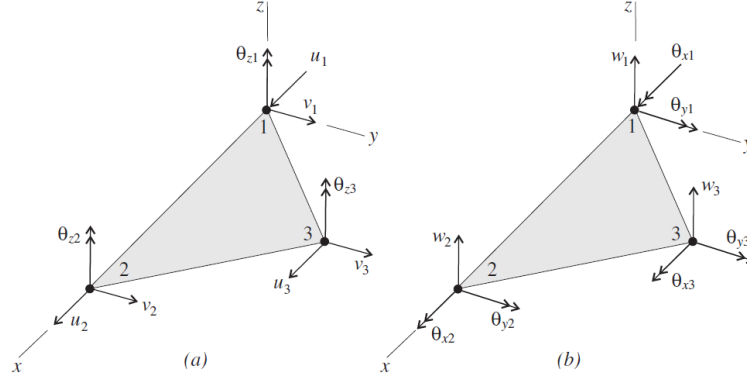


Şekil 5-4 Kabuk sonlu elemanlar için mevcut 18 serbestlik derecesi

5.2.1. DKT-CST Hibrit Kabuk Elemanı

DKT-CST hibrit kabuk elemanı, düğüm başına altı serbestlik derecesine sahip, üç düğüm noktalı, düz, ince kabuklu sonlu bir elemandır: üç öteleme bileşeni ve üç dönme bileşenine sahiptir. Kabuktaki eğilme davranışını modellemek için dokuz serbestlik dereceli CST hibrit düzlem elemanı ile kabuktaki membran hareketini modellemek

için kullanılan dokuz serbestlik dereceli DKT plaka elemanını birleştirir. Bu kompozit düz kabuk eleman DKT-CST hibrit olarak adlandırılmış ve Cook vd. tarafından tanımlanmıştır (1989). (Şekil 5-5)



Şekil 5-5 XY düzleminde DKT-CST hibrit kabuk sonlu elemanı: (a) Membran etkisiyle ilişkili serbestlik dereceleri (b) Eğilmeye ilişkili serbestlik dereceleri (Itasca, 2012)

5.2.2. DKT-CST Kabuk Elemanı

DKT-CST kabuk elemanı, düğüm başına beş serbestlik derecesine sahip üç düğüm noktalı, düz, ince kabuklu sonlu bir elemandır: üç öteleme bileşeni ve iki dönme bileşenine sahiptir. Kabuktaki eğilme davranışını modellemek için altı serbestlik dereceli bir CST düzlem elemanı ile kabuktaki membran hareketini modellemek için dokuz serbestlik dereceli DKT plaka elemanını birleştirir. Bu kompozit yassı kabuklu eleman, DKT-CST olarak adlandırılmış ve Cook vd. tarafından tanımlanmıştır (1989). DKT-CST Hibrit kabuk elemanından tek farkı ‘delme’ (drilling) serbestlik derecesinin rijitlik matrisinden çıkarılmış olmasıdır.

Delme serbestlik derecelerinin olmaması, bu elemanın DKT-CST hibrit elemandan Flac3D ızgarasına bağlanması hususunda daha uygun olmasını sağlar. FLAC3D ızgarası doğrusal bir yer değiştirme varyasyonuna sahiptir ve 3 delme serbestlik derecesi, DKT-CST hibritine kenarları boyunca ikinci dereceden düzlem içi yer değiştirme varyasyonu sağlar. Kabuk elemanlar, ızgaraya rijit bir şekilde bağlandığında, yalnızca öteleme serbestlik dereceleri ızgarayla hareket edecek şekilde bağlanırken, dönme serbestlik dereceleri serbest bırakılır. Delme serbestlik dereceleri sınırlanmadığı için, kabuk eleman ile ızgara arasında boşlukların oluşması mümkündür. Bu uyumsuzluklar, farklı boyutlardaki kabuk tipi elemanlar ortak bir çizgide buluştuğunda oluşmaktadır. DKT-CST elemanı, Flac3D bölgelerindeki ile

tamamen uyumlu olan, kenarları boyunca doğrusal bir düzlem içi yer değiştirme varyasyonuna sahiptir ve bu nedenle, bu elemanlar bölgelere sıkıca bağlandığında boşluklar oluşmaz.

Yukarıda bahsedilen gözlemlere dayanarak kabuk sonlu eleman tipi seçimi; Flac3D ızgarasına bir kabuk elemanının bağlanması problemleri için DKT-CST elemanının kullanılmasını gerektirdiği ve diğer tüm sorunlar için DKT-CST hibrit elemanını kullanılmasını gerektirdiği sonucuyla karşılanır. Bu bağlamda tez kapsamında yapılacak çalışmalarda Temel ve duvar modellemeleri için DKT-CST kabuk elemanları kullanılacak, döşemeler için ise DKT-CST hibrit eleman kullanılacaktır.

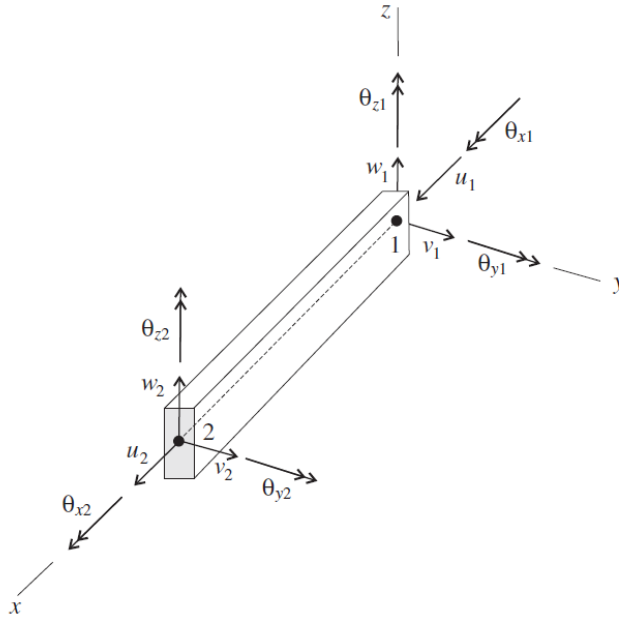
5.2.3. Liner Yapısal Eleman

Her bir linerSEL'in mekanik davranışının, *liner* malzemesinin kendisinin yapısal davranışına ve linerSEL'in FLAC3D ızgarası ile etkileşime girmesi şeklinde ayrımı yapılarak tanımlanabilir. Varsayılan olarak, linerSEL'lere hem membran hem de eğilme yüklemesine direnen ve yukarıdaki bölümlerde anlatılan DKT-CST kabuk elemanı atanır. Fiziksel bir liner, FLAC3D ızgarasının yüzeyine tutturulmuş linerSEL'lerin derlemesi olarak modellenebilir. Bir kabuğun yapısal davranışını sağlamaya ek olarak, liner ile FLAC3D ızgarası arasında kaymaya yönelik (liner yüzeyine teğet düzlemde) sürtünme etkileşimi meydana gelir. Aynı zamanda, normal yönde hem sıkıştırma hem de gerilme kuvvetleri taşınabilir ve astar ızgaradan kurtulabilir (ve ardından tekrar temas edebilir). Liner elemanlar, püskürtme beton kaplı tüneller veya istinat duvarları gibi ana ortam ile hem normal-yönelimli basınç/çekme etkileşiminin hem de kesme-yönelimli sürtünme etkileşiminin meydana geldiği ince astarları (liner) modellemek için kullanılır.

Bu tez kapsamında gömme derinliğinin YKZE üzerindeki etkisi araştırılması kapsamında, duvar ve temellerin deprem etkisindeki fiziksel davranışının -zeminle birlikte hareket etmesi- şeklinde olacağı kabul edilmiş ve bu yüzden liner elemanlar duvar ve temellerin modellemesinde tercih edilmemiştir.

5.3. Kazık Elemanlar

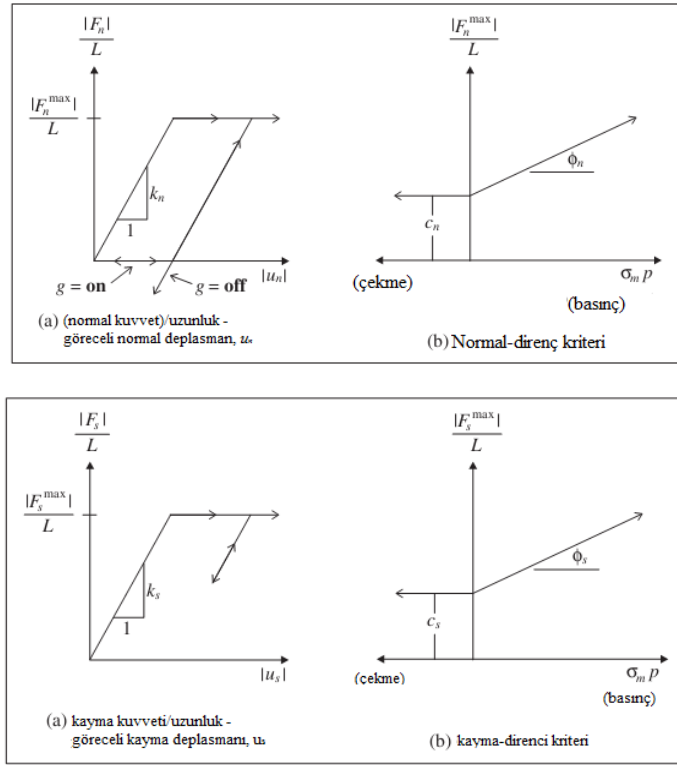
Bu çalışma kapsamında kazıklar, analizlerin daha hızlı ve dinamik analiz çalışmalarındaki zaman aralıklarının düşük olması dolayısıyla uzun sürmesinden ötürü yazılımın içinde bulunan pileSEL elemanları kullanılmıştır. Kazık elemanları ızgaradaki (*grid*) düğüm noktalarına direkt olarak bağlanmayıp, en yakın ızgara noktalarıyla (*gridpoint*) etkileşim içerisinde kalabilmektedir. 12 serbestlik derecesi (2 düğüm noktası için) bulunan kiriş eleman (*beam*) özelliklerine ek olarak (Şekil 5-6), kazık eksenine dik (K_n) ve paralel (K_t) yöndeki kazık ile zemin arasındaki sürtünme rijitlik ilişkisi dikkate alınır. Kazık ile zemin arayüzünün kesme davranışı doğada da koheziv ve sürtünmeye dayalıdır. Bu davranışın fonksiyonu ise malzemeler arasındaki rijitlik farkı, birim alan ve yüzeye dik yönde etki eden kuvvete bağlıdır.



Şekil 5-6 PileSEL koordinat sistemi ve her bir pileSEL tarafından kullanılan kiriş sonlu elemanın 12 aktif serbestlik derecesi (Itasca, 2012)

Şekil 5-7’de görüldüğü üzere normal kuvvet ve kesme kuvveti yayları için grafikler verilmiştir. Kazıklar, kesme ve normal bağlantı yayları vasıtasıyla ızgara ile etkileşime girer. Bağlantı yayları, kazık düğümlerindeki kuvvetleri ve hareketi kazık ve ızgara arasında aktaran (her bir kazık düğümünden çıkan bağlantı yoluyla) doğrusal olmayan, kaydırıcı-yay (*spring-slider*) birleştiricileridir. Bu yay parametreleri; rijitlik

(K_t , K_n), kohezyon (c_s , c_n), içsel sürtünme açısı (ϕ_s , ϕ_n), çevre uzunluğu (p), normal yöndeki kuvvet için boşluk (gap) ve efektif çevresel basınçtan (σ_m) oluşmaktadır.



Şekil 5-7 (a) Normal kuvvet yayları için eğrileri (b) Kayma kuvveti yayı için eğriler (Itasca, 2012)

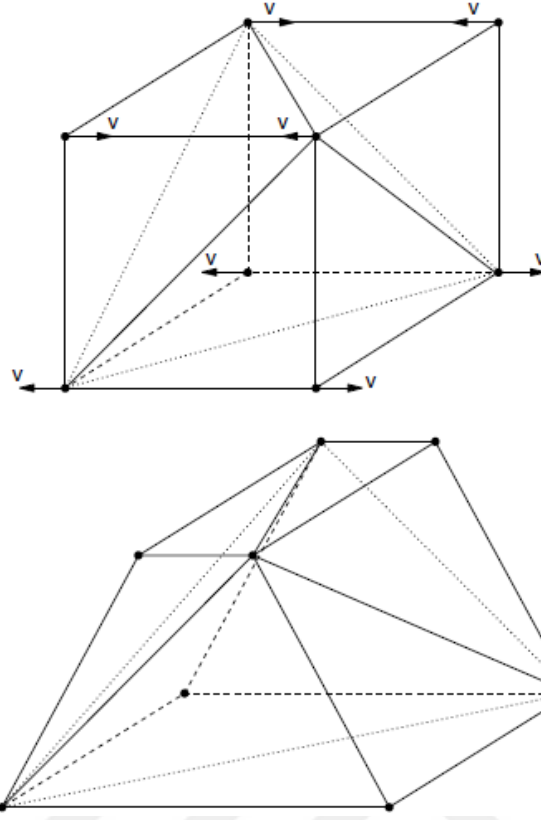
5.4. Zemin Modellemesi

Yapı-Kazık-Zemin etkileşiminin 3 boyutlu olarak modellemesinin -şimdilik- operasyonel olarak uzun sürmesi, hangi çıktılar alınacağı belirtilmediği sürece bütün çıktıları kaydetmesi durumunda bilgisayarın diskinde çok yer kaplaması, yazılımın için (implicit) veya açık (explicit) olarak çözüm yapmasına bağlı olarak doğrusalsız dinamik modellemenin çok zaman alması şu anki teknolojiyle dinamik durum simülasyonun önündeki problemlerden bazılarıdır. Zeminlerin çok düşük gerinimlerde dahi doğrusalsız davranması (hatta bu doğrusalsız davranışın da tam olarak tahmin edilememesi) bu problemin daha da karmaşıklaşmasına yol açmaktadır.

5.4.1. Hexahedral Izgara Ağı

Analizlerde, Sonlu Farklar Yöntemine dayalı olarak açık (explicit) çözüm yapan bir yazılım (Flac3D, Fast Lagrangian Analysis in Continua) kullanılmıştır. Üç boyutlu

sabit gerinim oranı elemanları arasında, tetrahedral elemanın kum saati deformasyonları (*hourglass deformations*) üretmeme avantajı vardır (yani düğüm hızlarının kombinasyonları tarafından oluşturulan deformasyon modelleri gerinim artışı üretmez ve dolayısıyla düğüm kuvveti artışı olmaz). Bununla birlikte, plastisite bağlamında kullanıldıklarında bu elemanlar yeterli deformasyon biçimlerini sağlamaz (Nagtegaal vd., 1974). Bazı durumlarda, örneğin, hacim değişimi olmadan tekil olarak deformasyon göstermesi gereken malzeme modellerinin beklentilerini karşılamamaktadır. Bu durumlarda, elementlerin teoriden beklenene kıyasla aşırı sert bir davranış sergilediği bilinmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, FLAC3D'de karışık bir ayrıklaştırma işlemi (*mixed discretization*) uygulanır. Karışık ayrıklaştırma tekniğinin ilkesi, tetrahedra gerinim hızı tensörünün ilk değişiminin uygun şekilde ayarlanmasıyla elemana daha fazla hacimsel esneklik vermektir. Tekniğin uygulanması, kütlelerin birincil ayrıklaştırmasının hexahedral mi yoksa tetrahedral mi yapıldığına bağlı olarak farklılık gösterir. Marti ve Cundall'ın (1982) öncülüğünü yaptığı yaklaşımda, bölgelerdeki daha kaba ayrıklaştırma, tetrahedral ayrıklaştırmayla süperpoze edilir ve bir bölgedeki belirli bir tetrahedronun ilk gerinim oranı değişmezi, bölgedeki tüm tetrahedra üzerindeki hacimsel ortalama değer olarak değerlendirilir. Yöntem Şekil 5-8'de gösterilmektedir. Burada çizilen belirli deformasyon modunda, özgün sabit gerinim artışı elemanları, sıkıştırılmaz plastik akış teorisi ile uyumsuz bir hacim değişikliği yaşayacaktır. Bununla birlikte, bu örnekte, tetrahedra düzeneğinin (bölgenin) hacmi sabit kalır ve karışık ayrıklaştırma işleminin uygulanması, her bir tetrahedronun bölgenin bu özelliğini yansıtmaya izin verir, dolayısıyla davranışın teori tarafından öngörülenle bağdaşması sağlanır (Itasca, 2012). Bu tez kapsamında bütün zemin modellemesi hexahedral elemanlarla yapılmıştır.



Şekil 5-8 Karışık ayırıştırmanın en verimli olabileceği deformasyon modu

5.4.2. Izgara Ağı Büyüklük Seçimi

Zemin ızgara büyüklükleri, dalgaların doğru aktarımları için boyutlarının ayarlanması gerekir. Girdi hareketinin frekans içeriği ve sistemin dalga hızı özellikleri (V_s , V_p), dalga iletiminin doğruluğunu etkiler. Kuhlemeyer ve Lysmer (1973), maksimum uzaysal eleman boyutunun (Δh), giriş dalgasının en yüksek frekans bileşeni ile ilişkili dalga boyunun onda biri ile sekizde birinden daha küçük olması gerektiğini öne sürer. (Formül 5.1)

$$\Delta h = \frac{\lambda}{10} \quad \text{Formül 5.1}$$

Burada λ , elastik sürekli sistemler için dalga hızından (Formül 5.2) hesaplanabilen, enerji içeren en yüksek frekans bileşeni ile ilişkili dalga boyudur.

$$\lambda = \frac{V_s}{f_{\max}} \quad \text{Formül 5.2}$$

Yüksek frekanslı içeriğine sahip girdi hareketi olduğu durumlarda, stabilite elde etmek için daha küçük eleman boyutlarına sahip ızgara ağı kullanılması gereklidir. Bu, analizler için uzun süren hesaplamalara ve yüksek bellek ihtiyacına yol açabilecek küçük bir zaman adımı (*timestep*) anlamına gelir. Girdi hareketindeki enerjinin çoğunun daha düşük frekanslı bileşenlerde bulunduğu varsayıldığında, girdi hareketi bir filtreleme yoluyla yüksek frekans bileşenlerinin çıkarılmasıyla düzenlenebilir. Bu, sonuçları önemli ölçüde etkilemeden daha büyük boyutlardaki bir ağ kullanımına izin verir. Bu çalışmada modeli oluşturan elemanların düzeyde maksimum boyutu 1 m'ye eşittir. Bu da en düşük zemin parametresinin olduğu durumda ($V_s=150$ m/s) 0 ile 15 Hz aralığında dalgaların geçişine herhangi bir problem olmadan izin vermektedir.

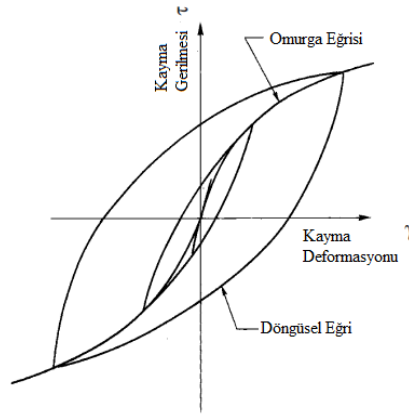
Dinamik bir analiz için zaman adımı (*timestep*), yapısal elemanlar ve arayüz elemanları dahil modeldeki en yüksek malzeme rijitliği ve en küçük bölge tarafından belirlenir. Zaman adımı, hesaplama adımı başına gerçek sismik yükleme süresine karşılık gelen önemli bir parametredir. Zaman adımı ne kadar küçükse, hesaplama süresi o kadar uzun olur. Flac3D bu tür sorunların aşılması amacıyla bütün alanları (zone) dikkate alarak, her bir ızgara ağının hacim hesabını ve tetrahedral elemanların yüzeyleri ve rijitlikleri dikkate alarak minimum gerekli süreyi hesaplamaktadır (Multistepping, Itasca 2012). Bütün analizler dinamik çoklu-adım (*dynamic multi-stepping*) kullanılarak minimum gerekli zaman adımı kullanılarak yapılmıştır.

5.4.3. sig3 Histeretik Model

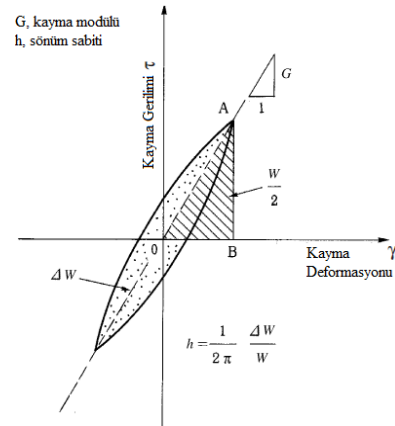
YKZE içerisindeki en etkili ve belirsizliği en yüksek olan malzeme zemin ortamıdır. Dinamik durumdaki zemin davranışını (zemin dinamiği) dikkate alabilmek amacıyla pseudo statik ve dinamik yöntemler mevcuttur. Zeminin dinamik davranışında ise, zeminin doğal periyodu ile gelen deprem hareketinin periyoduna bağlı olarak büyütme veya küçültmenin olduğu, zemin veya yapıların stabilitesinin sağlanması amacıyla deformasyonların dikkate alınması gereklidir. Bu amaçla da frekans ya da zaman tanım alanında analizler yapılmaktadır. 2 yöntem için de zeminin kayma gerilmeleri ve kayma deformasyonlarının belirlenmesi gereklidir.

Kayma gerilmeleri ve kayma deformasyonları arasındaki ilişki normalde 'omurga eğrisi' ve bir histeretik (döngüsel) eğri ile belirlenir. (Şekil 5-9) Bu döngüsel hareket

sırasında oluşacak enerji kaybının dikkate alınabilmesi için çok dikkatli bir şekilde modellenmelidir.



Şekil 5-9 Gerilim-Gerinim eğrisi



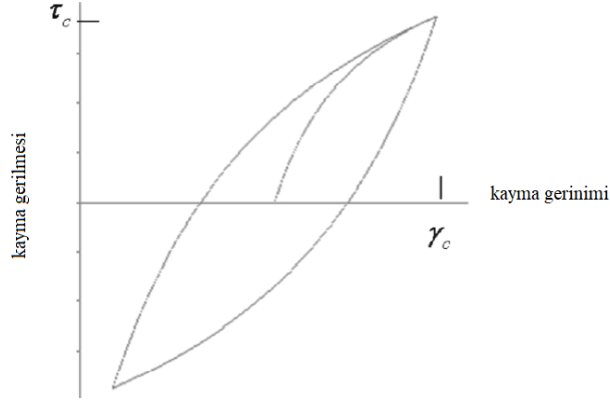
Şekil 5-10 Kayma Modülü ve Sönüm Sabiti

Bu enerji kaybının modellenmesi Flac3D sig3 modeliyle, kayma modülü azalım eğrisinin ve sönüm eğrisinin gerinime bağlı olarak belirlenmesiyle yapılmaktadır.

Dinamik analizlerde gerinime bağlı kayma dayanımı azalımını dikkate almak için sig3 malzeme modeliyle literatürde sıklıkla kullanılan, Vucetic ve Dobry'nin (1991) çalışmasında belirttiği Plastisite indisine bağlı olarak hesaplanan eğrilere çok yakın sonuçlar bulunmuştur.

$$\text{sig3 model } M_s = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad L = \log_{10}(\gamma) \quad (\text{Formül 5.3})$$

Sigmoidal eğriler, istenilen aralık içinde monotoniktir ve uygun asimptotik davranışa sahiptir. Bu nedenle fonksiyonlar, modül azalım eğrilerini temsil etmek için çok uygundur. Sig3 modeli; a, x₀ ve b katsayılarına bağlı olup; deneysel verilerle bulunmuş ya da literatürde kullanılan kayma direnci azalımı eğrilerine uygunluğu, deneme-yanılma yöntemiyle katsayılar değiştirilerek uygun hale getirilmiştir. Sönüm oranı eğrisinin bulunması için ise Flac3D'nin örnekleri içerisinde bulunan bir kod kullanılmıştır. Sig3 model parametreleri girilerek istenilen kayma deformasyonunda oluşan sönüm oranlarının bulunmasıyla oluşturulur ve Şekil 5-11'de grafiğe benzer bir davranış sergiler.



Şekil 5-11 Kayma gerilmesi/gerinimi döngüsü – Elastik model ile Hardin/Drnevich histeretik sönüm modeli

5.5. Rayleigh Sönüm Parametreleri

Laboratuvar ve sayısal sönümlenme eğrilerini eşleştirme girişimlerinin çoğunda, düşük döngüsel gerinim seviyelerinde histeretik formülasyon tarafından sağlanan sönümlenmenin, laboratuvarda gözlemlenenenden daha düşük olduğu kaydedilmiştir. Bu, özellikle yüksek frekanslarda düşük seviyeli gürültüye neden olabilir. Bu tür gürültü, sistemlerin temel tepkisini neredeyse hiç etkilemese de, kozmetik nedenlerden dolayı, az miktarda Rayleigh sönümlenmesi eklenerek giderilebilir. %0.2 Rayleigh sönümlenmesinin (uygun bir merkez frekansta) genellikle çözüm zaman adımını etkilemeden salınımları ortadan kaldırmak için yeterli olduğu bulunmuştur. İleriki bölümlerde anlatılacak sig3 histeretik model ile analizler gerçekleştirildiğinde çok düşük deformasyonlarda sönüm 0 olarak çıkmaktadır. Bunun önüne geçebilmek adına Rayleigh sönüm parametreleri $\alpha=2$, $\beta=0.2$ olarak modele atanmıştır

5.6. Sınır Koşulları

Herhangi bir sistemin modellenmesi yapılırken, özellikle zemin ve yapının da içerisinde bulunduğu bir alanın modellendiği durumlarda, ilgilenilen alanın belli bir kısmı ‘kesip’ alınarak daha makul bir süre içerisinde çözümlenmesi beklenir. Yapı-Zemin etkileşiminin incelendiği durumlarda özellikle yapıdan yansıyan sismik dalgalar sonsuz bir alan düşünüldüğünde sönümlenir (*radiation damping*). Eğer sistemin statik analizi yapılacaksa ‘basınç soğanlarının’ etkilemeyeceği kadar genişlikte model sınırları seçilip sabit sınırlar (*fixed boundaries*) tercih edilebilir. Fakat

bu sınırlar dinamik analizlerde yapıdan gelen sismik dalgaları sistemin içerisine tekrar yansıtılabileceği için çok geniş bir sınır olması gerekmekte ve fakat bu aynı zamanda eleman sayısını artıracacağı için analiz süresini çok uzatıp ekonomik olmayan sonuçlara yol açmaktadır. Hem analiz süresini kısaltmak hem de sınırlara gelen sismik dalgaların etkisini azaltmak amacıyla model taban sınırlarında Viskoz Sınırlar (Viscous Boundary-Quite Boundary), yanal sınırlarda ise Geçirgen Sınırlar (free field) kullanılmıştır.

5.6.1. Sessiz Sınırlar

Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) tarafından geliştirilen bu viskoz sınırlar Flac3D'de kullanılmaktadır. Sınırlara yaklaşan cisim dalgaları 30°'den büyükse tamamen soğurma söz konusudur. Model sınırlarına atanan, ızgaradan (grid) 'bağımsız' sönümleyiciler (*dashpot*) gelen bünye dalgalarını (normal ve kesme) absorbe eder. Bu sönümleyiciler, normal ve kesme viskoz sürtünmesi sağlarlar:

$$t_n = -\rho V_p v_n \quad (\text{Formül 5.4})$$

$$t_s = -\rho V_s v_s \quad (\text{Formül 5.5})$$

Burada ρ birim hacim ağırlık, V_p ve V_s , p vs s dalga hızları, v_n ve v_s ise sınırlardaki normal ve kesme gerilmeleridir. Sayısal analizde gerilimler hesaplanır ve her adımda sınır yüklerinin uygulandığı şekilde uygulanır. Bu viskoz sınırlar zaman-tanım alanında çalışır. Yalnız bu sönümleyiciler ağın içinde olduğunda çok iyi çalışmakta fakat eğer sınırlardan etkililen bir dinamik kaynak varsa modelin kenarlarından dalga enerjisi sızmaktadır (*leaking*). Bu durum model kenarlarına 'geçirgen sınırlar' (Free Field – Transmitting Boundaries) uygulanarak önüne geçilebilir. Bu tez kapsamında YKZE'nin incelendiği bütün modellerde Sessiz Sınır ve Geçirgen Sınırlar model sınırlarında kullanılmıştır. (Şekil 5-12)



Şekil 5-12 Geçirgen ve Sessiz Sınırlar (Itasca, 2012)

5.6.2. Geçirgen Sınırlar

Model sınırları, dalga yansımalarını en aza indirmek ve serbest alan koşullarına ulaşmak için yeterli mesafelere yerleştirilmelidir. Yüksek malzeme sönümlemesine sahip zeminler için bu durum nispeten daha kısa bir mesafeyle elde edilebilir (Seed vd. 1975). Malzeme sönümlemesi düşük olduğunda, gerekli mesafe pratik olmayan bir modele yol açabilir. Alternatif bir prosedür; serbest alan hareketini, sınırların yansıtma yapmayan özelliklerini koruyacak şekilde (yapıdan kaynaklanan dalgaları soğuracak şekilde) zorlamaktır. Bu yaklaşım, sürekli sonlu farklar kodu NESSI'de kullanılmıştır (Cundall ve diğerleri, 1980). FLAC3D için ana ızgara analizine paralel olarak serbest alan hesaplamalarının yürütülmesini içeren bu tür bir teknik geliştirilmiştir.

Ana ızgaranın yanal sınırları, sessiz bir sınırı simüle etmek için viskoz sönümleyiciler ile serbest alan ızgarasına bağlanır ve serbest alan ızgarasından gelen dengesiz kuvvetler (*unbalanced forces*) ana ızgara (*main grid*) sınırına uygulanır. Her iki koşul da, x eksenini yönündeki normal ile bir yan sınır düzlemi boyunca serbest alan sınırına uygulanan denklemlerle ifade edilir. Diğer taraflar ve köşe sınırları için de benzer ifadeler yazılabilir:

$$F_x = -\rho C_p (v_x^m - v_x^{ff}) A + F_x^{ff} \quad \text{Formül 5.6}$$

$$F_y = -\rho C_p (v_y^m - v_y^{ff}) A + F_y^{ff} \quad \text{Formül 5.7}$$

$$F_z = -\rho C_p (v_z^m - v_z^{ff}) A + F_z^{ff} \quad \text{Formül 5.8}$$

ρ	=	dikey olan model sınırı boyunca malzeme yoğunluğu;
C_p	=	yanal sınırdaki p-dalgası hızı;
C_s	=	yanal sınırdaki s-dalgası hızı
A	=	serbest alan ızgara noktasının etki alanı
v_x^m	=	ana ızgara tarafındaki ızgara noktasının yan sınırdaki x hızı
v_y^m	=	ana ızgara tarafındaki ızgara noktasının yan sınırdaki y hızı
v_z^m	=	ana ızgara tarafındaki ızgara noktasının yan sınırdaki z hızı
v_x^{ff}	=	serbest alan tarafındaki ızgara noktasının yan sınırdaki x hızı
v_y^{ff}	=	serbest alan tarafındaki ızgara noktasının yan sınırdaki y hızı
v_z^{ff}	=	serbest alan tarafındaki ızgara noktasının yan sınırdaki z hızı
F_x^{ff}	=	ızgara noktası etrafındaki serbest alan bölgelerinin σ_{xx}^{ff} gerilmelerinden gelen katkılarla serbest alan ızgara noktası kuvveti
F_y^{ff}	=	ızgara noktası etrafındaki serbest alan bölgelerinin σ_{xy}^{ff} gerilmelerinden gelen katkılarla serbest alan ızgara noktası kuvveti
F_z^{ff}	=	ızgara noktası etrafındaki serbest alan bölgelerinin σ_{xz}^{ff} gerilmelerinden gelen katkılarla serbest alan ızgara noktası kuvveti

Bu şekilde, yukarı doğru yayılan düzlem dalgaları model sınırında distorsiyona uğramaz çünkü serbest alan ızgarası sonsuz bir modeldekiyle eşdeğer koşulları sağlar. Eğer ana ızgara uniform ise ve yüzey yapısı yoksa, serbest alan ızgarası ana ızgara ile aynı hareketi yürüttüğü için yanal sönümleyiciler (*dashpot*) kullanılmaz. Bununla birlikte, ana ızgara hareketi serbest alandan farklıysa (örneğin ikincil dalgaları yayan bir yüzey yapısının bulunması nedeniyle), bu durumda sönümleyiciler sessiz sınırlara (*quiet boundaries*) benzer bir şekilde enerjiyi emecek şekilde hareket eder.

6. YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ İÇİN HAZIRLANAN NÜMERİK ANALİZ MODELLERİNİN DOĞRULANMASI

6.1. Kazık Modeli Doğrulaması

Tez için yapılacak analizlerin sonuçlarının akademik literatür düzlemi içerisine oturtulması amacıyla hazırlanan bu bölüm Fan ve Gazetas (1991) tarafından yapılan bir çalışma baz alınarak hazırlanmıştır. Çalışmanın içeriğinde bahsedildiği gibi sismik etkiler altında kalan bir kazık veya kazık grubunu dikkate aldığımızda, çok esnek olan bir kazık sisteminin sismik zemin hareketini takip etmesi beklenirken, gerçek durumda olan şey, kazıklar bu harekete karşı direnecek ve böylelikle zemin deformasyonlarını değiştirecektir. Bunun sonucunda ise sismik dalgalar 'saçılır', yapı tabanının etkin bir şekilde maruz kaldığı sismik hareket zeminin alanının serbest (free-field) hareketinden farklıdır ve genellikle bu farklılık dönme (yatay ötelenmeye ek olarak) bileşenlerini içerir. Zeminlere görece farklı olan rijitliklerinin bir işlevi olarak kazıklar; eğilme, aksel ve kesme gerilmeleri etkisi altına girer. Bu sismik dalga kaynaklı zemin ve kazıkların karşılıklı etkileşimi aynı zamanda kazık başlıklarının kazıkları kısıtlamasından ve üstyapıdan dolayı da etkilenir ve burada bundan sonra kinematik zemin-kazık-temel sismik etkileşimi ya da daha basitçe önceki bölümlerde bahsedilen kinematik etkileşim olarak adlandırılacak olan etkileşim ortaya çıkar.

Modelleme yaparken kinematik etkileşimi tamamıyla modellemek zor bir iştir (özellikle düşey olmayan sismik dalgaların kazık üzerindeki etkileri bekleniyorsa ya da azımsanmayacak derecede doğrusal olmayan şekilde gelişecek bir zemin davranışı bekleniyorsa). Düzgün bir şekilde modellenmiş doğrusal analiz sonuçlarından deprem sırasında oluşan zemin-kazık etkileşimine dair değerli bir içgörü ve pratik anlamda kullanışlı sonuçlar elde edilebilir. Çalışmanın yazarları tarafından da bahsedilen bağlamda yapılan parametrik analizler raporda sunulmuştur.

Raporda da bahsedildiği üzere konuyla ilgili birçok çalışma yapılmış fakat parametrik çalışmanın eksik olduğunu farkedip yazarlar tarafından pratik kullanıma uygun boyutsuz grafiklerin sunulduğu bir rapor hazırlanmıştır.

Söz konusu raporda yüzen kazıklar 3 farklı kategoride incelenmiştir:

- Tek kazık, serbet başlıklı veya sabit başlıklı
- Sabit başlıklı, 2-3-4-6 veya 9 adet kazık grubu (iksa, heyelan kazığı)
- 2x2, 4x4, veya 6x6 karelajlı grup kazıklar.

Kazıkların çapları d , Boyları L , sabit bir elastisite modülüne (E_p) ve birim hacim ağırlığa (ρ_p) sahip doğrusal elastik kiriş eleman olarak modellenmiştir.

Kazıkların davranışının incelendiği zemin koşulları:

1. Zemin tabakasının sabit bir elastisite modülüne sahip olduğu
2. Zemin tabakasının elastisite modülünün derinliğe bağlı olarak doğrusal olarak değiştiği
3. 2 farklı zemin tabakasının bulunduğu model. ($E_{s1}=0.1E_{s2}$ ve $E_{s1}=0.3E_{s2}$)

Bütün durumlarda zemin, doğrusal histeretik, sabit poisson oranı (ν_s)-birim hacim ağırlığı (ρ_s)-histeretik sönümü(β_s) olan sürekli bir ortam olarak kabul edilmiştir.

YKZ sistemi düşey olarak yayılan harmonik kesme dalgalarıyla uyarılmıştır. Bu da yüzeydeki serbest alanda (free-field), diğer bir deyişle kazıkların etkilemediği alanda yatay bir salınım hareketi ortaya çıkaracaktır ($U_{ffexp(i\omega t)}$). Kazıkların etrafındaki ajite olmuş dalga alanı ise; gelen dalga (yukarı yayılan), yüzeyden yansıyan (aşağıya yayılan), kazıklar tarafından kırılan dalgalardan ve birincil-yatay dalgalarının karmaşık bireşiminden oluşmaktadır. Bu 3 Boyutlu sınır-değer probleminin çözümü ise Kaynia ve Kausel (1982) tarafından geliştirilmiş olan bir yöntemle aşılmıştır. Bu yöntem temel olarak, kazık-zemin arayüzey sürtünmesinden kaynaklı olan deplasman alanlarının tanımlandığı Green Fonksiyonlarının Fourier ve Hankel dönüşümleriyle dalga denklemlerinin çözülmesiyle bulunan bir sınır-integral tipi formülasyondur (Kausel, 1981). Bu fonksiyonlar, kazık-zemin arayüzeyindeki deformasyonların uyumluluğunu dayatırken, analitik olarak elde edilmiş kazık esnekliği matrisi ile birleştirilen dinamik zemin esnekliği matrisini de verir. Rastgele kazık grubu için bu yöntem belirli bir zemin profilinde, her ikisi de frekansın kompleks değerli fonksiyonları olan, kütleli başlıkların yatay hareketini ve dönmelerini verir. Bu çalışmadaki çoğu sonucun elde edilmesinde Kaynia & Kausel (1982) formülasyonu kullanılmıştır. Ek olarak, bazı tekil kazık davranış çözümlerini elde etmek ve sonuçların farklı sayısal çözüm prosedürlerine karşı çok

ince hassasiyetlerini sağlamak için sonlu-eleman, sınır-eleman formülasyonları kullanılmıştır. Makris ve Gazetas'ın (1990) elindeki bir problem için geliştirilen basit bir model de sayısal sonuçlarda gözlemlenen bazı eğilimleri niteliksel olarak açıklamak için kullanılmıştır.

Zemin-Kazık-Temel kinematik etkileşiminin etkisi makalede 2 adet kinematik tepki faktörüyle resmedilmiştir,

$$\frac{|U_p|}{U_{ff}} = I_u \quad \text{ve} \quad \frac{|\Phi_p|d}{U_{ff}} = I_\Phi \quad \text{Formül 6.1}$$

Frekans faktörünün bir fonksiyonu olarak grafikleri çizilmiştir:

$$\alpha_0 = \frac{\omega d}{V_s^*} \quad \text{Formül 6.2}$$

U_p = Yatay ötelenme

Φ_p = Açısal dönme

U_{ff} = Serbest alan yatay ötelenmesi

d = kazık çapı

V_s^* = Homojen profilde V_s , Homojen olmayan doğrusal zeminlerde $V_s(L)$, 2 tabakalı zeminde V_{s1} değerleri dikkate alınacaktır.

$V_s(L)$ = kazık uzunluğundaki derinlikte bulunan V_s değeri

V_{s1} = kazığın bulunduğu 2 tabakalı zeminde üst tabakanın V_s değeri

U_p ve Φ_p değerleri kazık başlığı seviyesinde “etkin girdi hareketi”ni oluşturur; hem radyasyon sönümlemesi (her kazıktan yayılan ‘kırılmış’ dalgalar sebebiyle) hem de malzeme sönümlemesi (zeminin histeretik hareketi) nedeniyle karmaşık sayılardır. Bu sebeple kinematik tepki faktörlerinin tanımında U_p ve Φ_p ‘nin genliklerinin (mutlak değerler) kullanıldığı belirtilmiştir.

Verili olan kazık grubu ve zemin profili için I_u ve I_Φ üzerinde etkisi olan aşağıdaki boyutsuz problem parametreleri:

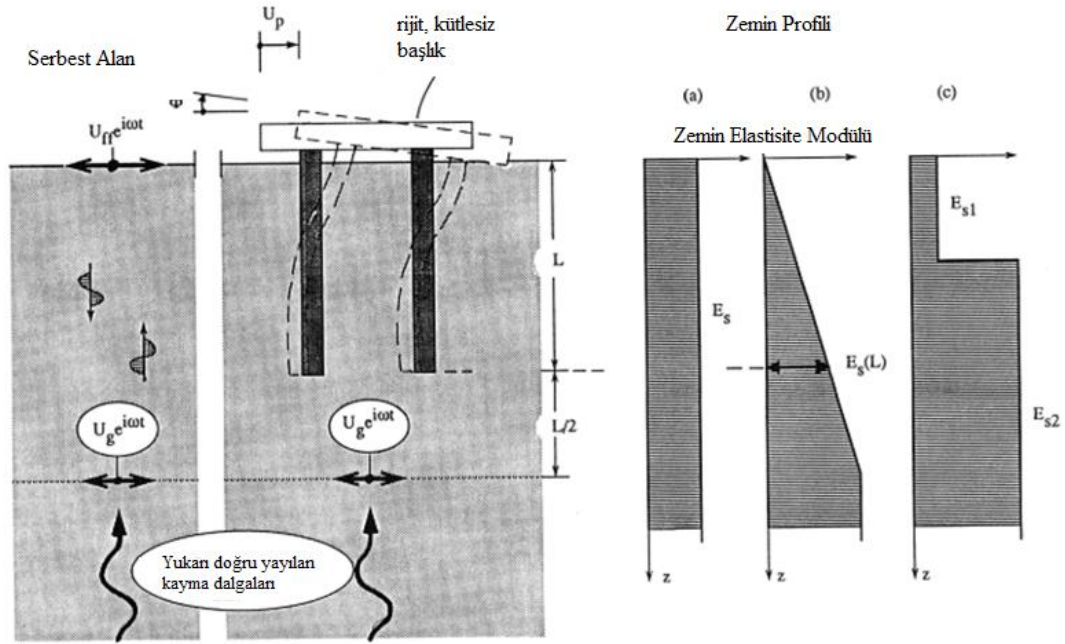
- Kazık elastisite modülünün, zemin elastisite modülüne oranı

$$\frac{E_p}{E_s}, \frac{E_p}{E_s(L)}, \frac{E_p}{E_{s1}} \quad \text{Formül 6.3}$$

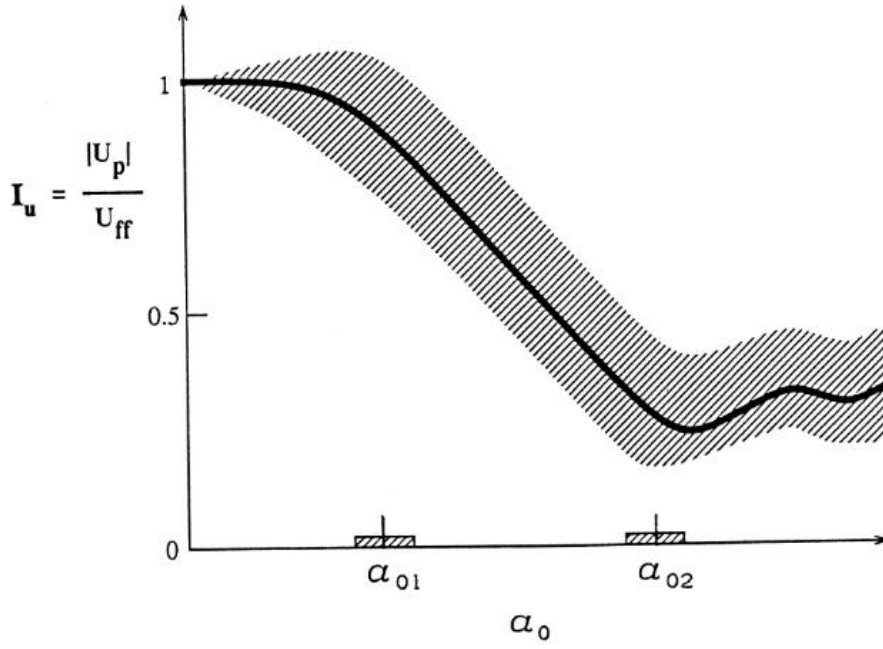
Şekil 6-1'de görüldüğü üzere sırasıyla homojen, homojen olmayan ve tabakalı zemin profilleri için

- Birbirine en yakın olan kazıkların çaplarına oranı, s/d (aralık oranı) ve
- Kazık narinlik oranı, L/d .

Yukarıda bahsedilen parametreler ve etkileşim durumları dikkate alınarak yapılan analizler ışığında raporda sunulan çıktılar incelendiğinde genel kazık davranışının görünümü: frekans faktörü(a_0) değeri arttıkça serbest alan hareketinin azalması yönünde olmaktadır. Fakat bu eğilim rapor kapsamında çalışılan hemen hemen bütün durumlarda geçerli olsa da ana 4 faktörün dramatik düşüş alanını(a_{01} - a_{02}) etkilediği bulgulanmıştır: (i) zemin profili (ii) kazığın göreceli rijitliği (iii) kazık başlığının kazıklara bağlanma durumu (iv) kazık narinlik oranı.



Şekil 6-1 Raporda çalışılan sistem ve zemin profili



Şekil 6-2 Kinematik Deplasman Faktörünün İdealize Edilmiş Genel Şekli $I_u = I_u(\alpha_0)$

Kazıklar daha rijit oldukça sismik zemin hareketlerini azaltması beklenir ve bundan dolayı onların kinematik tepkisi yumuşak kazıklara görece olarak α_{01} ve α_{02} 'nin daha düşük değerleriyle karakterize edilir.

Kazıkların bir başlığı olmadığı durumla bağlı olduğu durum arasında raporun içeriğindeki grafiklerden de görüleceği üzere E_p/E_s 'nin artmasına benzer bir durumda gözlemlenen bir etki gözlemleniyor: α_{01} ve α_{02} düşmeye eğilimli ve bundan dolayı deprem sırasında oluşan etkin kazık başlığı girdi hareketi daha düşük şiddetli olması etkisi. U_p 'nin U_{ff} 'yi geçmesi durumunun serbest başlıklı tekil kazıkta gözlemlendiği fakat bunun sebebinin anlaşılamadığı ve fakat başlığa bağlandığında bu gözlemlenen belirtinin ortadan kalktığı belirtilmektedir.

İksa-heyelan kazıklarındaki kazık sayısı ya da temel altı kazıklarındaki aralık oranı (s/d) ne kadar değişirse değişsin deplasman faktörü (I_u) üzerinde fazla bir etkisi olmamıştır. Raporun içeriğindeki grafikler incelendiğinde, düşük ve orta frekans (0.05-0.3) aralıklarında çok az kazık-kazık etkileşimi olduğu ortaya çıkmaktadır, birbirine çok yakın kazıklarda bile. Bu sonuç, literatürde kazık-kazık etkileşiminin baskın rol oynadığını söyleyen çalışmaların tam tersini göstermektedir.

Çok düşük frekans faktörüne sahip grup kazıklarda bu tarz bir etkileşimin olmaması şu şekilde açıklanabilir: sismik dalgaboyu o kadar geniş ki kazıklar zemin hareketini neredeyse

aynı şekilde takip etmektedir ve bu yüzden de herhangi bir sismik dalga yayılması saçılımı olmamaktadır. Diğer bir deyişle kazık-zemin arayüzeyinden dışarı doğru yayılan bir dalga olmadığı ve komşu kazıkların etkilenmediği, böylelikle herhangi bir etkileşim olmadığı raporda belirtilmektedir.

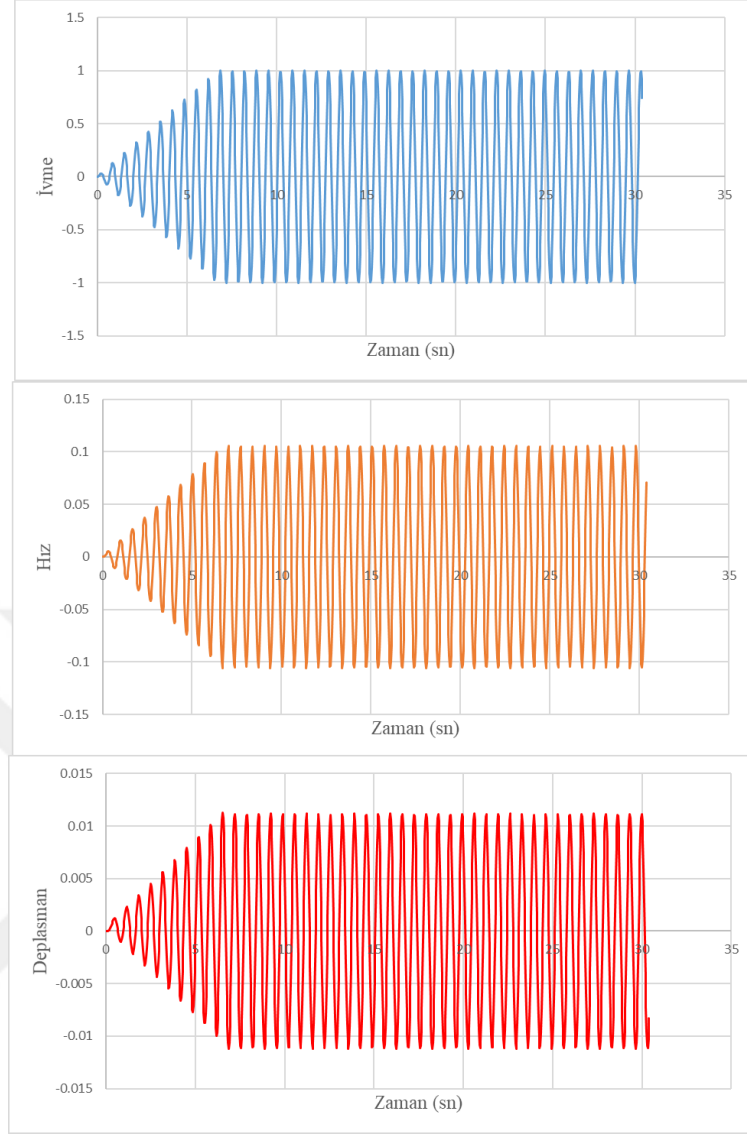
Düşük ve orta frekans faktörleri için özellikle de kazık ve serbest alan zemin hareketinin birbirinden farklı olduğu ve bundan dolayı sismik dalgaların kazıklar tarafından saçıldığı durumlarda etkileşim olmamasının pek de basit bir açıklaması yoktur. Çift tabakalı zeminlerde, alt tabakada U_p-U_{ff} farkı neredeyse sıfırdır ki kazık-zemin arayüzeyinden oluşan dalgalardan bu fark sorumludur(saçılım). Fakat bu fark yüzeyden $z=4d$ kadar derinliğe kadar 'pozitif' bir fark oluştururken, tabaka değişiminin olduğu kota kadar negatif bir fark yaratmaktadır. Bundan dolayı kazığın bu 2 farklı davranış sergileyen kısmı benzer genlikler fakat karşıt fazlarla dalga yayılımıyla başlıyor – sallanmayı (*rocking*) hatırlatan bir durum -, bu karşıt dalgaların 'yıkıcı dalga girişi' olduğu varsayımıyla genlikler kazıktan uzaklaşırken birbirini sönmülüyor ve kazıkların birbiri üzerindeki etkisini-etkileşimini azaltıyor.

Öte yandan çok yüksek frekanslarda kazık aralığı, toplam kazık sayısı ve grup kazıklarının konfigürasyonu (pratik anlamda olmasa da) $I_u(a_0)$ eğrilerinin davranışını etkilemektedir.

6.1.1. Kazık Modeli Doğrulama Analizleri

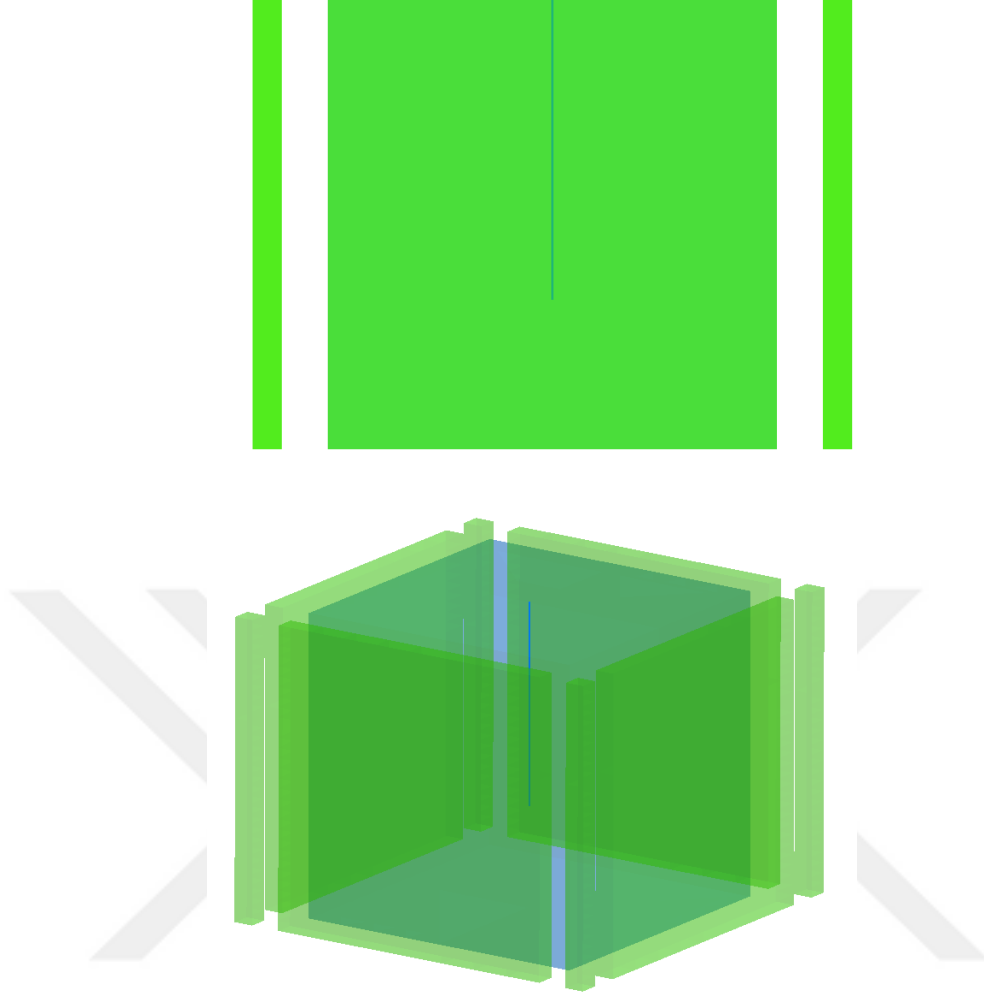
Doktora tezi kapsamında yapılacak analizlerin verifikasyonu için incelenen raporun içeriğinde bahsedilen ve yukarıda açıklanan bulgular doğrultusunda bu alt başlıkta analizlerin karşılaştırması yapılacaktır.

Analizler için oluşturulan sonlu farklar modeli yine tez kapsamında kullanılacak olan model dikkate alınarak oluşturulmuştur. Öncelikli olarak girdi hareketi olarak, her a_0 değeri için ivme-zaman grafikleri oluşturulmuş ve deplasmanları analitik olarak hesaplanıp ayrıca doğrulaması sağlanmıştır. Şekil 6-3'te $a_0=0.05$ değeri için oluşturulmuş ivme-zaman grafiğinde görüldüğü üzere analitik olarak hız ve deplasman dönüşümleri yapılmıştır. Rapor kapsamında yapılan lineer analizleri bu tez kapsamında yapılan sonlu farklar nümerik analiz yöntemiyle karşılaştırabilmek için elastik malzeme modeli tercih edilmiştir. Modelin taban sınırları *Quiet Boundary* (Sessiz Sınır) kullanılarak modellenmiştir.



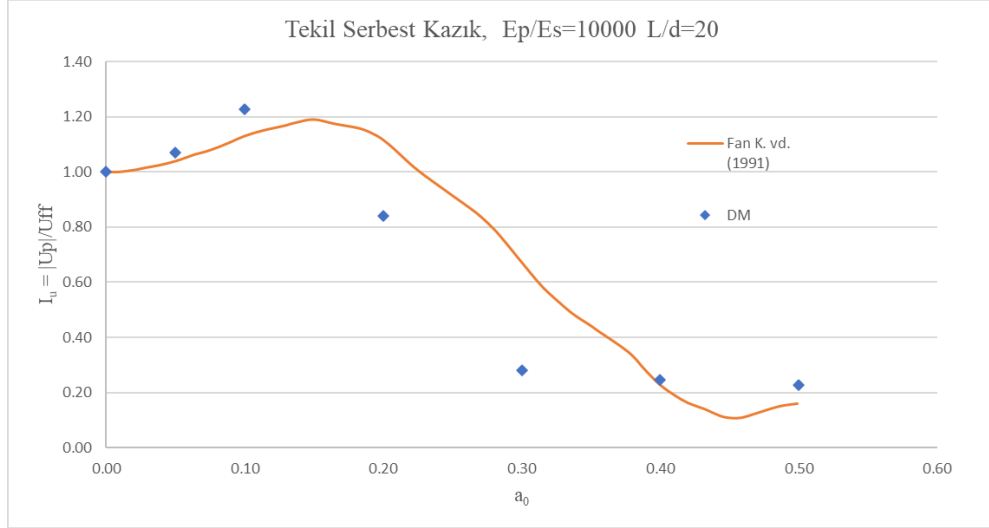
Şekil 6-3 Doğrulama için kullanılan ivme-hız-deplasman grafikleri ($a_0=0.05$, $T=0.67sn$)

Modelin derinlik-genişlik ve uzunluğu 30x30x30 m, kazık çapı ve boyu sırasıyla 1 ve 20 m olarak belirlenmiştir (Şekil 6-4). E_p/E_s oranı bahsedildiği gibi karşılaştırmalara bağlı olarak aşağıda sunulan şekillerin üzerinde belirtilecektir. Karşılaştırma için a_0 (0.05-0.1-0.2-0.3-0.4-0.5) değerlerine göre hesaplanan periyod (T) değerlerinin 1/20'si adım aralığı olarak seçildiği için yüksek frekanslarda uygulanan harmonik ivmenin süresi azalmaktadır.



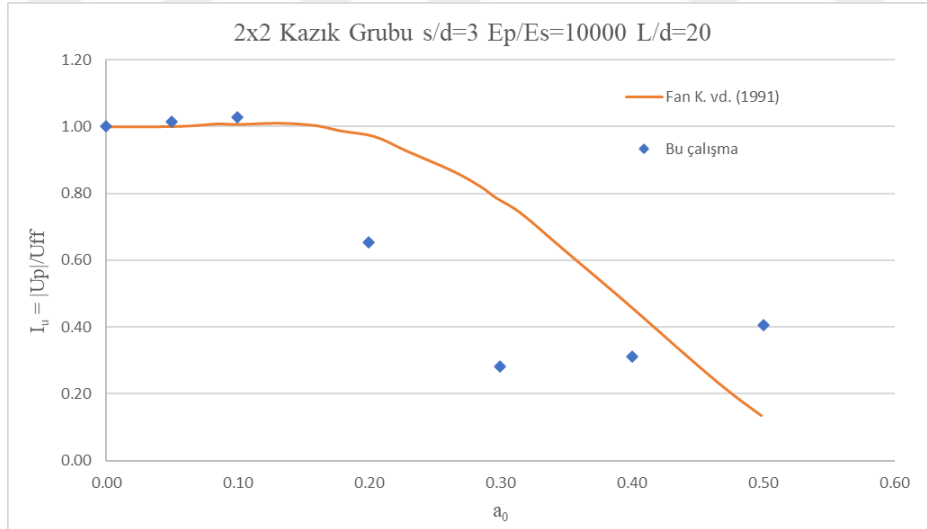
Şekil 6-4 Doğrulama İçin Hazırlanan Modelin Karşidan ve Perspektif görünümü

Her a_0 değeri için modellenen serbest alan ve tek serbest kazık için sonlu farklar analizi zaman-tanım alanında gerçekleştirilmiş, modelin en üst orta noktasından alınan deplasman-zaman çıktılarının mutlak değerleri kullanılarak birbirlerine oranlanmıştır.



Şekil 6-5 Homojen Zemin Tabakası İçindeki Tekil Kazık Kinematik Etkileşimi ($\rho_s/\rho_p=0.7$, $\beta=0.05$ ve $\nu_s=0.4$)

Şekil 6-5'te her a_0 için U_p/U_{ff} oranları incelendiğinde sonuçlar raporun içeriğinde paylaşılan grafiklerle uyumlu olduğu ve tez kapsamında kullanılacak modelin lineerleştirilmiş halinin doğrulanması belirlenmiştir.

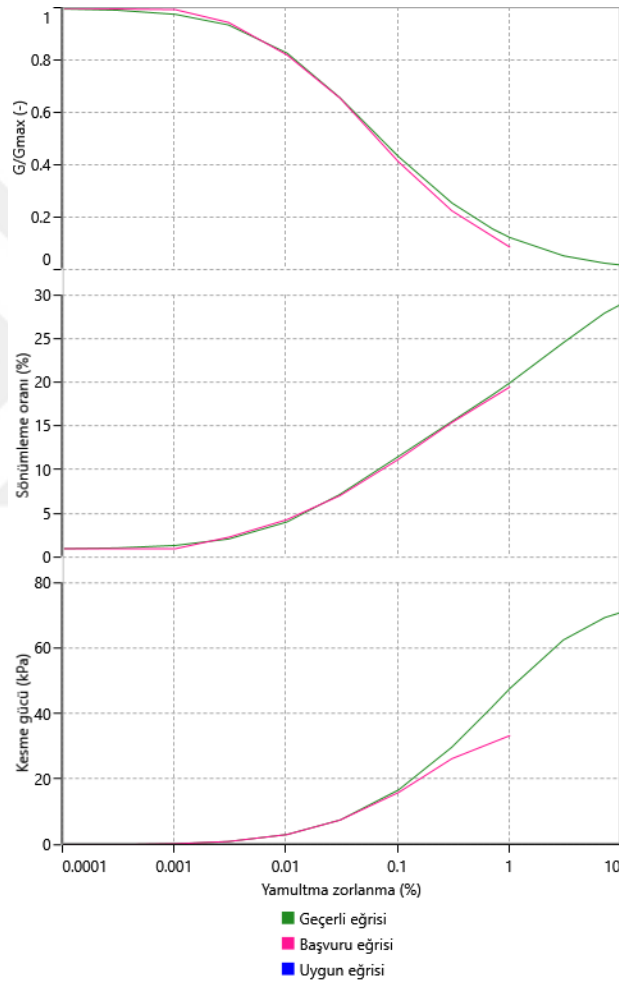


Şekil 6-6 Homojen Zemin Tabakası İçindeki 2x2 Kazık Grubunun Kinematik Etkileşimi ($\rho_s/\rho_p=0.7$, $\beta=0.05$ ve $\nu_s=0.4$)

Yapılan karşılaştırma analizlerinde tekil kazık için sonuçlar uyumlu çıkarken 2x2 kazık grubu ($s/d=3$) için karşılaştırma sonuçları incelendiğinde orta-frekans bölgesinden sonra farklı bir eğilim gösterdiği Şekil 6-6'da gözükmektedir.

6.2. Zemin Modeli Doğrulama Analizleri

Bu tez kapsamında 3B zemin modellerinin doğrulanması amacıyla DeepSoil (1D Wave Propagation Program for Geotechnical Site Response, Hashash vd., 2020) yazılımıyla saha tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme modeli olarak GQ/H (Generalized Quadratic/Hyperbolic, Groholski vd., 2016) model seçilmiş, Darendeli (2001) düzeltmesi yapılarak kayma modülü azalım eğrileri Vucetic&Dobry (1991) tarafından $I_p=15$ için sunulan eğrilere uyumlu hale getirilmiştir (Şekil 6-7).



Şekil 6-7 Vucetic&Dobry $I_p=15$ ile Darendeli düzeltmesi yapılmış eğriler

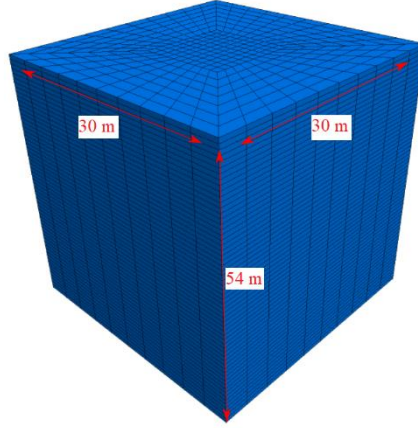
Darendeli (2001) çalışması, deneysel olarak elde edilen verilere dayanarak kesme dayanımı - kesme gerinim eğrilerini oluşturur. Düşük deformasyonlarda, veriler rezonant kolon testi kullanılarak toplanır ve orta kesme gerinim seviyelerine doğru burulma kesme testi (*torsional shear test*) sonuçları kullanılır. Değerler yüksek deformasyon seviyelerinde tahmin edilir. Bu ekstrapolasyon, yüksek deformasyonlar kayma mukavemetini olduğundan az veya fazla tahmin

edebilir. Bu nedenle, büyük gerilimlerde doğru kesme dayanımını hesaba katmak için kesme mukavemeti düzeltilmesi gereklidir (Phillips ve Hashash 2009). Groholski vd. (2016) tarafından önerilen Genel Kuadratik/Hiperbolik model, büyük gerilimlerde belirtilen kayma mukavemetine Formül 6.5'deki τ_{\max} parametresi) göre referans eğrilerini (Darendeli, 2001) otomatik olarak düzelten bir eğri uydurma şemasına sahiptir. Eğri uydurma parametreleri θ_1 ile θ_5 , Formül 6.4), referans çalışmalardan elde edilen modül azaltma eğrilerini mümkün olduğunca korumak için kullanılır ve büyük deformasyon değerlerini belirtilen büyük deformasyon kesme dayanımına göre modifiye eder.

τ_{\max} ve θ_1 'den θ_5 'e kadar olan parametreler, kayma mukavemeti ile düzeltilmiş kayma mukavemeti - kayma gerinim eğrilerini oluşturmak için gereklidir. τ_{\max} 'ı elde etmek için kullanıcının yalnızca modellenecek olan zemin malzemesinin yüksek gerinimlerdeki kesme dayanımını belirlemesi yeterlidir. θ_1 'den θ_5 'e kadar olan parametreler referans çalışmasına göre elde edilebilir (Groholski vd. 2016). Bu parametreleri elde etmenin kolay bir yolu DeepSoil yazılımında tabakalı model oluşturabilir ve mevcut referans eğrisini seçebilir (örn. Vucetic&Dobry kil için eğrileri). Tabakalı model oluşturulduktan sonra, GQ/H eğri uydurma rutini, kayma mukavemeti ile düzeltilmiş kayma mukavemeti-kayma gerinim eğrisini hesaplar ve θ_1 ile θ_5 arasındaki parametreleri sağlar. Bu değerler, herhangi bir referans kesme mukavemeti-kayma gerinim eğrisi tanımlamaya gerek kalmadan doğrudan zemin histeretik malzemesinde kullanılabilir. Malzeme modeli, aşağıdaki fonksiyonları kullanarak kayma mukavemeti-kayma gerinim eğrisini oluşturmak için τ_{\max} , G_0 ve θ_1 - θ_5 'i kullanır:

$$\theta_{\tau} = \theta_1 + \theta_2 * \frac{\theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}}{\theta_3^{\theta_5} + \theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}} \quad \text{Formül 6.4}$$

$$\tau = \tau_{\max} * \left[\frac{1}{\theta_{\tau}} * \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - \sqrt{\left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4 * \theta_{\tau} * \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right\} \right] \quad \text{Formül 6.5}$$



Şekil 6-8 Flac3D için Deepsoil Eşlenik Modeli

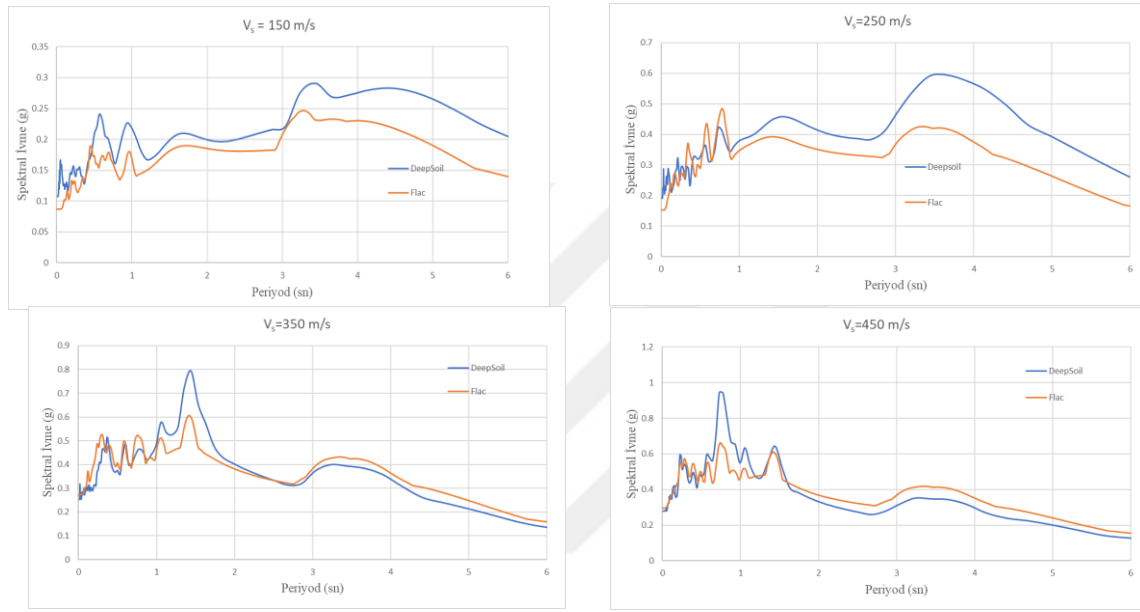
Flac3D modeli ise analizlerde kullanılacak modellerle aynı boyut ve özelliklerde seçilmiştir. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerde deprem kaydı olarak YPT_FN değerleri sisteme tek yönlü (x) olarak tabandan uygulanmıştır. Model tabanına, Deepsoil modelinde elastik yarı alan, Flac3D modelinde ise sessiz sınır (Quiet Boundary) koşulları atanmıştır. (Şekil 6-8)

Deepsoil analizlerinde kullanılan $V_s=150$ m/s için hazırlanmış parametreler Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1 Deepsoil Zemin Modellemesi için kullanılan $V_s=150$ için örnek parametreler

<i>Temel Zemin Özellikleri</i>	
Tabaka Kalınlığı (m)	1
B.H.A. (kN/m ³)	17
V_s (m/s)	150
Efektif Gerilme (kPa)	8.5
Kayma Dayanımı (kPa)	75
<i>Zemin Modeli Özellikleri</i>	
Dmin (%)	0.96726035
Theta1	-3.59
Theta2	2.3
Theta3	15.4881662
Theta4	1
Theta5	0.99
A	1
<i>Darendeli Azaltma Faktörü</i>	
P1	0.865
P2	0.1

Karşılaştırma amacıyla 2 modelde de (Flac 3D, DeepSoil) zemin tabakalarının en üst orta noktasındaki ivme spektrumları kullanılmıştır. Şekil 6-9’da görüldüğü üzere yapılan analizler sonucunda modelin en üst noktasındaki ivme-zaman verilerinden elde edilen ivme spektrumları karşılaştırıldığında, bu tez kapsamında incelenen periyod aralığında (2.4-2.5 sn.) Flac3D’de oluşan spektral ivme değeri Deepsoilde oluşan spektral ivmenin ~%80’ine karşılık gelmektedir. Bu farkın 3 Boyut etkisinden kaynaklandığı düşünülmekte ve genel olarak spektral davranış incelendiğinde modelin tepki analizinin makul uyuma seviyelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6-9 Flac3D ve Deepsoil İvme Spektrumu Karşılaştırması

6.3. Gömme Derinliği Doğrulama Analizleri

Önceki alt bölümlerde incelendiği üzere kazık ve zemin modellerinin literatürle uyuşumunun olduğu gösterilmiştir. Bu tez kapsamında deprem etkisi altındaki kazıklı temellerin gömme derinliği değişiminin ne kadar etkileyeceği inceleneceği için NEHRP tarafından hazırlanan “*Soil-Structure Interaction for Building Structures (2012)*” yönetmelikteki gömülü temellerdeki ivme değişiminin hesaplanması için verilen yöntemle doğrulaması yapılmıştır.

Bir binanın temeli, zemin yüzeyinin altına gömülmüşse (yani yapının bir bodrum katı varsa), yüzeyin altındaki derinlikle birlikte yer hareketinin azalması sonucunda temel seviyesindeki hareketler de azalır. Mevcut çözümler, sonlu veya sonsuz kalınlıktaki (half-space) üniform bir zemine gömülü rijit silindirler için geçerlidir. Kausel vd. (1978) ve Day (1978) tarafından sunulan analitik çözümler, gömülü silindirlerin tabanındaki temel giriş hareketlerini, serbest alan yüzey yer hareketinin (u_g) bir fonksiyonu olarak tanımlar. Gömülü silindirler, dikey olarak yayılan eşfazlı kayma dalgalarına maruz kaldıklarında, derinlik ve dalga saçılma etkileri dolayısıyla gerçekleşen yer hareketi azalmaları nedeniyle u_g 'ye göre taban öteleme hareketinde bir azalma yaşarlar. Dönmeler, gömme derinliği boyunca silindirlere uygulanan farklı yer değiştirmelerin bir sonucu olarak da ortaya çıkar. Makalede ve Yönetmelikte de belirtilen, dikdörtgen biçimli temellere de uygulanabilecek transfer fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$H_u = \frac{u_{FIM}}{u_g} = \cos\left(\frac{D}{B_e} a_0^k\right) = \cos\left(\frac{D\omega}{V_s}\right), \quad \frac{D\omega}{V_s} < 1.1 \quad \text{Formül 6.6}$$

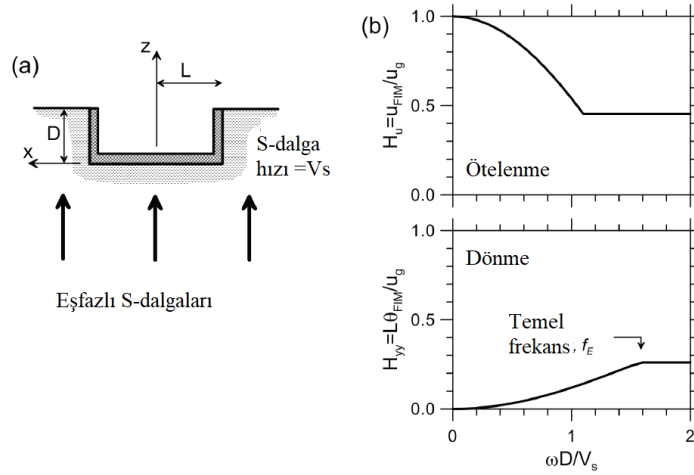
$$H_u = 0.45, \quad \frac{D\omega}{V_s} > 1.1 \quad \text{Formül 6.7}$$

$$V_{s,ort} = \frac{z_p}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta z_i}{(V_{s,F}(z))_i} \right)} \quad \text{Formül 6.8}$$

$$z_p = B_e^A, \quad B_e^A = \sqrt{A/4} = \sqrt{BL} \quad \text{Formül 6.9}$$

$$a_0^k = \frac{\omega(B_e^A)}{V_s} \quad \text{Formül 6.10}$$

Burada D , Şekil 6-10'da gösterildiği gibi gömme derinliği. V_s , profil boyunca hesaplanan ortalama $V_{s,ort}$ hesaplanarak kullanılacaktır.



Şekil 6-10 Kayma dalgalarına maruz kalan temel çizimi (a) şematik geometri ve (b) yatay ötelenme ve dönmeler için transfer fonksiyonları

Karşılaştırma amacıyla Flac3D'de hazırlanan modelin gömme derinliği, $D=15\text{m}$ 'dir. Modelde kullanılan tabaka kalınlığı 54 m olarak belirlenmiştir. Elastik malzeme modeli için kullanılan parametreler Tablo 6.2'de sunulmuştur. H_u değerini frekans bazlı olarak bulmak için temel merkezinden seçilen bir nokta ile kazı sınırından 20 m yatay mesafedeki bir noktada ivme-zaman verileri kaydedilmiştir (Şekil 6-12).

Modelin taban sınırlarında Sessiz Sınırlar (*Quiet Boundaries*) kullanılmış, kenarlardaki sınırlarda ise Geçirgen Sınırlar (*Transmitting Boundaries*) kullanılmıştır. Temel ve duvar elastik malzeme modeli parametreleri Tablo 6.3'de verilmiştir. Temel boyutları $40 \times 40\text{ m}$ boyutlarında seçilmiştir.

Tablo 6.2 Gömme Derinliği Doğrulaması için histeretik malzeme modeli parametreleri

V_s (m/s)	150
ρ (g/cm ³)	1.8
ν	0.4
E_0 (kPa)	113400
G (kPa)	40500
K (kPa)	189000

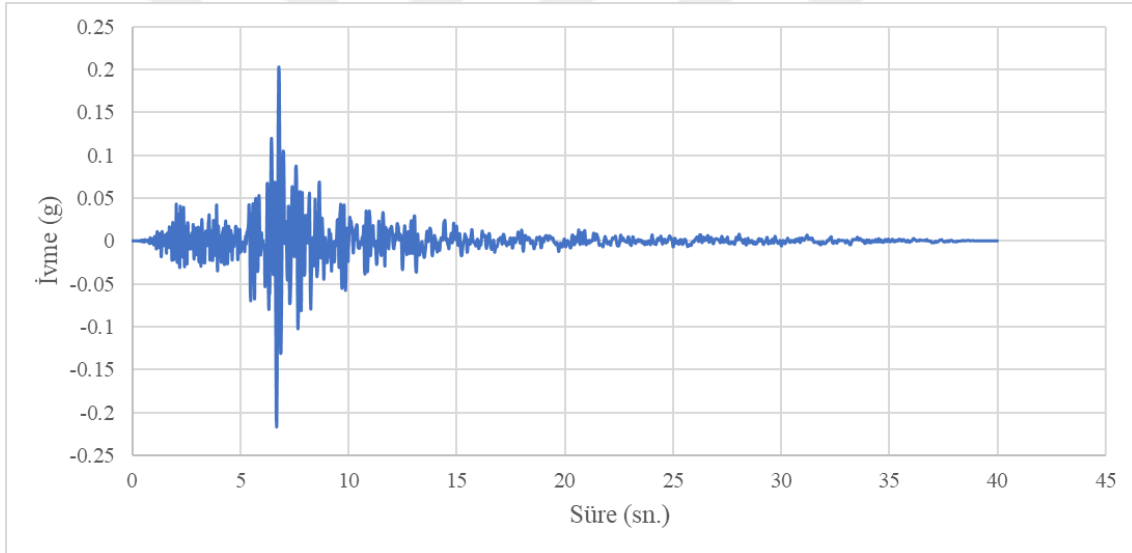
Tablo 6.3 Temel ve Duvar Parametreleri

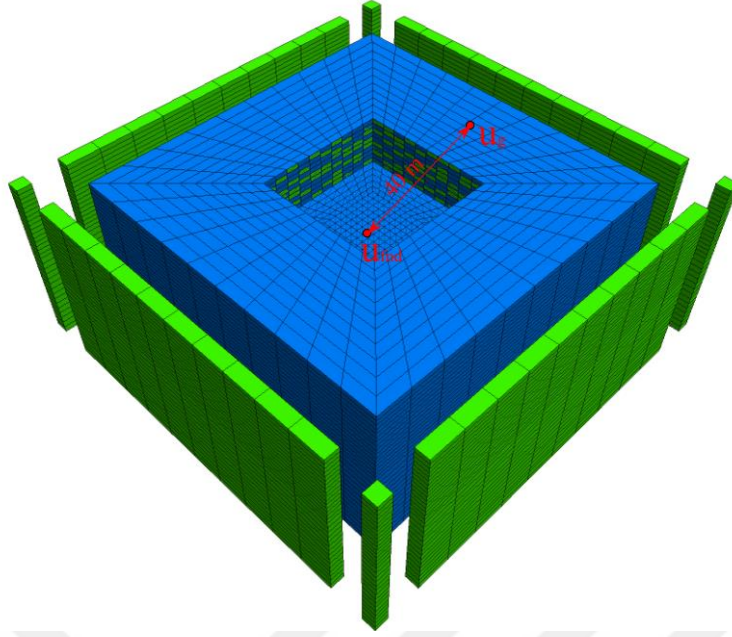
	Temel	Duvar
$B.H.A(kN/m^3)$	25	25
$E_{mod}(GPa)$	30	30
Kalınlık (m)	0.8	0.25
Boyut (m)	40x40	-
Poisson	0.2	0.2

Zaman tanım alanında yapılan analizler için kullanılacak deprem kaydı tek yönlü olarak (x yönünde) uygulanmış olup, bilgileri Tablo 6.4’de verilmiştir.

Tablo 6.4 Gömme derinliği doğrulaması için kullanılan Deprem Kaydı bilgileri

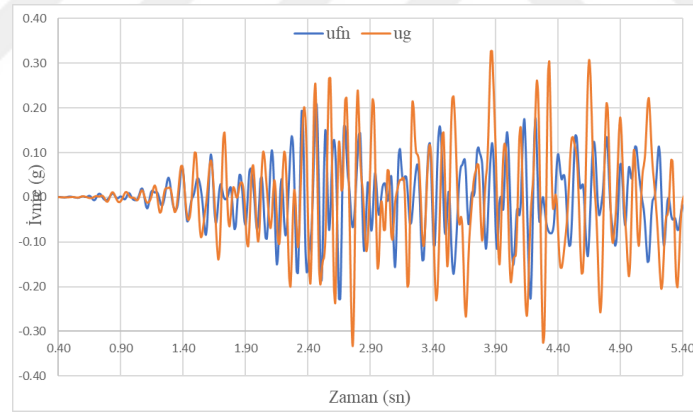
Deprem Kaydı	Kayıt No	Tarih	Manyitüd	Faya Uzaklık (km)	USGS Zemin Sınıfı	PGA (g)
Northridge	P0885	17.10.1994	6.7	26.8	A	0.217

**Şekil 6-11 Northridge P0885 Deprem Kaydı**



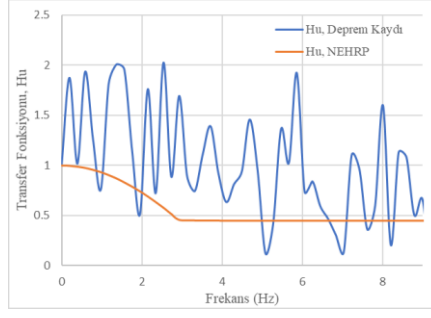
Şekil 6-12 Gömme derinliği doğrulama analizleri için oluşturulan model

H_u hesabında kullanılan açısal frekans ω değerinin hesabı için zemin doğal periyodu ($T=1.44$) kullanılmış ve yapılan analizler sonucunda ulaşılan değerler Şekil 6-13’de verilmiştir.



Şekil 6-13 Temel ivmesi (u_{fn}) ve Yer ivmesi (u_g) karşılaştırması

H_u karşılaştırma hesapları için kullanılan nümerik analizler sonucunda elde edilen ivme-zaman çıktı oranları, Fourier dönüşümüyle frekans-tanım alanına dönüştürülerek grafik haline getirilmiştir. (Şekil 6-14)

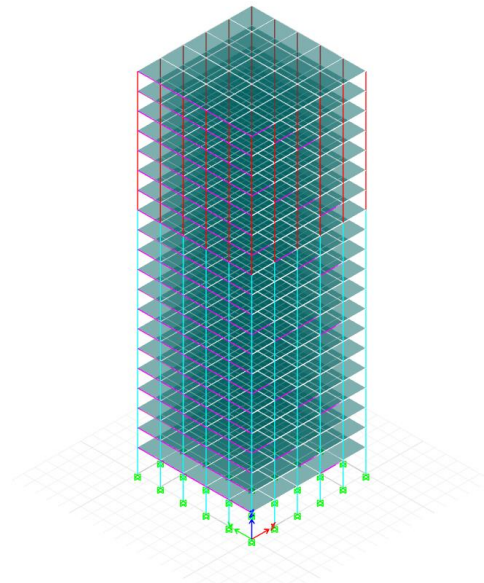


Şekil 6-14 Analiz sonucu oluşan Hu ve NEHRP sonuçlarının karşılaştırması

Şekil 6-14'de görüleceği üzere veri çok dağınık ve uyumlu olmasa da genel eğilimin yakalandığı ve bunun doğrulama adına bir benzerlik olduğu varsayılmıştır. Doğrulama amacıyla yapılan bu çalışma, NEHRP'te de belirtildiği üzere (NEHRP, 8.3.2.) kinematik etkileşim analizleri adına daha doğru istatistiksel çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Literatürde analitik modeller belirli bir eğilimi yansıtsa da halen ileri çalışmaların gerekliliğine ihtiyaç duymaktadır.

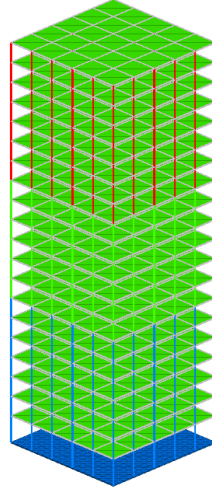
6.4. Yapısal Elemanların Doğrulama Analizleri

Tez konusu kapsamında yapılacak çalışmalarda kullanılan yazılımla (Flac 3D) oluşturulan yapısal eleman modellemelerinin doğrulamasını yapmak amacıyla ETABS programında, tez için oluşturulan ve detaylarının 7. Bölümde verileceği, modelin bütün boyut, malzeme ve modelleme özellikleri dikkate alınarak modellenmiştir. (Şekil 6-15)



Şekil 6-15 Yapının ETABS Modeli

Analizlerde kullanılan yapısal modeli zeminden ortamından yalıtıp tek başına modelleyebilmek amacıyla histeretik model zemin ortamı kaldırılmıştır. Zaman-Tanım alanında Flac3D’de yalnızca yapısal model dinamik analizi için ve altına da deprem ivmesini uygulayabilmek amacıyla temelde 0.4 m kalınlığında solid eleman ve onun hemen üstüne de 0.4 m kalınlığında Shell eleman modeli kullanılmıştır. Deprem ivmesi solid elemanların alt kotundan etki ettirilmiştir (Şekil 6-16)



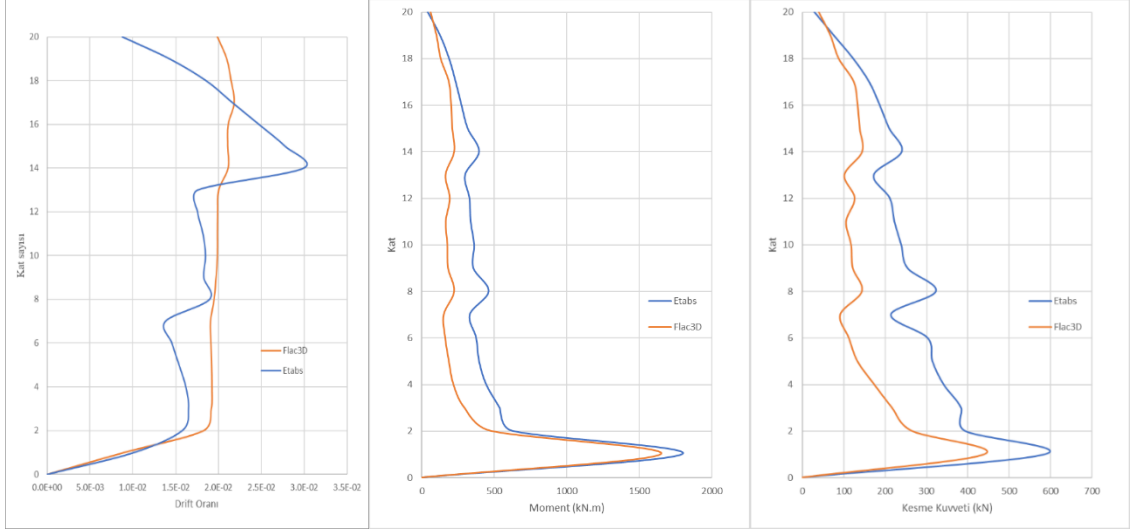
Şekil 6-16 Yapı Flac3D Modeli

ETABS ve Flac3D’de modellenen, tez kapsamında yapılacak analizlerde de kullanılan yapısal elemanların boyut ve malzeme özellikleri Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.5 Doğrulama Analizleri Üst Yapı ve Temel Model Parametreleri

	Döşeme	Kolon	Kiriş	Temel
$B.H.A(kN/m^3)$	25	25	25	25
$E_{mod}(GPa)$	30	30	30	30
$Kalınlık(m)$	0.13	-	-	0.8
$Boyut$	-	Değişken	25x60 cm	20x20 m
$Poisson, \nu$	0.2	0.2	0.2	0.2

Yapılan analizler sonucunda, katlar boyunca sapma oranları (*story drift ratio*) momentler ve kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Kat sapma oranları katların orta noktalarındaki deplasmanlar dikkate alınarak, Moment ve Kesme Kuvvetleri ise köşe kolonlarda oluşan maksimum momentler alınarak karşılaştırılmıştır. Grafiklerden de görüleceği üzere yakın mertebelerde sonuçların elde edildiği görülmektedir. (Şekil 6-17)



Şekil 6-17 ETABS ve Flac3D Sapma oranı, Moment ve Kesme Kuvveti karşılaştırılması

Analizler çıktılarıyla oluşturulan grafikler incelendiğinde (Şekil 6-17) sonuçların birbirine yakınsadığı fakat yine de farklılıkların olduğu gözükmemektedir. Bu farklılıkların olası nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

- ETABS ivmelerden kaynaklanan yükleri, uzamsal yük vektörü (*spatial load vector*) vasıtasıyla bütün eleman ve düğüm noktalarına aynı anda etki ettirdikten sonra bütün rijitlik matrisini çözümlüyor ve lokal olarak çözülen yükler global koordinat sistemine aktarılıyor (*implicit*). FLAC3D ise yapılan dinamik yüklemenin bulunduğu yerden, çevresindeki bölgelerin özkütlelerinden elde edilen toplu ağırlık kütlelerini (*lumped gridpoint masses*) kullanarak bütün hareket denklemlerini çözmek için sonlu hacim şemasını (*explicit*) kullanmaktadır (*Flac3D Manual*).
- ETABS'te kolon ve kirişlerin birleştiği düğüm noktaları rijit bölge olarak kabul eder. Bu yüzden elemanların rijitlikleri hesaplanırken aksan aksa değil kolon yüzeyinden diğer kolon yüzeyine mesafe (L) dikkate alınır. Böylelikle daha yüksek kesme kuvveti ve momentler oluşmaktadır.
- ETABS bina modellerinde bütün bir kat tek bir rijit diyaframa indirgenerek çözülüyor. Bu nedenle bütün katların hepsi aynı anda dönmeye eğiliminde oluyor. FLAC3D ise bu diğer bütün sistemi nasıl çözüyorsa kolon-kiriş elemanlarını da aynı metodla çözüme ulaştırıyor. (*Explicit Lagrangian solution procedure*).

Bu nedenlerden ötürü sonuçlarda farklılıklar beklenmekte fakat genel davranış benzemekte ve 2 yazılım çıktısının değerleri birbirine yakın bulunmaktadır.

7. NÜMERİK ANALİZLER

Yapı-Kazık-Zemin etkileşiminin yapısal tasarım üzerindeki etkisinin önemi önceki bölümlerde tartışılmış, 3B sonlu elemanlar/farklar yöntemleriyle yapılan analiz sonuçları ve deney sonuçları referans gösterilerek dayanaklandırılmıştır. Bu tez kapsamında, önceki bölümlerde de bahsedilen Ortak Yöntem ve Altsistem yöntemlerine uygun olarak hazırlanan 3 boyutlu modeller, Flac 3D yazılımı kullanılarak, deprem ivmesi çift yönlü olarak (x, y) etkilip analizler gerçekleştirilmiştir. Modelleme ile alakalı olarak kullanılan/seçilen parametrelerin detayları aşağıdaki altbaşlıklarda incelenecek olup; analiz çıktıları, çeşitli senaryoların kazık iç kuvvetleri üzerindeki etkisinin tartışılması olarak kullanılacaktır.

Sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi için Flac3D (*Fast Lagrangian Analysis in Continua*) nümerik modelleme yazılımı tercih edilmiştir. Yapısal elemanlar ve zemin modellemesinin hem geometrik hem de malzeme modeli açısından çok esnek ve güçlü altyapısının olması, sınır koşullarının dinamik analizlerdeki karşılaşılan dalga yayılımı sorunlarına çözüm getirmesi, kazık modelinin doğrusalsız (nonlinear) olarak yapılabilmesi, 3 Boyutlu modelleri hızlı ve stabil bir şekilde çözmesi, analiz sonrası çıktıların kodlama aşamasında belirlenerek hem bilgisayarın hafızasını fazla kullanmaması hem de işlem hızını artırması olarak sıralanabilir.

Aşağıdaki alt bölümlerde analizlerin gerçekleştirilmesi için gerekli modellerin oluşturulma mantığı incelenecek ve açıklanacaktır.

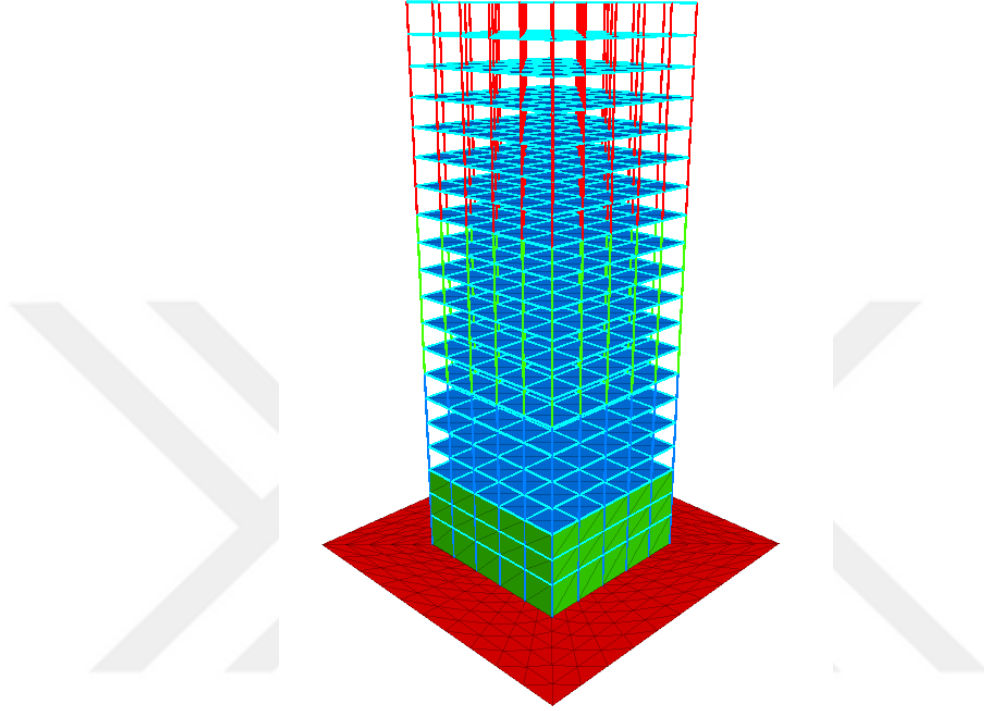
7.1. Üst Yapı

Ortak yöntemle yapılacak analizlerin modelinde, YKZE'nin etkisinin araştırılması açısından yüksek yapı (BYS=2) tercih edilmiştir. Modellerde kullanılan yapısal elemanların boyutları ve parametrik özellikleri Tablo 7.1'de verilmiştir, kullanılan sonlu elemanları

Tablo 7.1 Üst Yapı ve Temel Model Parametreleri

	Döşeme	Kolon	Kiriş	Temel	Duvar
<i>B.H.A(kN/m³)</i>	25	25	25	25	25
<i>E_{mod}(GPa)</i>	30	30	30	30	30
<i>Kalınlık (m)</i>	0.13	-	-	0.8	0.25
<i>Boyut</i>	-	Değişken	25x60cm	40x40m	-
<i>Poisson, ν</i>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Temel boyutları, Kule yapısının izdüşümünden (20x20m) daha geniş (40x40m) seçilmiştir. Bunun nedeni, yüksek yapılarda ana kule yapısının genellikle otopark sebebiyle temelının daha geniş olması ve dahi bodrumlu olmasından dolayı kule etrafında etkileşecek zemin bulunmamasının dikkate alınmasının gerekliliğidir.



Şekil 7-1 Üstyapı Modeli

Kat yükseklikleri bütün katlar (sadece ilk kat $H=4\text{m}$ olmak üzere) $H=3\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Kolon boyutları ilk 1-7. katta $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}$, 8-13. Katta $0.4\text{m}\times 0.4\text{m}$, 14-20. Katta ise $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$ olarak boyutlandırılmıştır. Gömme derinliğinin (3-6-9-12-15 m) etkisinin dinamik analizler sonucunda kazıklarda etkisinin incelendiği durumlar için DKT-CSTH shell elemanlarla zemin yüzeylerine 0.25 m kalınlığında duvar tanımlanmıştır.

Her yapısal elemanın yapısal tepkisi, düğümler vasıtasıyla çevre sistemine sağladığı rijitlik ile tanımlanır. Her yapısal elemanın, sonlu eleman teknikleri kullanılarak oluşturulan bir rijitlik matrisi vardır. Rijitlik matrisi $[\mathbf{k}]$, genelleştirilmiş düğüm yer değiştirmelerini (ötelemeler ve dönmeler) $\{\mathbf{d}\}$ genelleştirilmiş düğüm kuvvetlerini $\{\mathbf{F}\}$ (kuvvetler ve momentler), $\{\mathbf{F}\} = [\mathbf{k}] \{\mathbf{d}\}$ bağıntısı ile ilişkilendirir. Burada $[\mathbf{k}]$, sonlu elemanla ilişkili serbestlik derecesi sayısına eşit boyutta kare simetrik bir matristir.

ETABS yazılımında Üstyapının modellemesi, Flac3D'deki model parametreleriyle analiz edilmiş ve çeşitli modlardaki periyot ve frekansları elde edilmiştir. (Tablo 7.2)

Tablo 7.2 ETABS yazılımıyla yapılan analiz sonuçları

Durum	Mod	Periyot sn	Frekans cye/sec	Açısal frekans rad/sec	Eigendeğeri rad ² /sec ²
Modal	1	2,45	0,408	2,5645	6,5766
Modal	2	2,448	0,408	2,5664	6,5863
Modal	3	2,131	0,469	2,9479	8,6899
Modal	4	0,925	1,081	6,7934	46,1497
Modal	5	0,924	1,082	6,8002	46,2421
Modal	6	0,818	1,223	7,6831	59,0298
Modal	7	0,528	1,894	11,8982	141,5678
Modal	8	0,528	1,896	11,9104	141,8571
Modal	9	0,47	2,127	13,3633	178,5788
Modal	10	0,391	2,557	16,0679	258,177
Modal	11	0,391	2,561	16,0882	258,8303
Modal	12	0,349	2,863	17,9883	323,5773
Modal	13	0,296	3,377	21,2211	450,3337
Modal	14	0,296	3,38	21,2385	451,0742
Modal	15	0,265	3,77	23,6875	561,097
Modal	16	0,242	4,127	25,9326	672,4993
Modal	17	0,242	4,131	25,9587	673,8526
Modal	18	0,217	4,6	28,9057	835,5423
Modal	19	0,203	4,93	30,9787	959,6819
Modal	20	0,203	4,933	30,9956	960,7283
Modal	21	0,182	5,491	34,5028	1190,4437

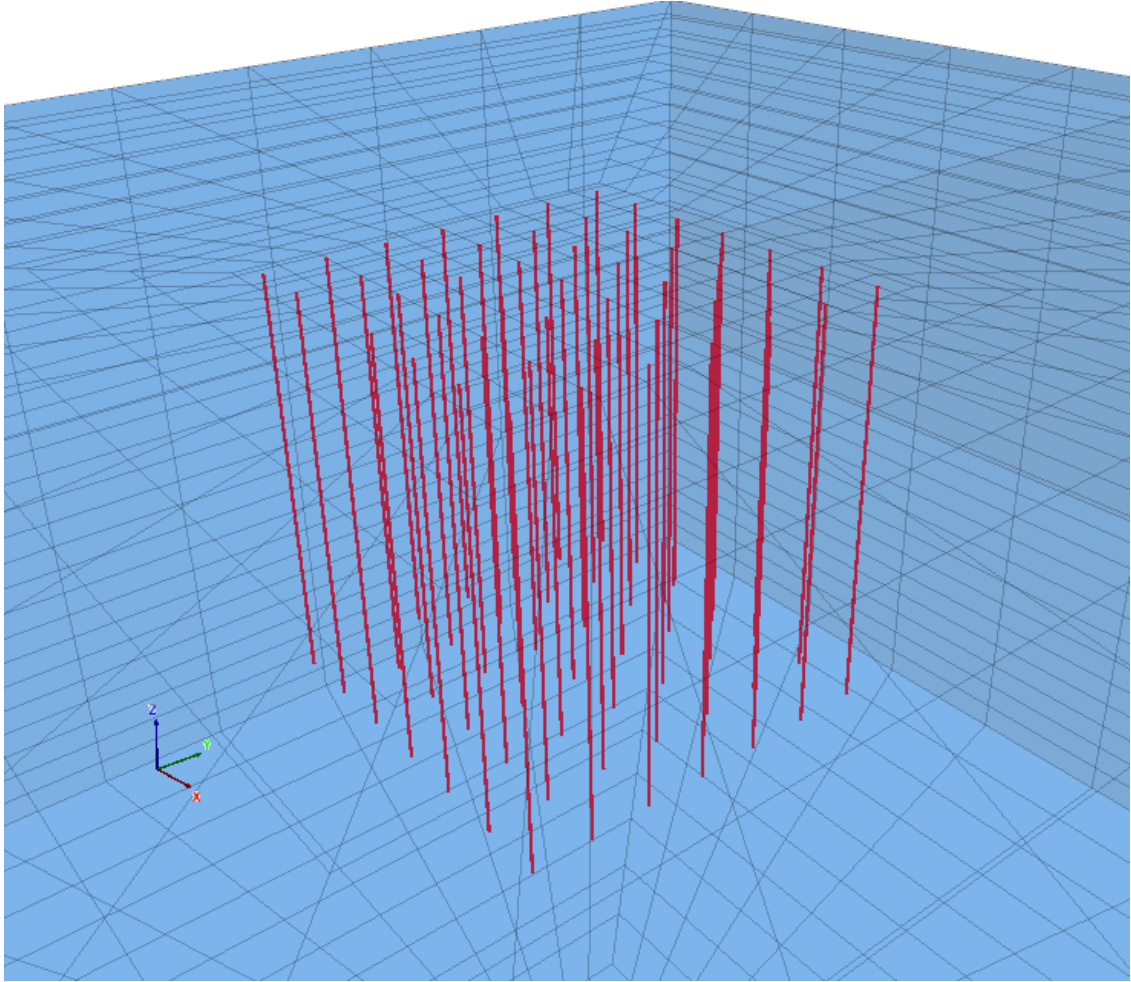
Bu tez kapsamında Üst Yapı modellemesinde, kolon ve kirişler için BeamSel elemanları, döşemeler için DKT-CST Hibrid kabuk elemanları, Temel ve duvar modelleri için kabuk DKT-CST kabuk elemanlar, kazıklar için de pileSel kiriş elemanları kullanılmıştır. Bu elemanların detayları altbölümlerde incelenecektir.

7.2. Kazık Modellemesi

Kazıklar için ek olarak plastik moment kapasitesi (M_p) belirlenebilse de bu tez kapsamında temelaltı kazıklarının davranışları incelendiği ve içsel kuvvetlerin ulaşabileceği mertebeler incelendiği için herhangi bir değer atanmamıştır. Kazığın dinamik davranışı incelenirken, kazığın hareketi esnasında etrafında oluşacak boşluk (gap) dikkate alınmamıştır.

Kazıkların temelle bağlantısı, uygulamada da birbirlerine bağlı olduğu varsayılarak rijit link kullanılarak yapılmıştır.

Bu tez kapsamındaki analizlerde kullanılacak modelin grafiksel görünümü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 7-2). Analizlerde kullanılan kazık özellikleri; çap $D=0.8$ m, Boy $H=20$ m aralıklar $s=3$ m karelaıyla 49 adet olmak üzere 20×20 m boyutlarındaki temel altına yerleştirilmiştir.



Şekil 7-2 Analizlerde kullanılan Kazık-Temel Modeli

Kazık arayüzey parametreleri API (Amerikan Petrol Enstitüsü) tarafından hazırlanan ve Matlock'un (1970) p - y eğrilerinin geliştirilmiş formülleri kullanılmıştır.

Tablo 7.3'te verilen arayüzey parametrelerinin hesaplamaları için gerekli olan drenajsız parametreler, V_s değerlerine orantılı olarak seçilmiştir.

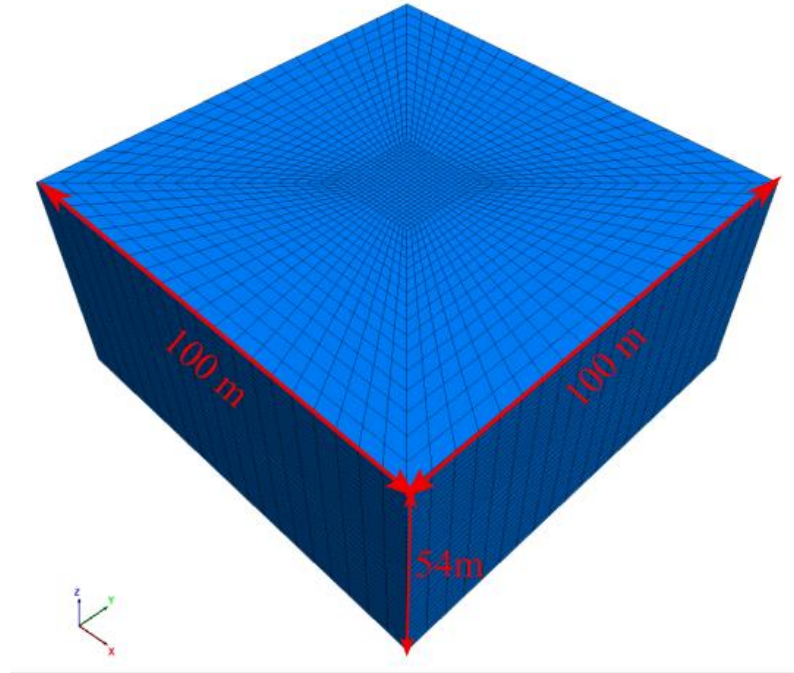
Tablo 7.3 Kazıkların Özellikleri ve Arayüzey Parametreleri

	Vs 200	Vs250	Vs350	Vs450
s_u	75	160	240	300
k_t (N/m ³)	1.54E+07	4.61E+07	8.64E+07	1.08E+08
k_n (N/m ³)	1.54E+07	4.61E+07	8.64E+07	1.08E+08
cs_nCoh (kPa)	1	3	5	7
cs_sCoh (kPa)	1	3	5	7
cs_nFric (°)	25	28	30	32
cs_sFric(°)	25	28	30	32

Her bir kazık 20 ayrı segmentten oluşturulmuş, içsel kuvvetler her zaman-adımı için kaydedilmiş, maksimum değerler her bir kazık için kaydedilmiştir.

7.3. Zemin Modellemesi

Zemin modeli, deprem etkisi altındaki döngüsel dinamik davranışı sergileyebilmesi açısından Bölüm 5.4.3'te anlatılan *sig3 histeretik model* ile oluşturulmuş ve bütün ızgara alanına atanmıştır. Bütün modellerde model genişliği, uzunluğu ve derinliği sırasıyla 100 m, 100 m, 54 m olacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 7-3 Zemin Modeli

Sig3 modeline altlık sağlayacak ve kayma modülü azalım eğrileri için gerekli olan başlangıç kayma modülleri (G_0) aşağıda verilen formüllerle hesaplanmıştır (Formül 6.1)

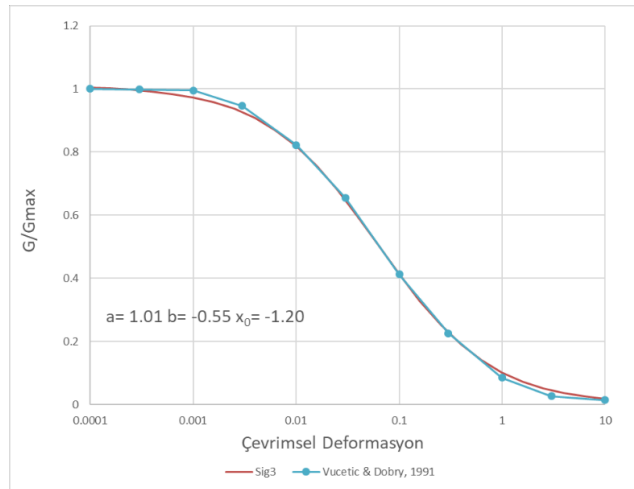
$$G_0 = \rho V_s^2 \quad \text{Formül 7.1}$$

Yukardaki formüle dayanılarak elde edilen kayma modülündeki kayma dalgası hızı terimi (V_s), Yapı-Kazık-Zemin etkileşiminin dikkate alınmasının gerekliliğinin bahsedildiği (TBDY, 2018) zemin sınıfları (ZC, ZD) gözönüne alınarak seçilmiştir.

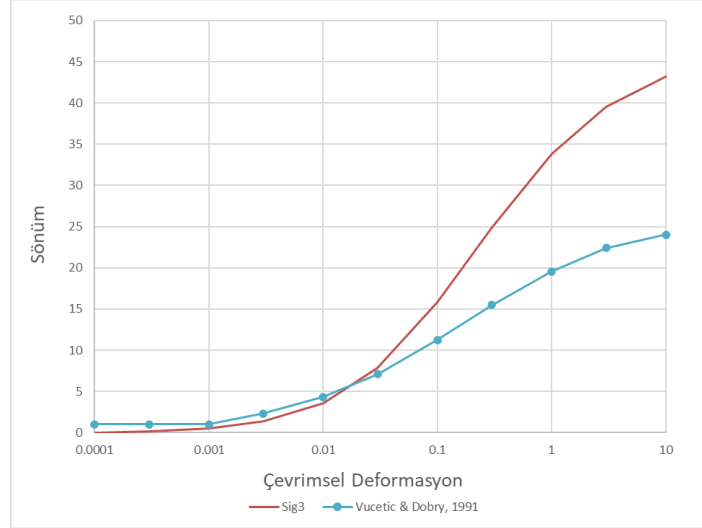
Tablo 7.4 Zemin Parametreleri

V_s	200	250	350	450
ρ (g/cm ³)	1.8	1.8	1.8	1.8
ν	0.4	0.4	0.4	0.4
E_0 (kPa)	201600	315000	617400	1020600
G (kPa)	72000	112500	220500	364500
K (kPa)	336000	525000	1029000	1701000
s_u (kPa)	75	160	240	300

Bu tez kapsamında Plastisite indisi, $I_p=15$ için G/G_{max} eğrileri, Vucetic ve Dobry (1991)'nin önerdiği eğrilere benzeştirilerek çizilmiştir. *Flac3D* içindeki kodlar (SeveralCyclicStrainLevels) kullanılarak sönüm oranları her bir gerinim değeri için hazırlanan model analiz edilip, sönüm değerleri hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekillerde, kullanılan zemin malzeme modüllerinin G/G_{max} - Çevrimsel Deformasyon eğrileri (Şekil 7-4) ve Sönüm – Çevrimsel Deformasyon eğrileri (Şekil 7-5) literatürle uyumu örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 7-4 $I_p=15$ için G/G_{max} eğrileri



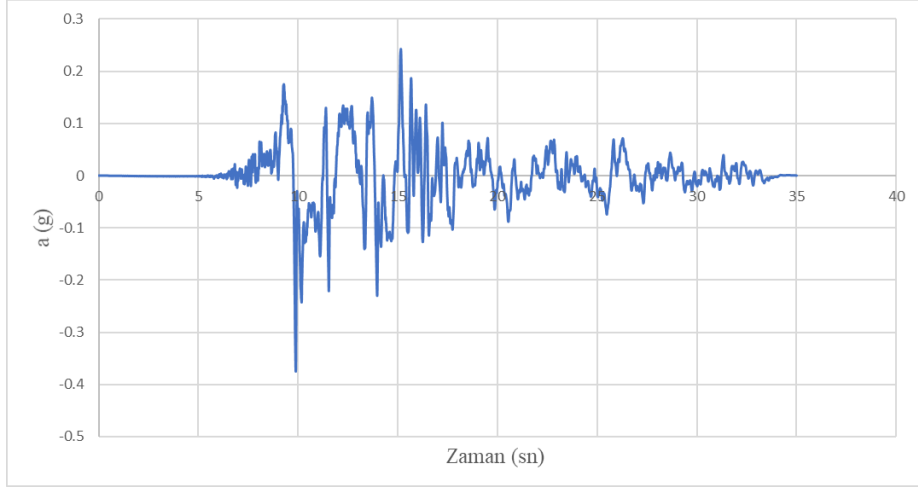
Şekil 7-5 $I_p=15$ için Sönüm Eğrileri

7.4. Deprem Kaydı

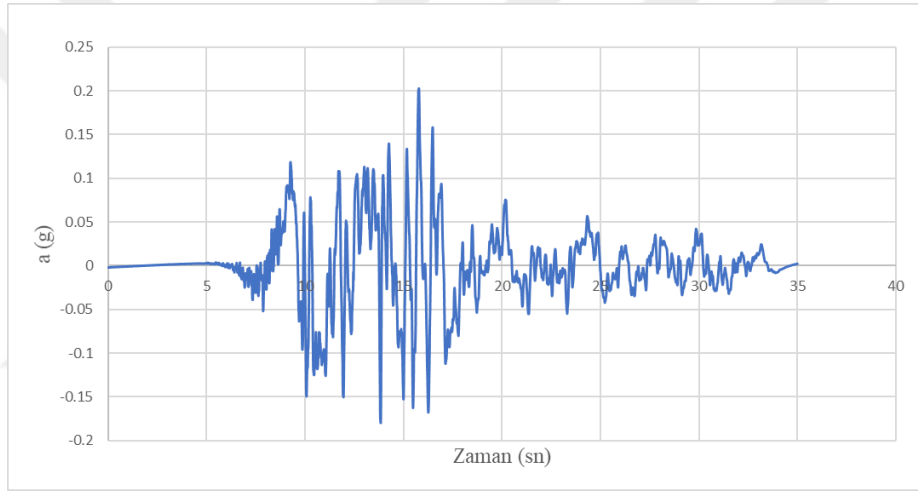
Yapı-Kazık-Zemin sisteminin dinamik yükler altındaki davranışının güçlü yer hareketi uygulanarak incelenebilmesi için PEER NGA veritabanından 17 Ağustos 1999 Koceli Depreminin Yarımca İstasyonundan alınan (Tablo 7.5) YPT_60 ve YPT_150 ivme kayıtlarının (RSN 1176) fay düzlemine paralel (YPT_FP) ve dik (YPT_FN) hale getirilmiş hali kullanılmıştır (Şekil 7-6, Şekil 7-7).

Tablo 7.5 17 Ağustos Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu Deprem Kaydı Özellikleri (RSN 1176)

Tp-Pulse Periyodu (sn)	4.949
Arias Yoğunluğu (m/s)	1.3
Depremin İsmi	"Kocaeli_Turkey"
Yıl	1999
İstasyon Adı	"Yarımca"
Manyitüd	7.51
Kırılma Mekanizması	Doğrultu Atımı
Rjb (km)	1.38
Rrup (km)	4.83
Vs30 (m/sec)	297



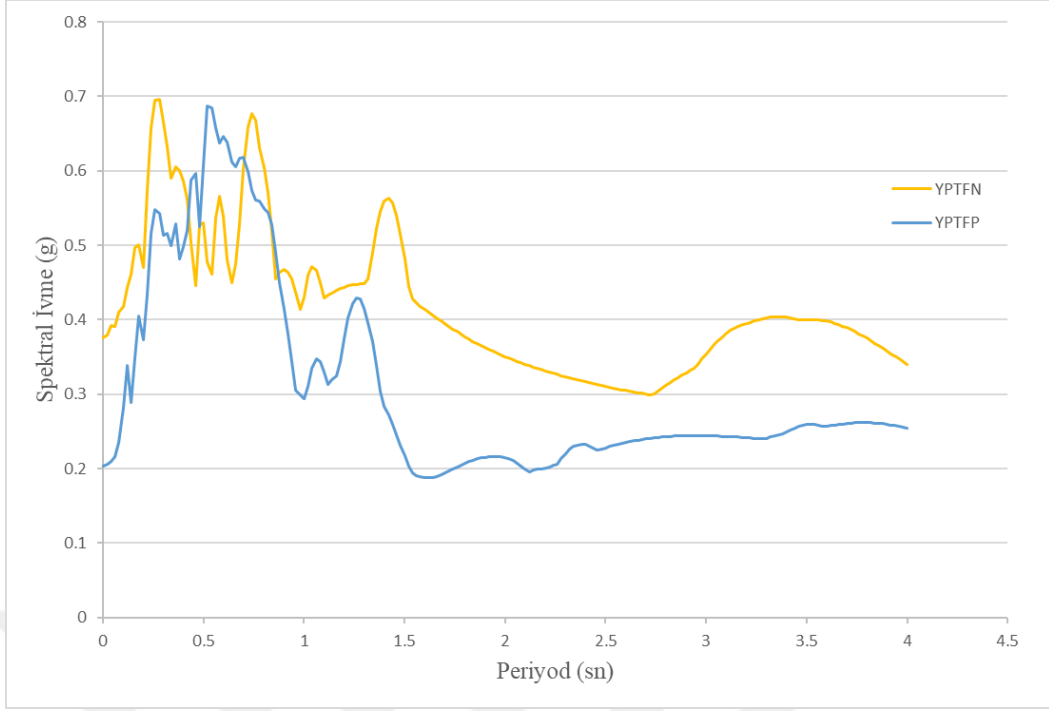
Şekil 7-6 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu YPT_FN İvme-Zaman Grafiği



Şekil 7-7 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu YPT_FP İvme-Zaman Grafiği

Seçilen depremler analizlerde çift yönlü ve eşzamanlı olarak etki ettirilmiştir. Model tabanından etki ettirilen deprem ivmeleri, tabanda sınır koşulu olarak Sessiz Sınır (*Quiet Boundary*) kullanılmasından dolayı ‘gerilme sınırı’na çevrilerek kullanılmıştır. Bu deprem kaydının seçilmesinin sebebi hem bütün periyodları etkilemesi hem de enerjisi yüksek olması dolayısıyladır.

Analizlerde yer hareketinin ivme genliğinin etkisini incelemek amacıyla çalışma kapsamında kullanılan ivme değerleri 0.2-0.4-0.6-0.8 katsayılarıyla ölçeklendirilerek sistemdeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 7-8 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Yarımca İstasyonu YPT_FN/FP İvme Spektrum Grafiği

8. ANALİZ ÇIKTILARI

8.1. Zemin Modeli Parametreleri – Deprem İvmesi Çarpanı

Dinamik analizlerin çıktısı olarak, her bir modelde 49 adet olan kazık elemanlarda oluşan Moment ve Kesme Kuvvetlerinin aynı derinlikte bulunan Ortalama ve Maksimum değerlerinin grafikleri karşılaştırılmıştır. Her bir deprem ivmesi mertebesi için (0.2-0.4-0.6-0.8-1) bu değerler grafik olarak aşağıdaki bölümlerde paylaşılacaktır. Kayma dalgası hızı (V_s) değişiminin ve dolayısıyla zemin modeli parametrelerinin kazıklar üzerindeki etkilerinin araştırıldığı analizlerde gömme derinliğinin etkisinden arındırılması amacıyla modellerde temel seviyesi, modelin en üst yüzey seviyesi olarak belirlenmiştir.

$V_s=200$ m/s zemin parametrelerine sahip olan modellerde analiz ıraksamakta ve bundan ötürü kazık iç kuvvet değerleri çok yüksek çıkmaktadır ve bundan dolayı grafiklerde $V_s=200$ m/s için kazık ortalama-maksimum içsel kuvvetlerinin çıktıları grafiklerden çıkarılmıştır. Bu konu Sonuçlar kısmında tartışılacaktır.

Şekillerin altında kullanılan kısaltmalar:

- DİÇ = Deprem İvmesi Çarpanı
D_1 = Ortak Yöntemle yapılan DİÇ=1 olan analizler,
K_0.8 = Üstyapının bulunmadığı DİÇ=0.8 olan (Kinematik etkileşim) analizleri,
Emb_0.6 = Gömme derinliğinin etkisinin incelendiği, DİÇ 0.6 olan analizler olarak anılacaktır.

Aşağıdaki tablolarda, Üstyapının olduğu (D) ve olmadığı (K) durumlarda yapılan analizlerde zemin ortamının parametrik özelliklerinin ve DİÇ'nin değişimine bağlı olarak kazıklarda (49 adet) oluşan iç kuvvetlerin ortalamalarının maksimum değerlerinin oranları ($K/D*100$) yüzdesel olarak verilmiştir.

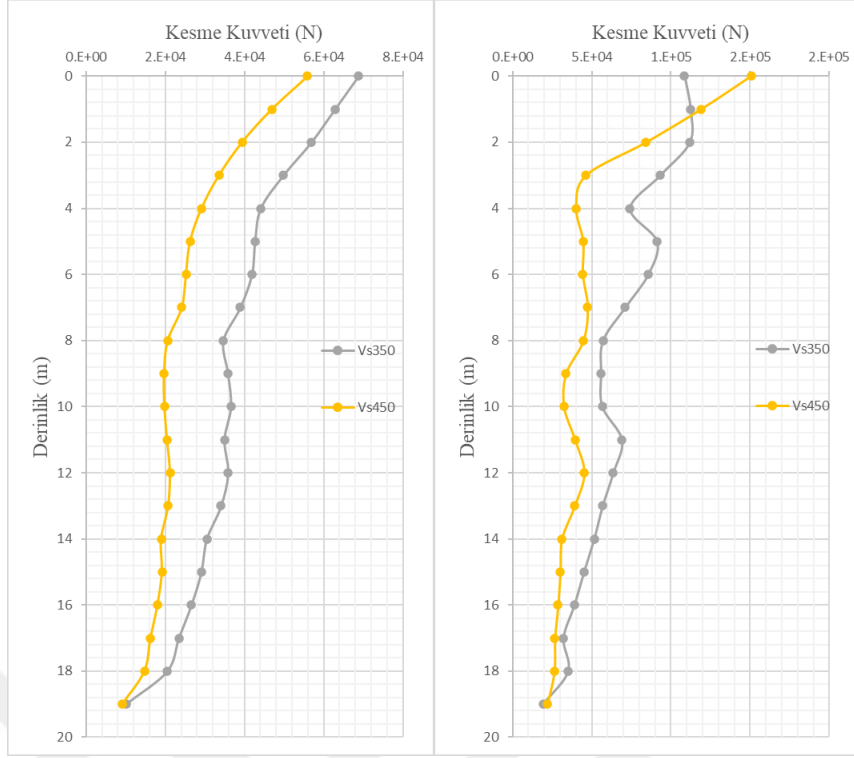
Tablo 8.1 DİÇ ve Zemin Özellikleri değişimine bağlı Kesme Kuvveti (F2) yüzdesel değişimi (%K/D)

DİÇ \ Zemin	Vs200	Vs250	Vs350	Vs450
0.2	20.98	54.21	48.45	52.54
0.4	77.66	33.97	54.56	48.02
0.6	146.83	71.89	48.24	47.56
0.8		106.39	69.84	47.89
1			79.82	70.63

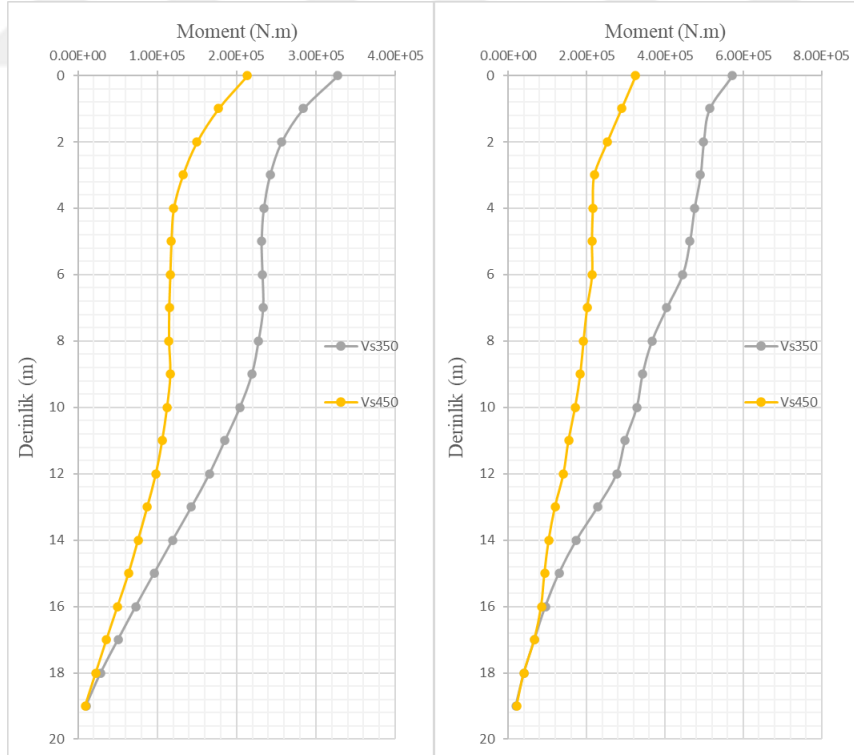
Tablo 8.2 DİÇ ve Zemin Özellikleri değişimine bağlı Moment (M3) yüzdesel değişimi (%K/D)

DİÇ \ Zemin	Vs200	Vs250	Vs350	Vs450
0.2	209.19	67.80	51.06	58.24
0.4	804.85	124.18	56.36	52.09
0.6	157.97	130.50	53.27	20.09
0.8	-	204.84	88.47	56.21
1	-	-	137.17	91.86

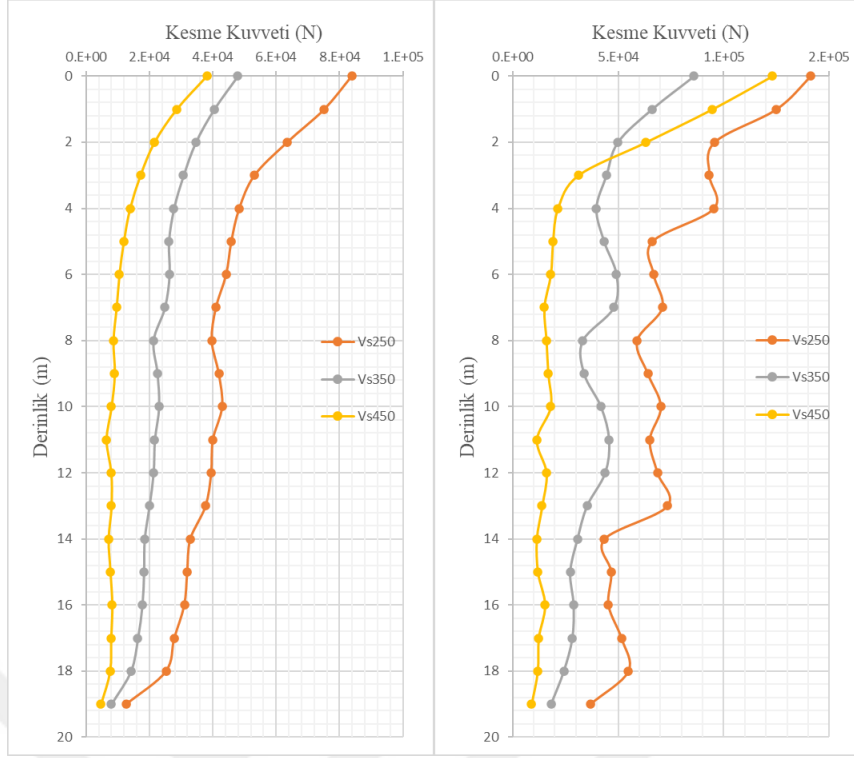




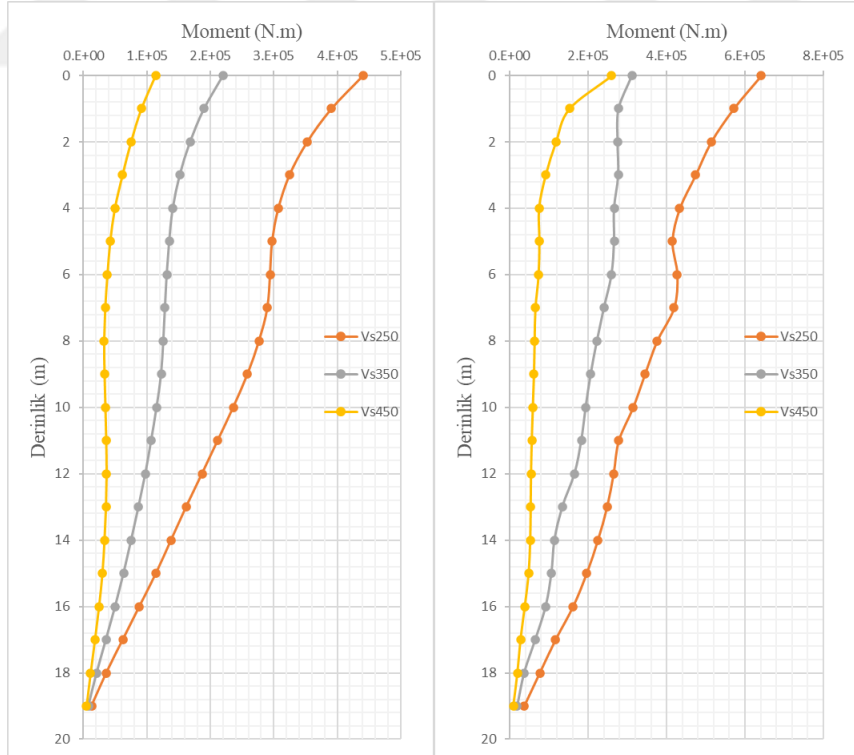
Şekil 8-1 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1)



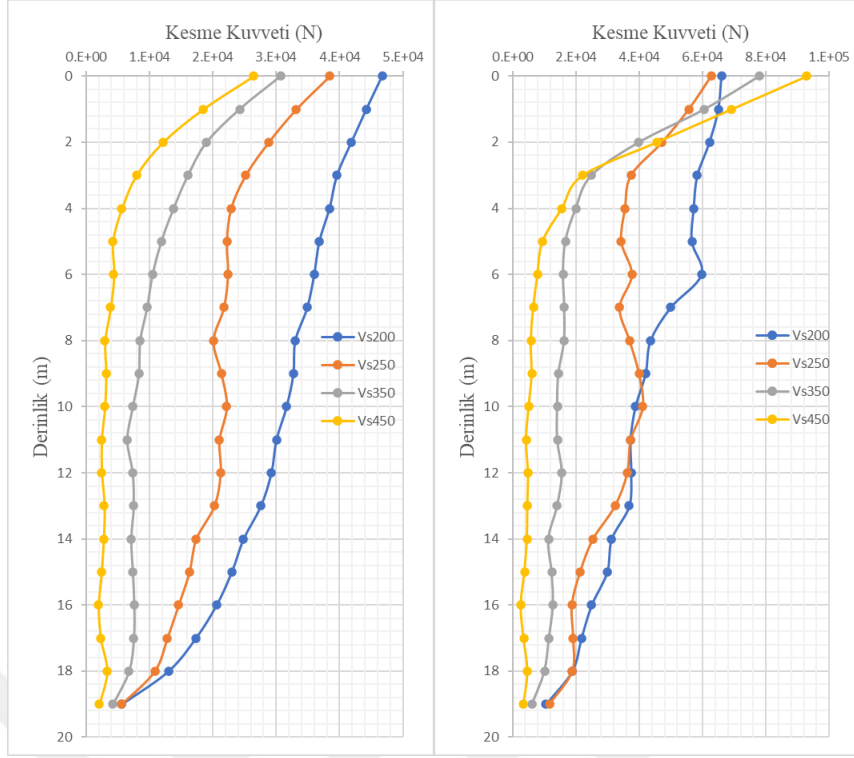
Şekil 8-2 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1)



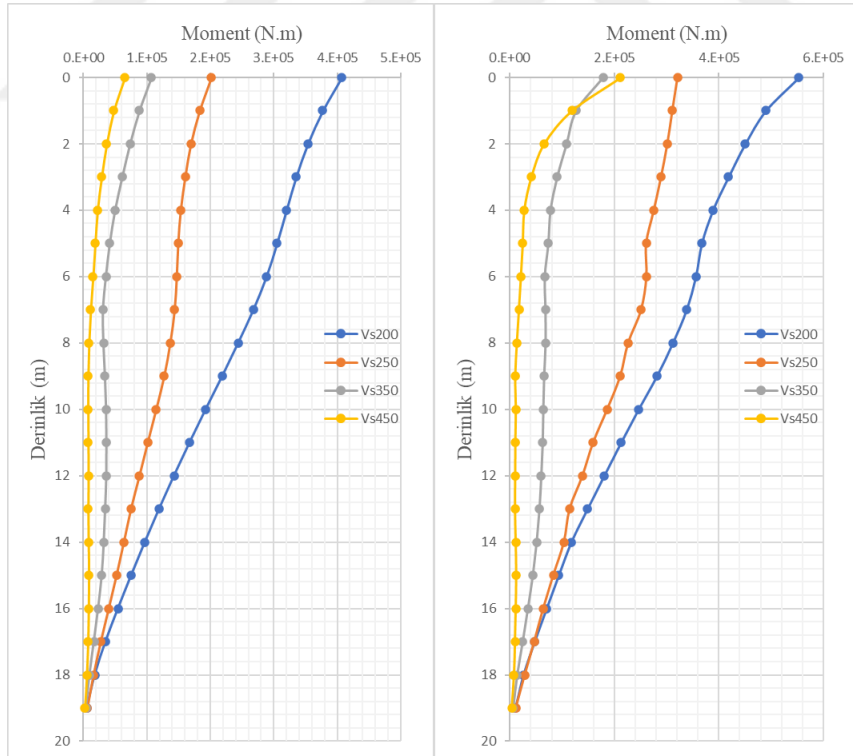
Şekil 8-3 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8)



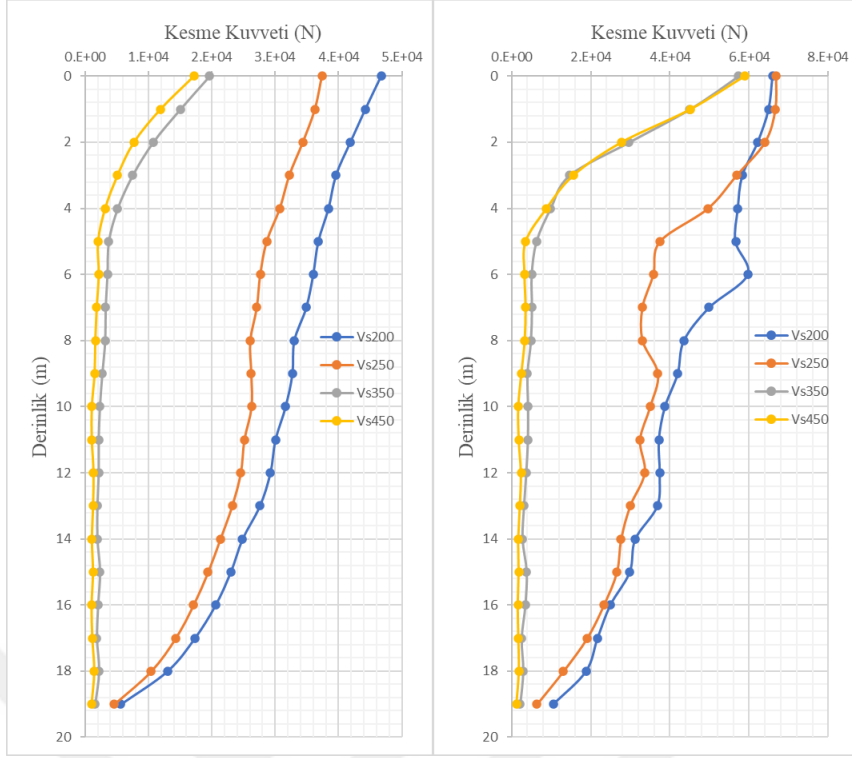
Şekil 8-4 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8)



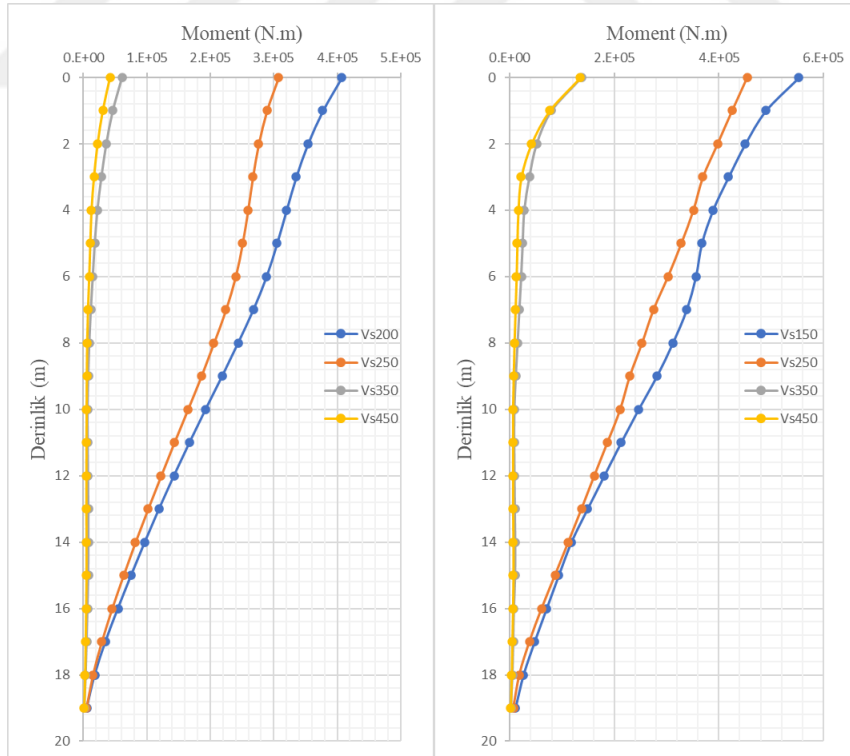
Şekil 8-5 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6)



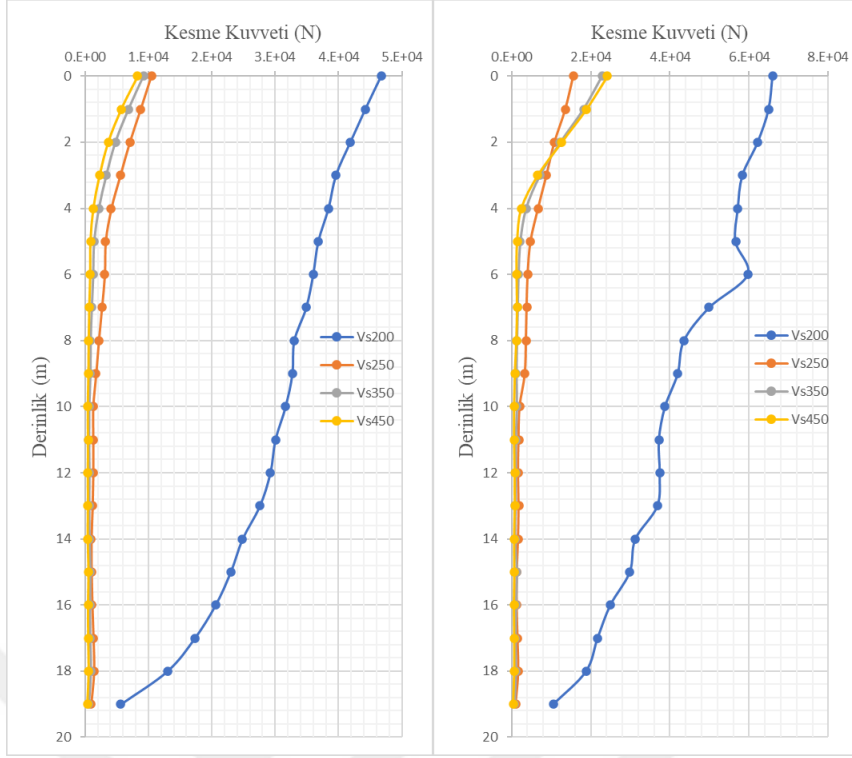
Şekil 8-6 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6)



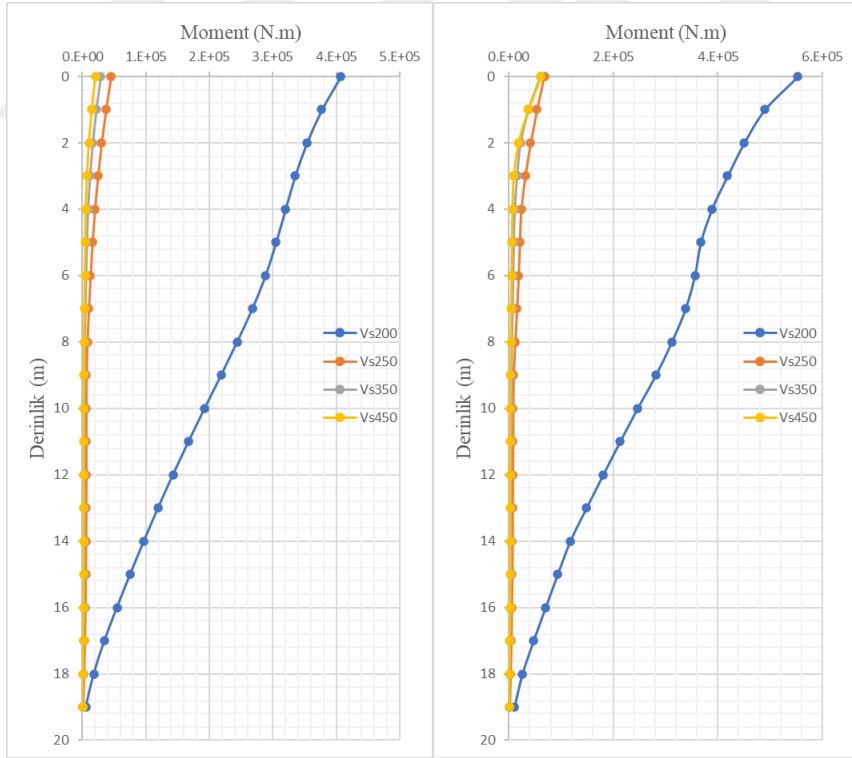
Şekil 8-7 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4)



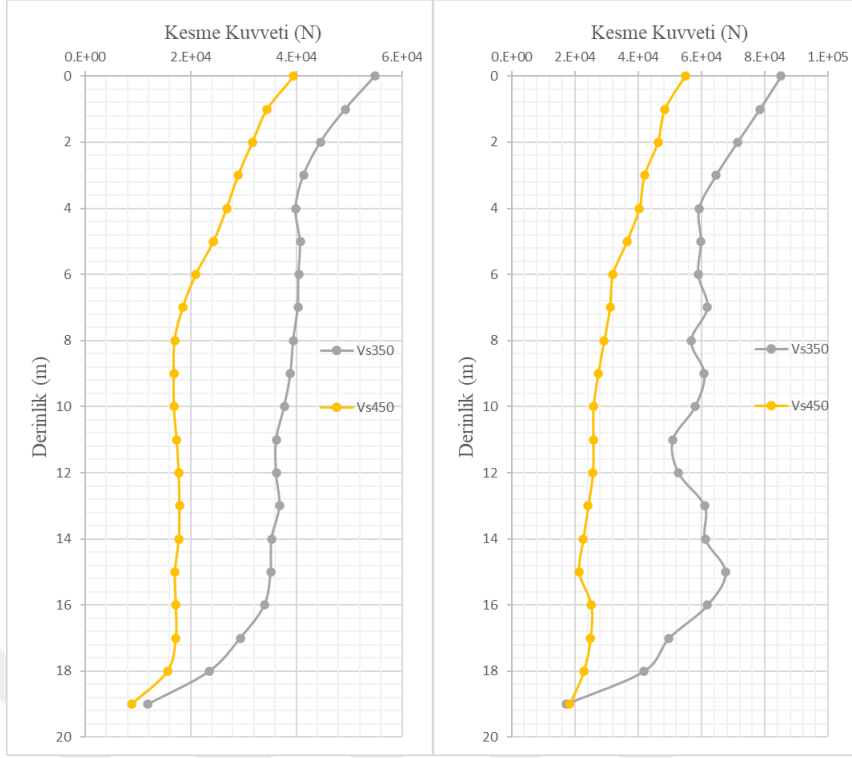
Şekil 8-8 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4)



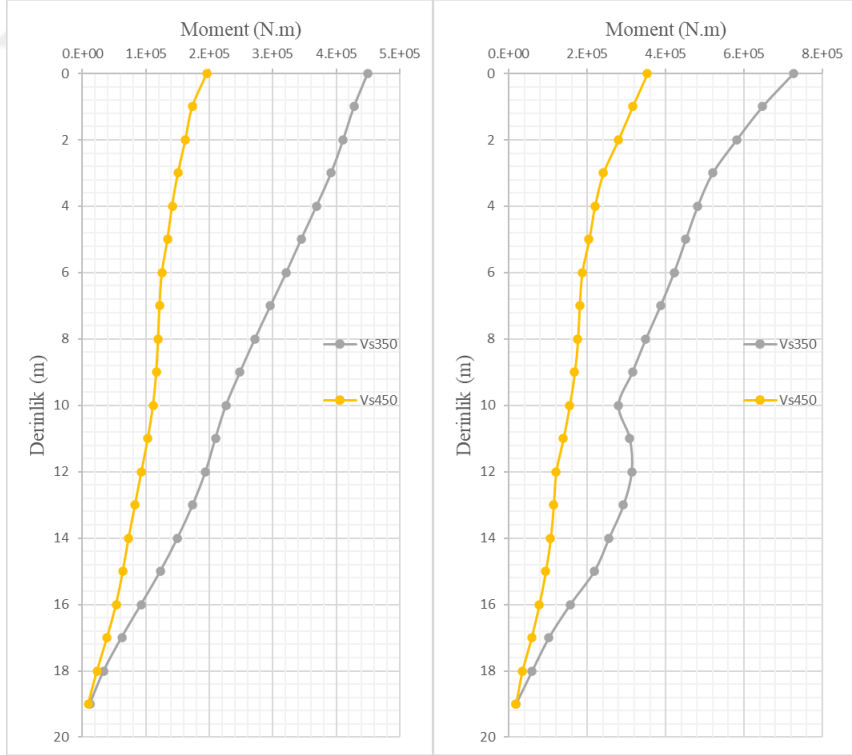
Şekil 8-9 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2)



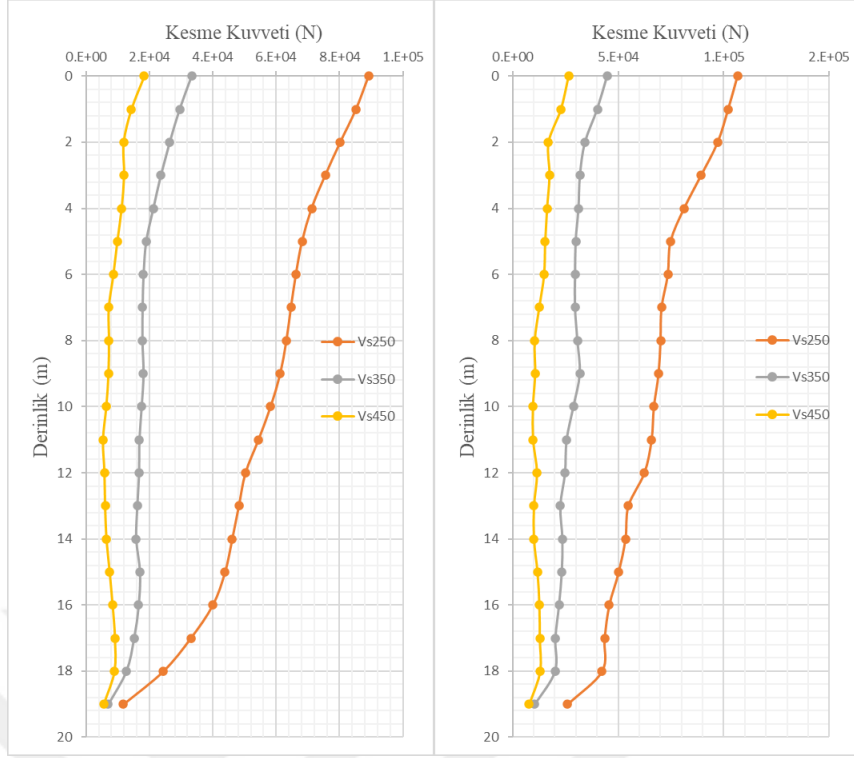
Şekil 8-10 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2)



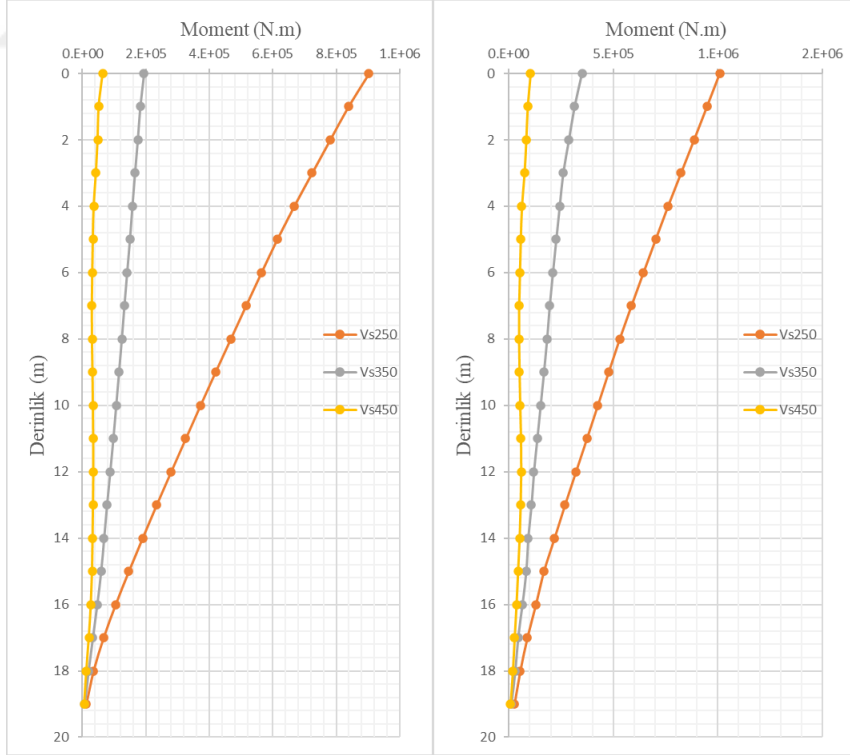
Şekil 8-11 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1)



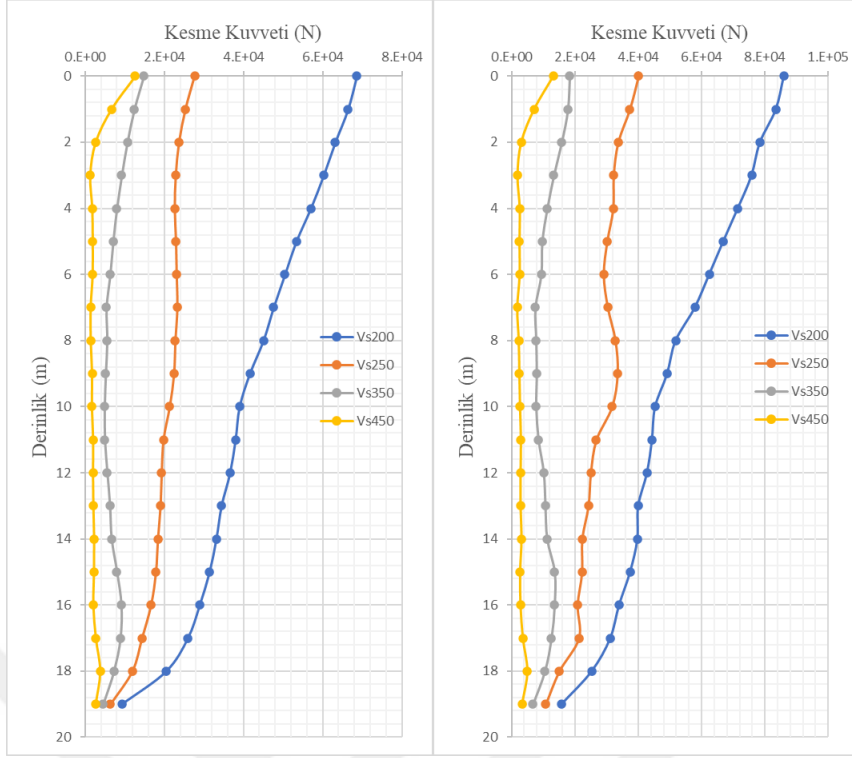
Şekil 8-12 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1)



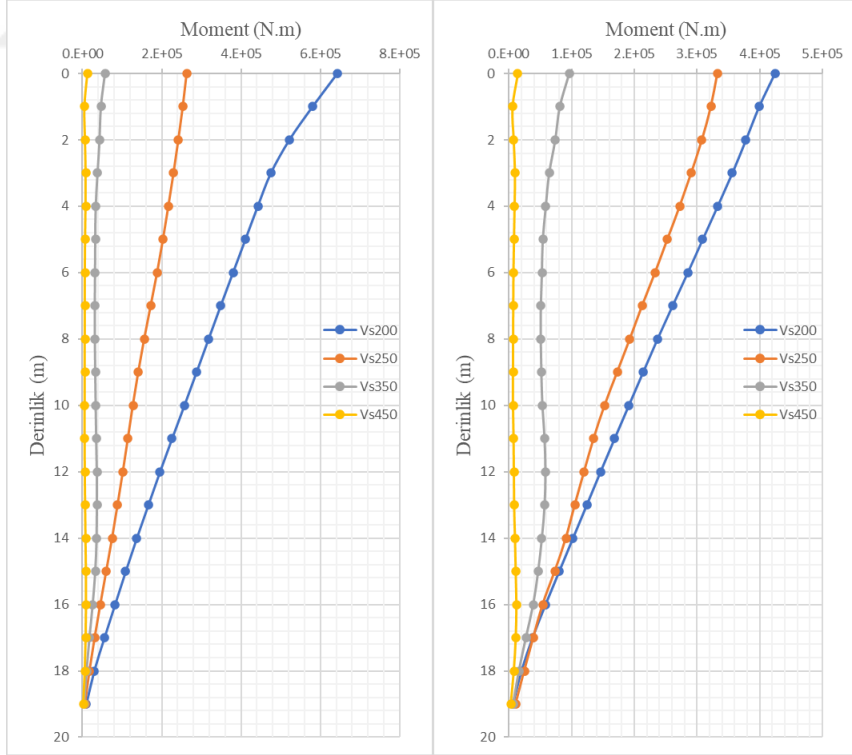
Şekil 8-13 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8)



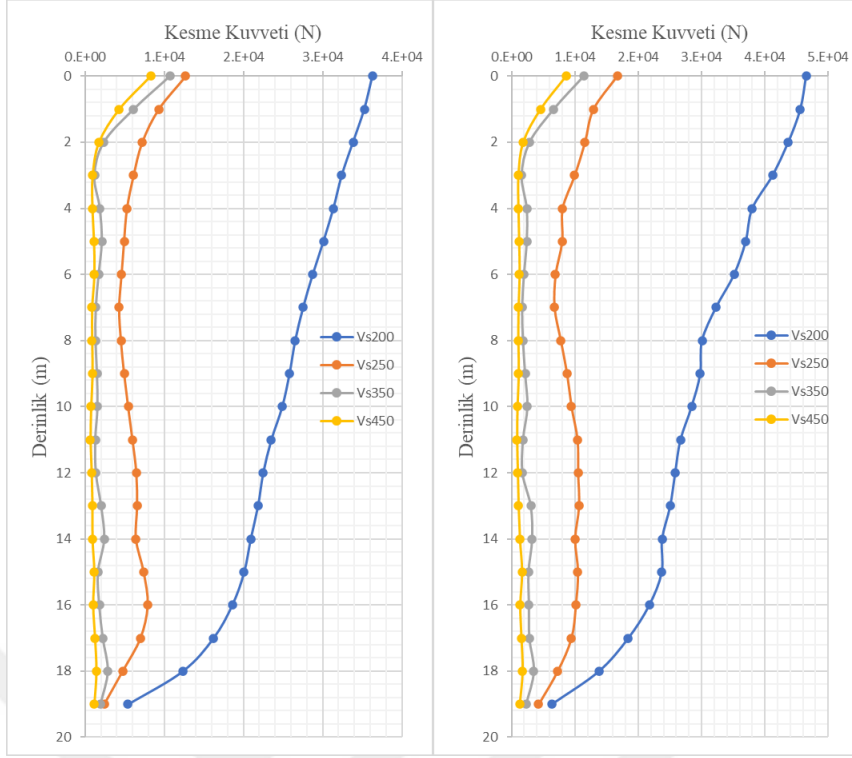
Şekil 8-14 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8)



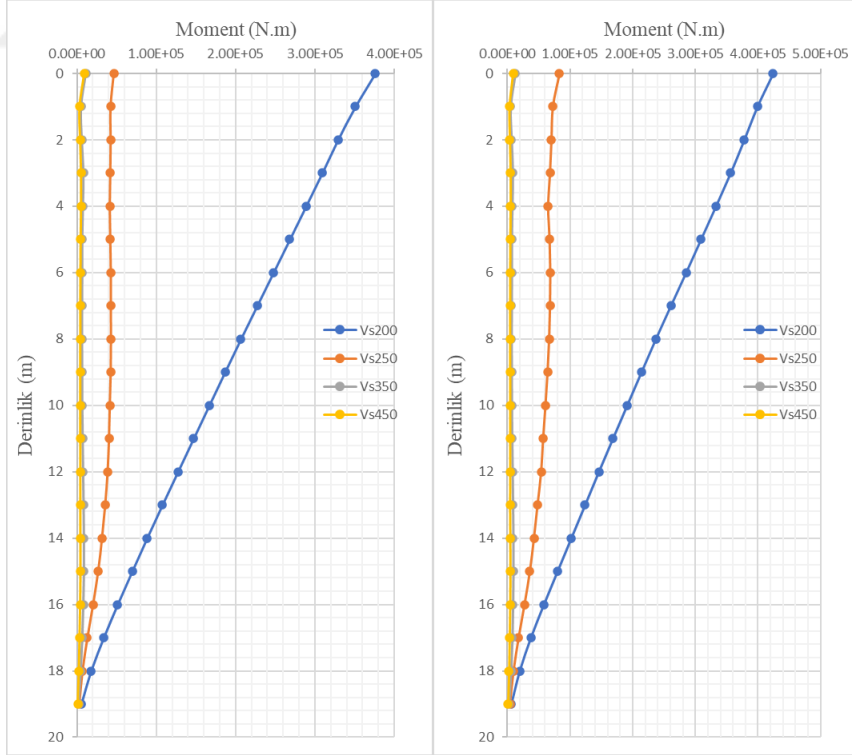
Şekil 8-15 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6)



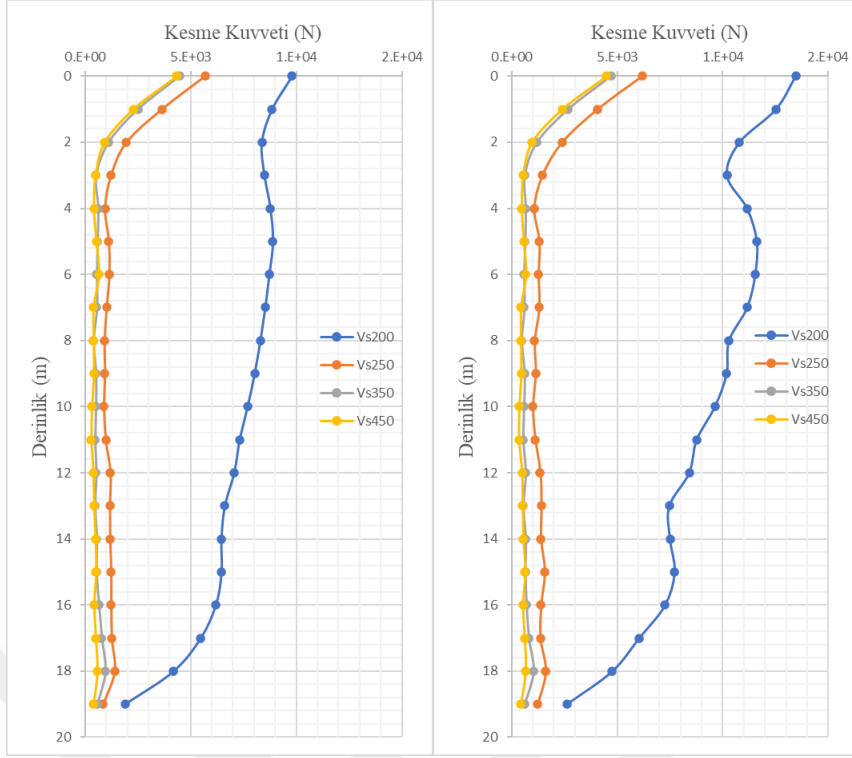
Şekil 8-16 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6)



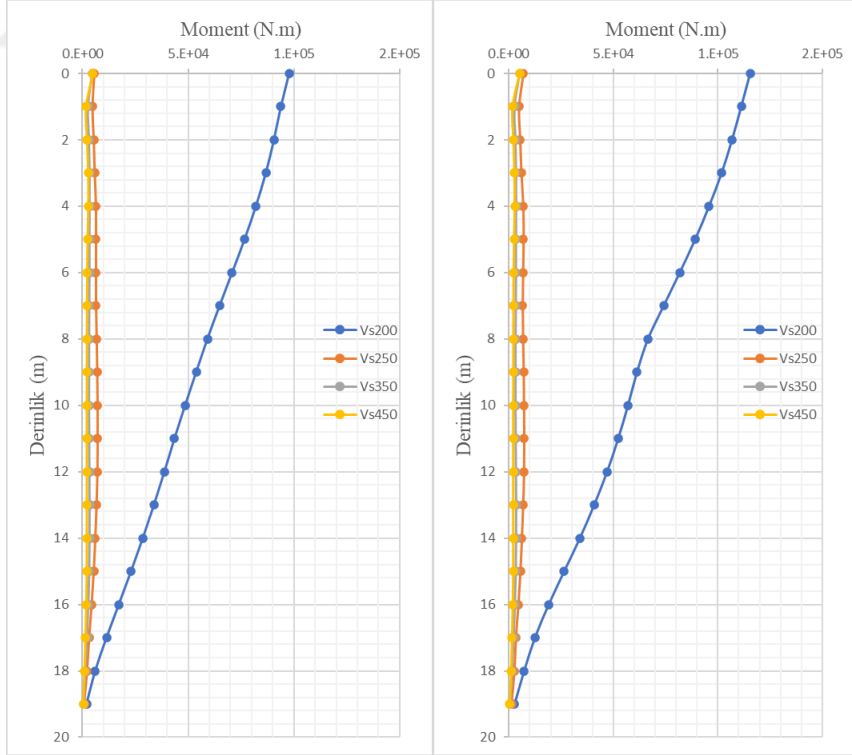
Şekil 8-17 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4)



Şekil 8-18 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4)



Şekil 8-19 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2)



Şekil 8-20 Kayma dalgasının değişimine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2)

8.2. Gömme Derinliği – Deprem İvmesi Çarpanı

Gömme derinliğinin değişiminin kazık grubu üzerindeki etkisini anlamak amacıyla çeşitli gömme derinlikleri (D_f) için (3-6-9-12-15 m) analizler yapılmıştır. Zemin özelliği olarak, Tablo 7.4’de verilen $V_s=200$ m/s’e ait zemin parametreleri kullanılmıştır. Analizler Bölüm 8.1’de olduğu gibi Ortak Yöntem ve Kinematik Etkileşim olmak üzere 2’ye ayrılmıştır. Bu analizler de kendi içlerinde, Deprem İvmesi Çarpanı ve Gömme Derinliğinin değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen dinamik analizlerin sonuçları aşağıda paylaşılmıştır.

Aşağıdaki tablolarda (Tablo 8-1, 8-4) her metre için bütün kazıklarda oluşan içsel kuvvetlerin ortalamasının yine normalize etmek amacıyla ortalaması alınmış ve tek nokta haline getirilmiştir.

Tablo 8.3 Gömme Derinliğine ve DİÇ’ye Bağlı Kazık Kesme Kuvveti (F2) Değişim Tablosu (Ortak Yöntem)

F2 (N)	Yüzeysel	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
0.6	30359	41046	37754	35689	34905	28049
0.4	24106	17109	23210	22729	16079	22108
0.2	7629	4341	7234	7258	7449	8458

Tablo 8.4 Gömme Derinliğine ve DİÇ’ye Bağlı Kazık Moment (M3) Değişim Tablosu (Ortak Yöntem)

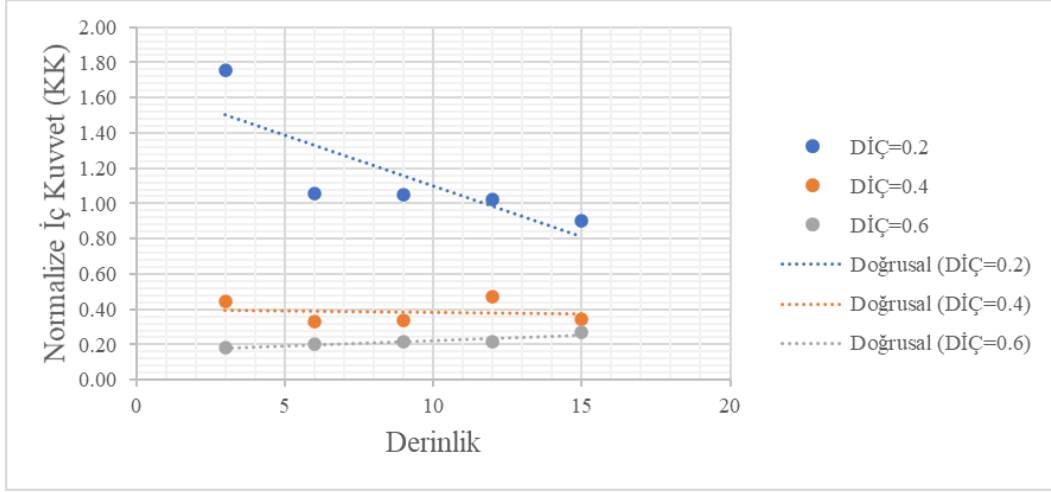
M3 (N.m)	Yüzeysel	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
0.6	201130	258361	237389	215218	204969	166890
0.4	164262	115868	153565	148912	98867	131526
0.2	49459	27020	47004	44128	43616	47988

Tablo 8.5 Gömme Derinliğine ve DİÇ’ye Bağlı Kazık Kesme Kuvveti (F2) Değişim Tablosu (Kinematik Analiz)

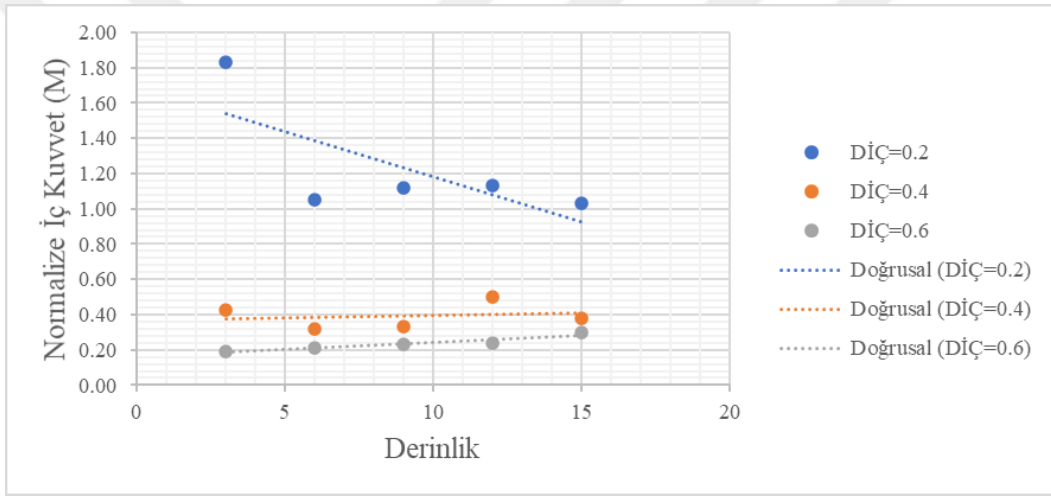
F2 (N)	Yüzeysel	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
0.6	42526	30967	34986	34342	34728	34315
0.4	24706	23949	22764	23335	21009	22265
0.2	7309	6837	6292	6508	7082	7221

Tablo 8.6 Gömme Derinliğine ve DİÇ’ye Bağlı Kazık Moment (M3) Değişim Tablosu (Kinematik Analiz)

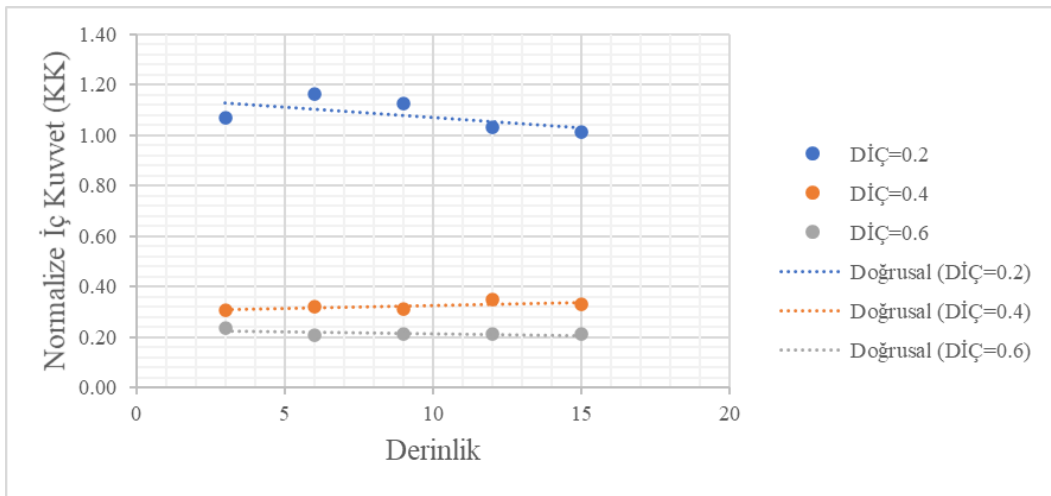
M3 (N.m)	Yüzeysel	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
0.6	283614	222218	236741	232165	236140	225382
0.4	180256	181256	171808	174403	150196	153841
0.2	51424	48879	45283	44757	44933	44074



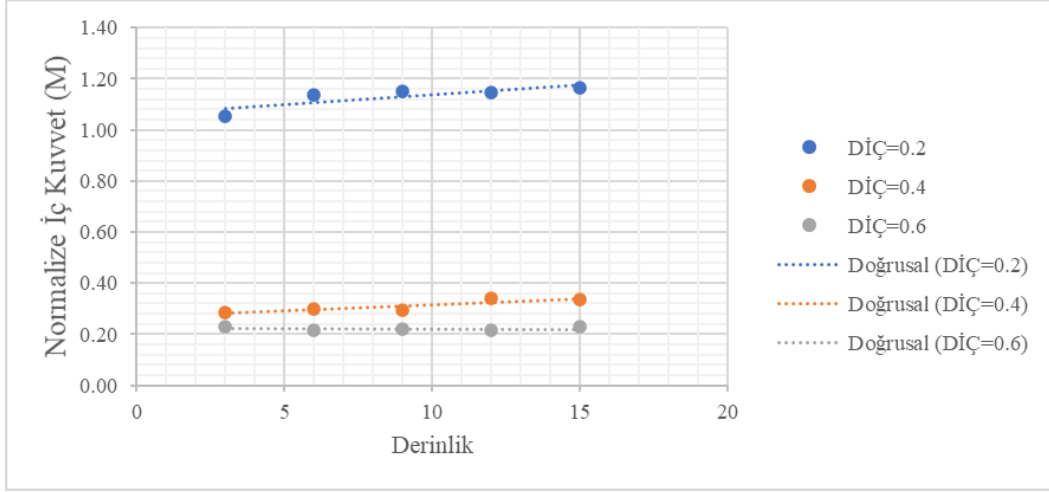
Şekil 8-21 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Ortak Yöntem-Kesme Kuvveti)



Şekil 8-22 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Ortak Yöntem-Moment)

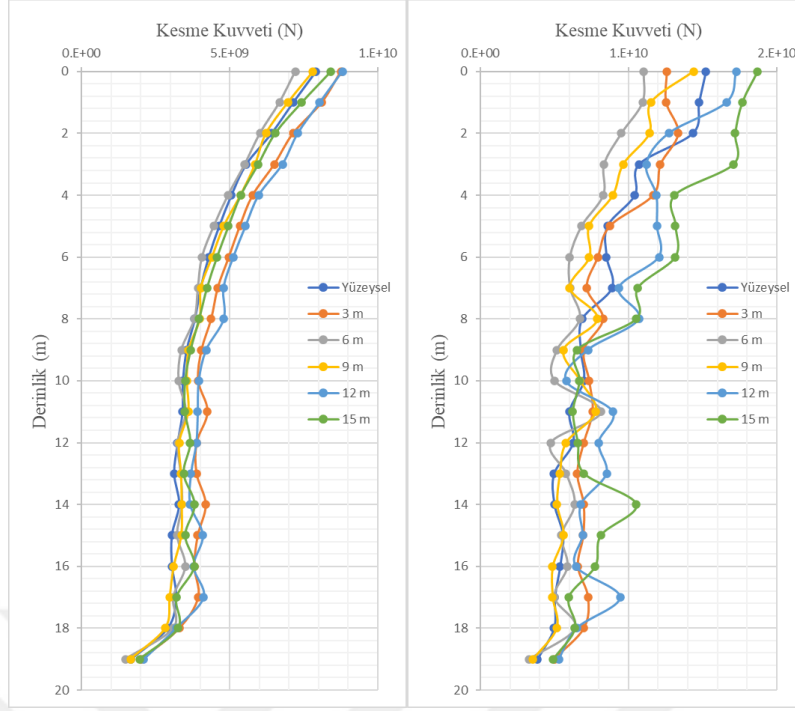


Şekil 8-23 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Kinematik Analiz-Kesme Kuvveti)

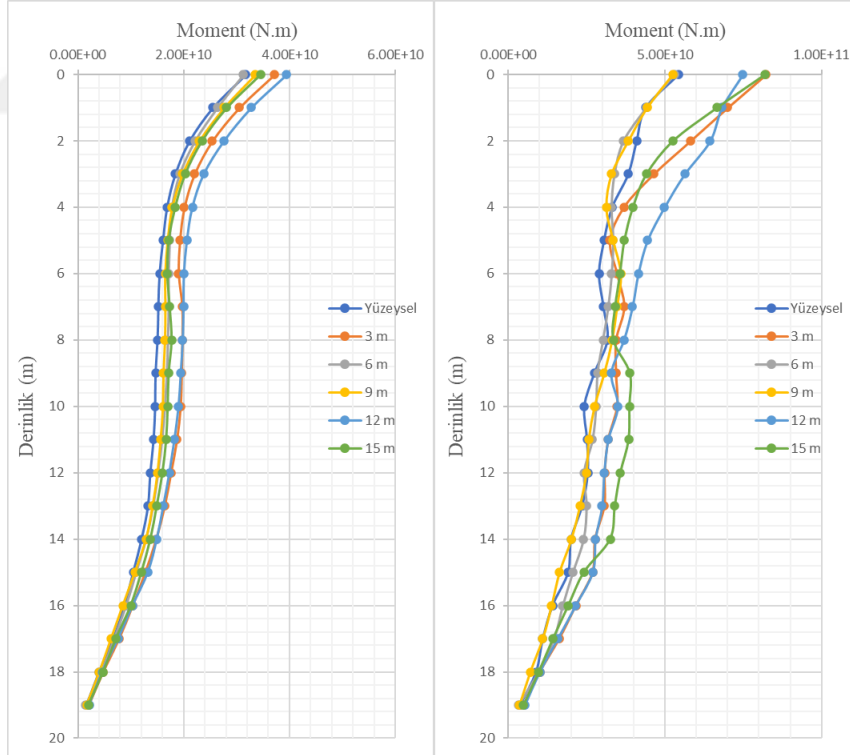


Şekil 8-24 Yüzeysel Duruma Göre Normalize Edilmiş İç Kuvvetler (Kinematik Analiz-Moment)

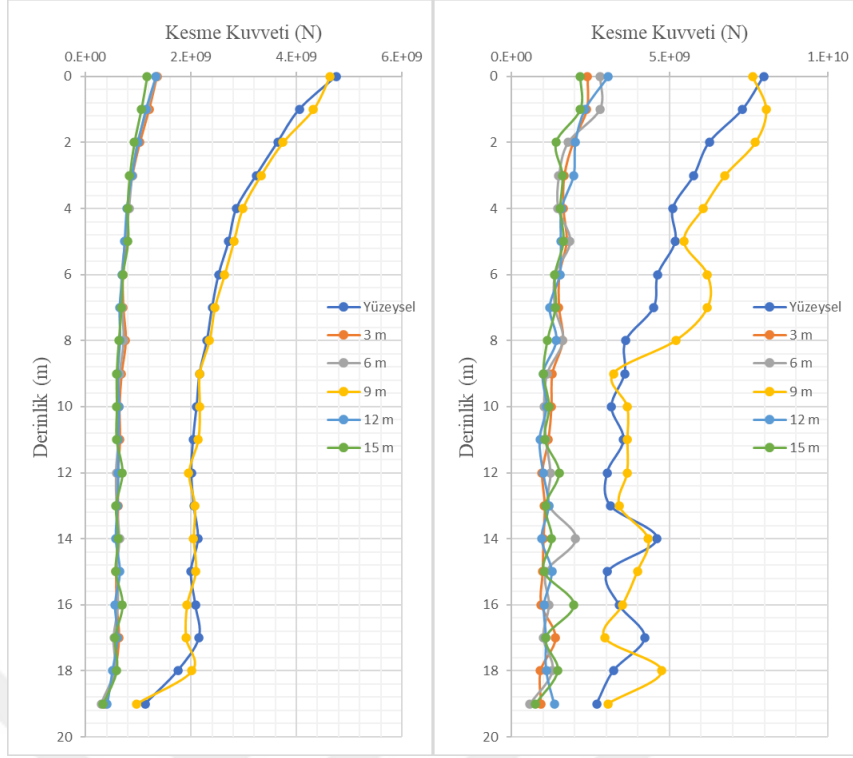




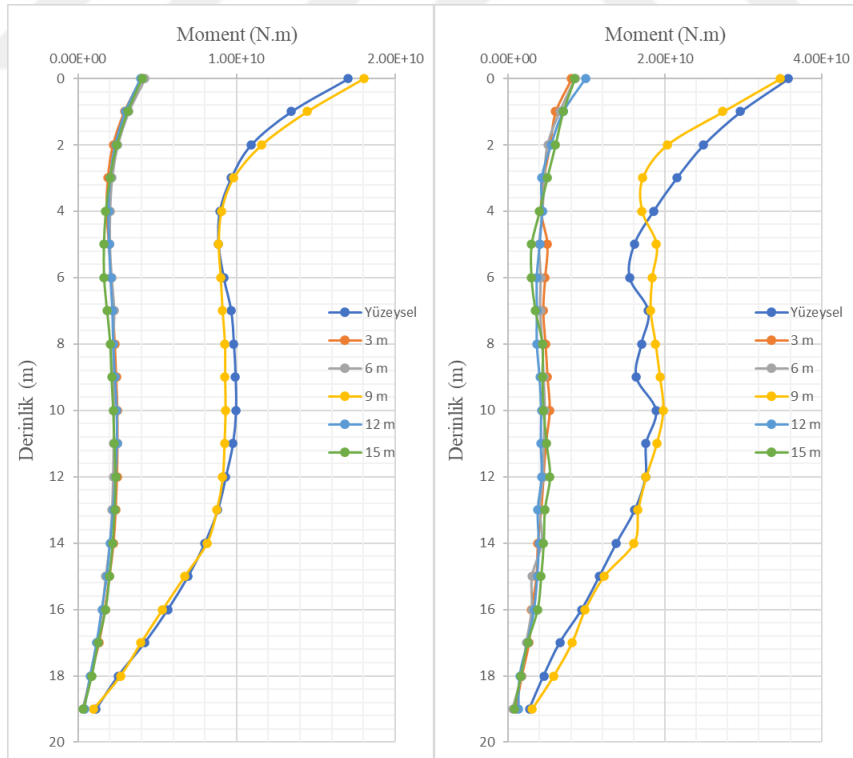
Şekil 8-25 Gömme derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1)



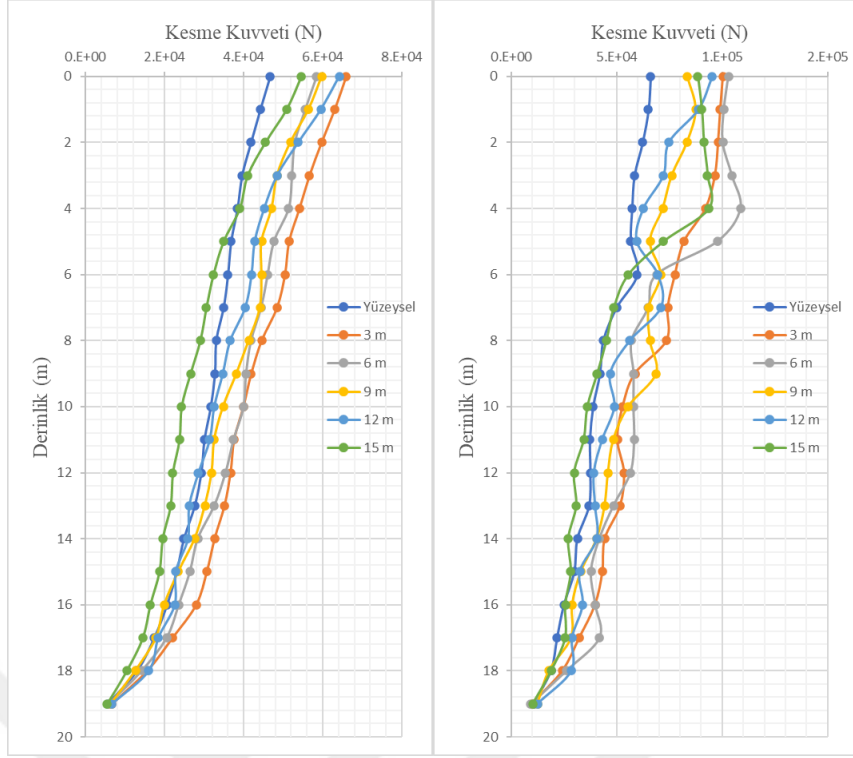
Şekil 8-26 Gömme derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_1)



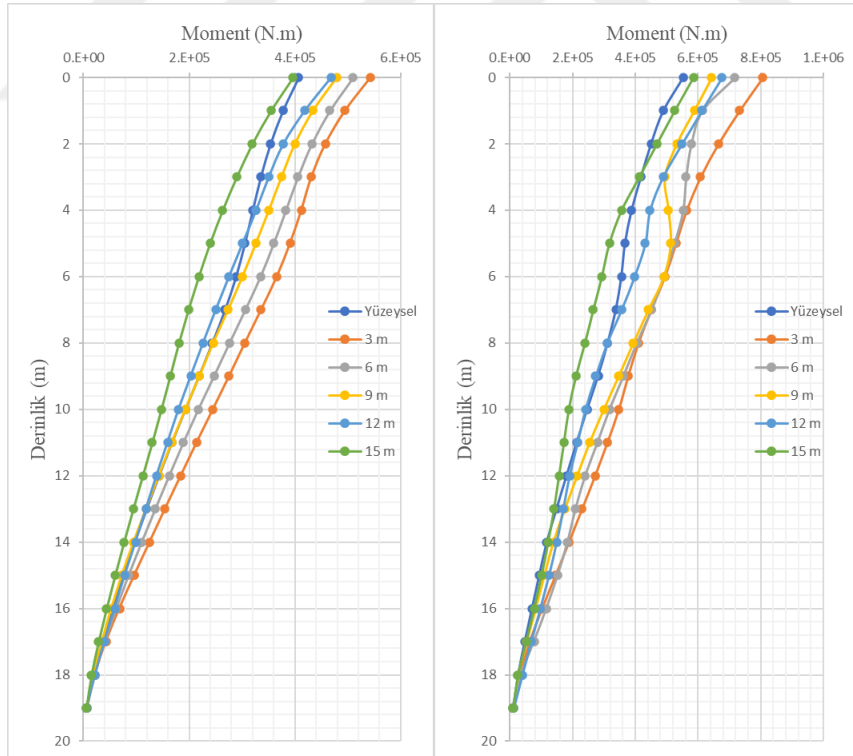
Şekil 8-27 Gömme derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8)



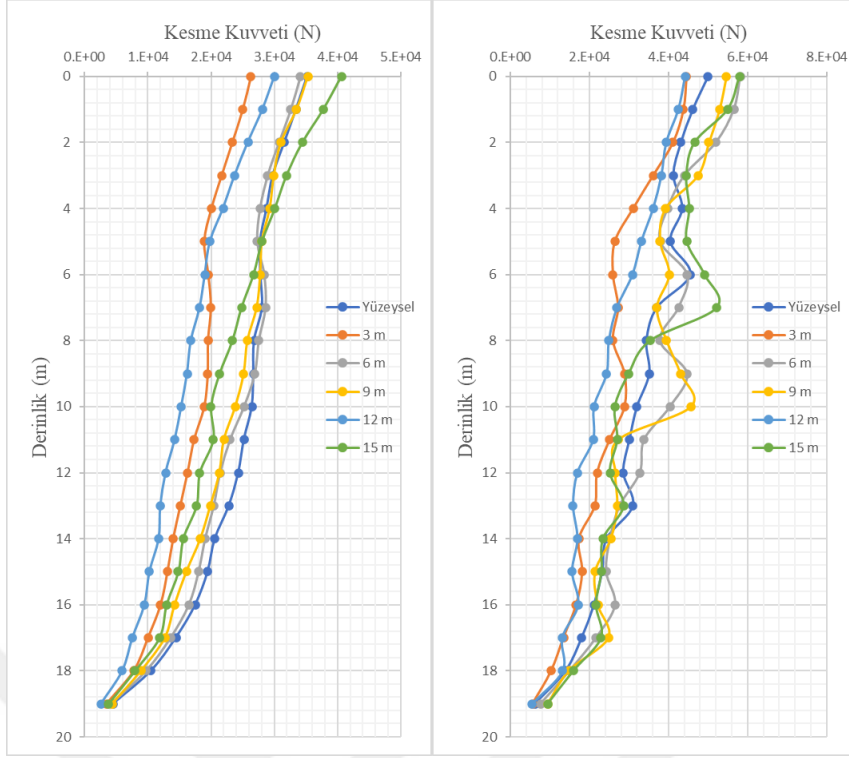
Şekil 8-28 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.8)



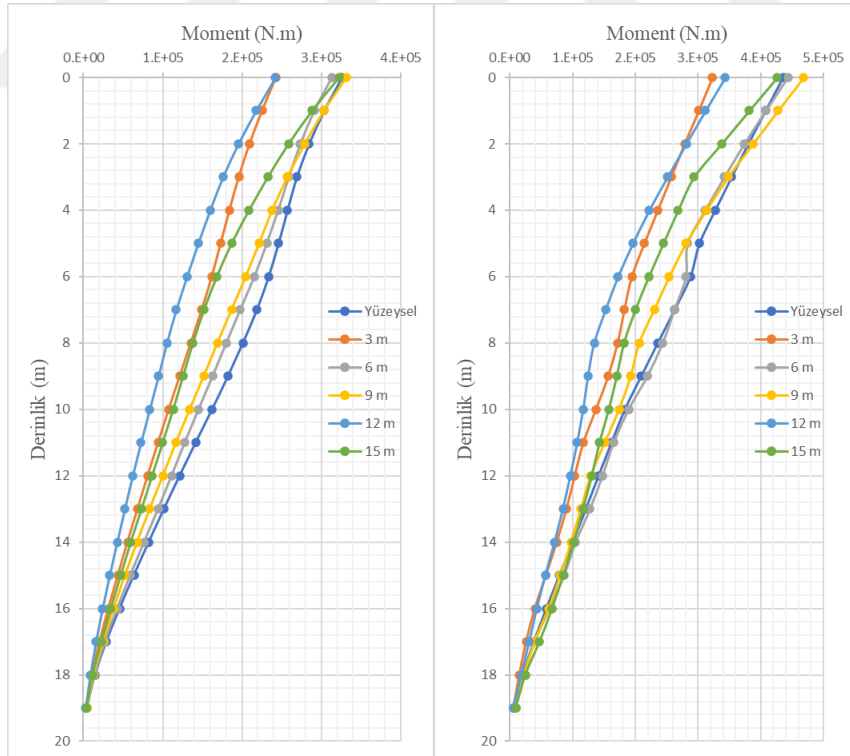
Şekil 8-29 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6)



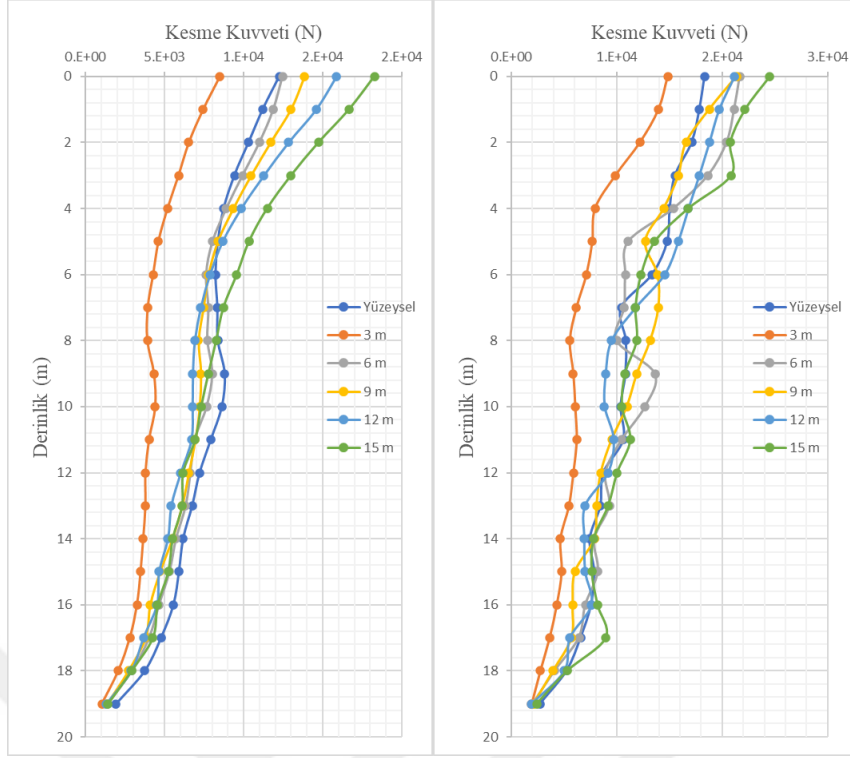
Şekil 8-30 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.6)



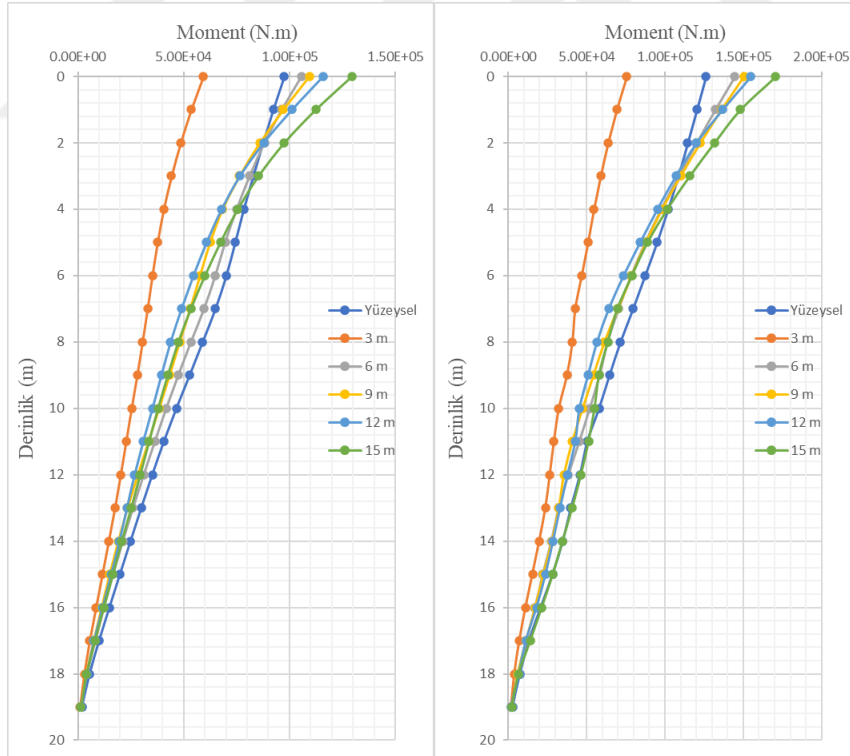
Şekil 8-31 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4)



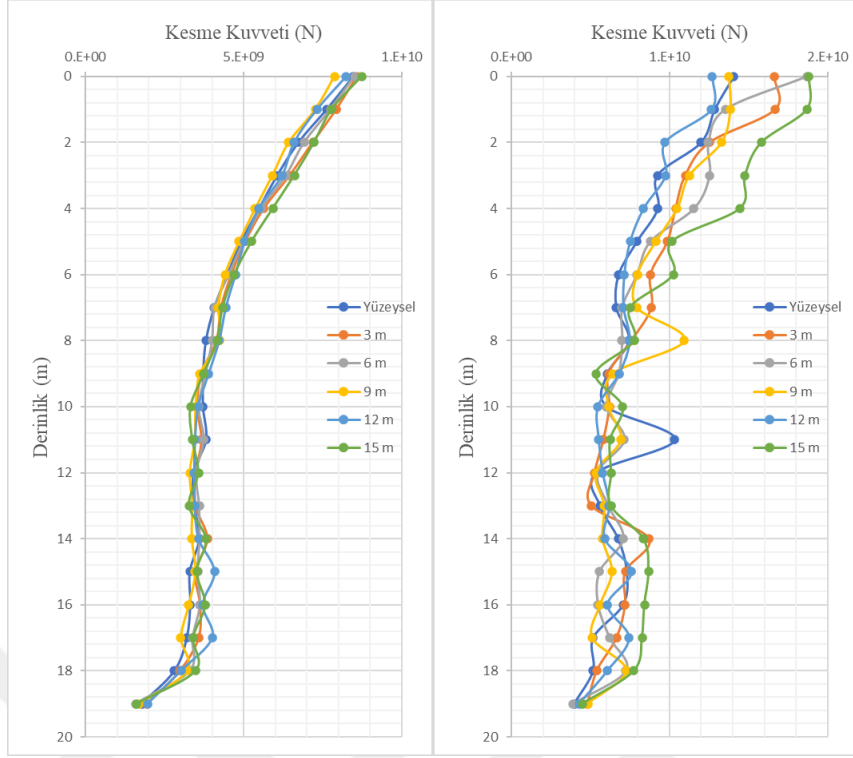
Şekil 8-32 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.4)



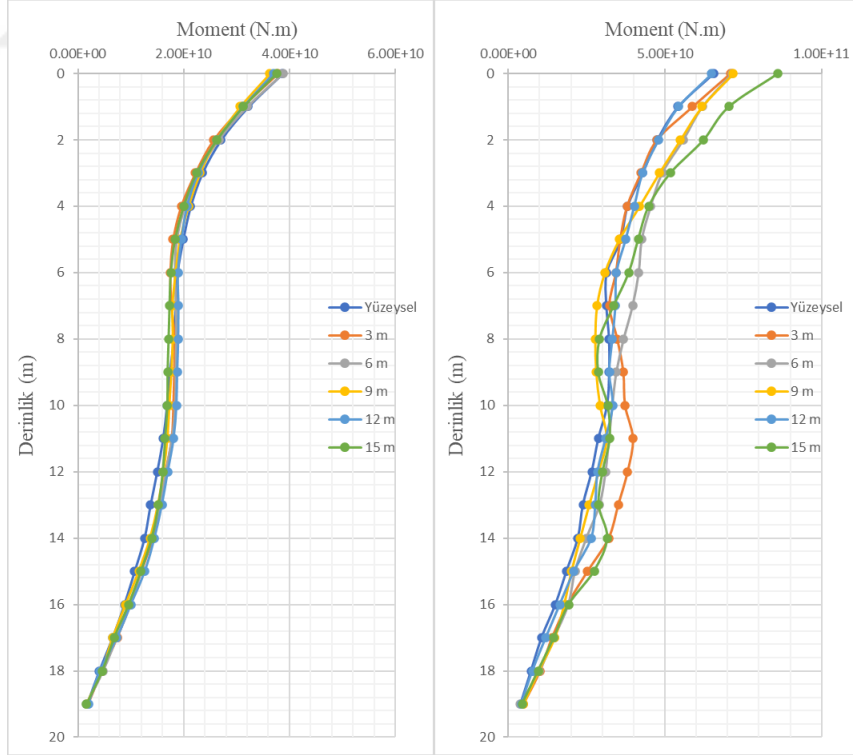
Şekil 8-33 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2)



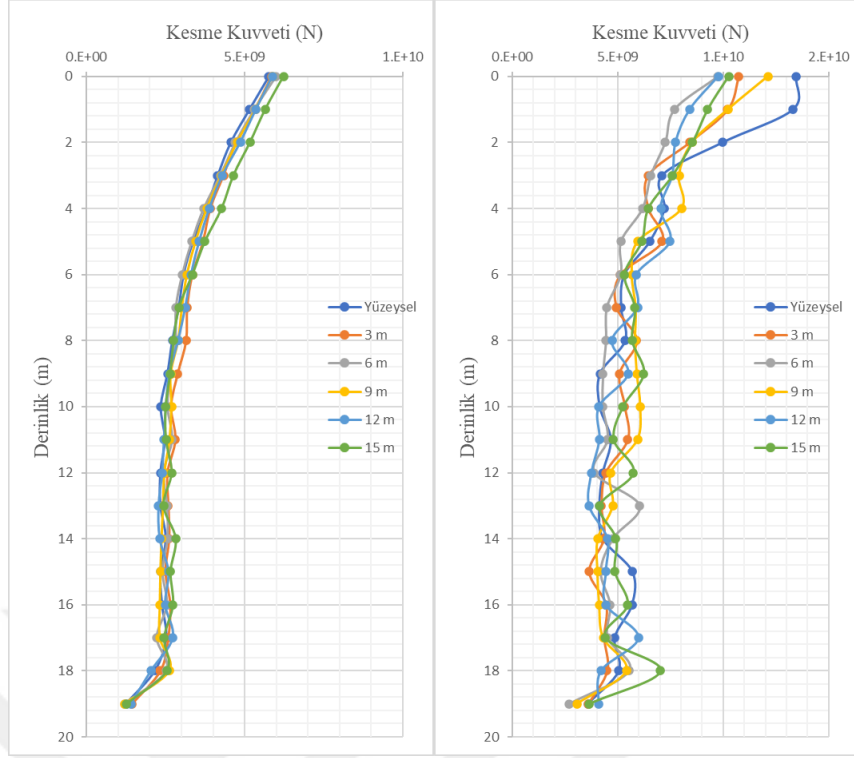
Şekil 8-34 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (D_0.2)



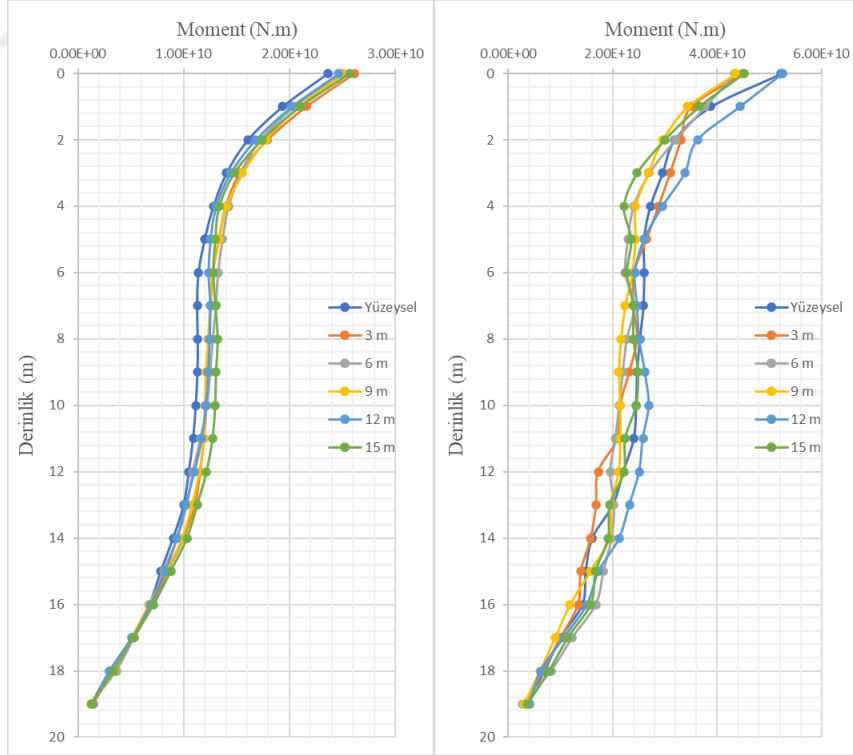
Şekil 8-35 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1)



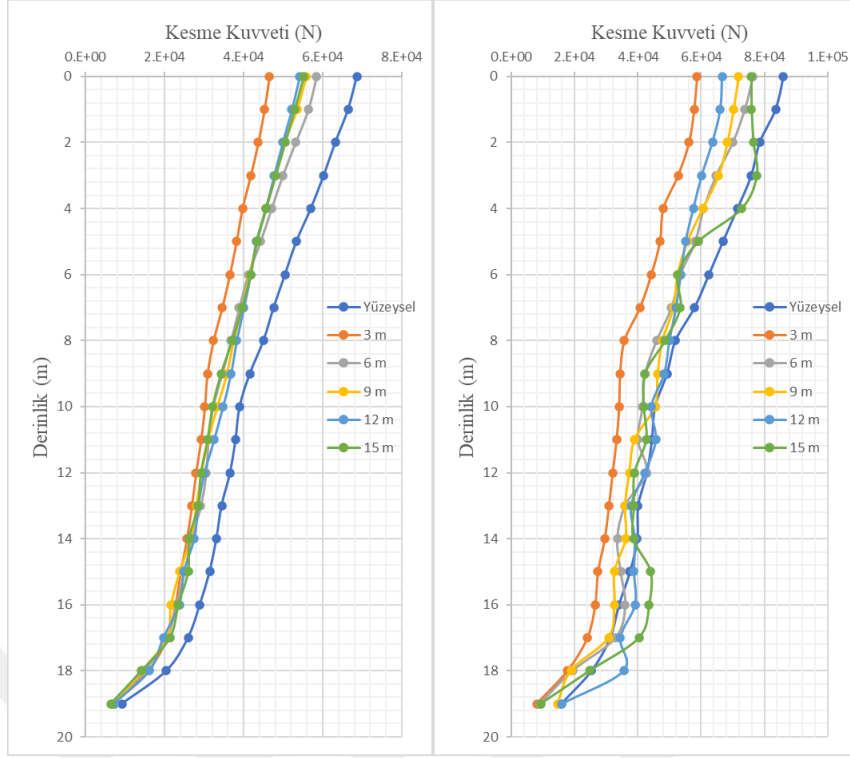
Şekil 8-36 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_1)



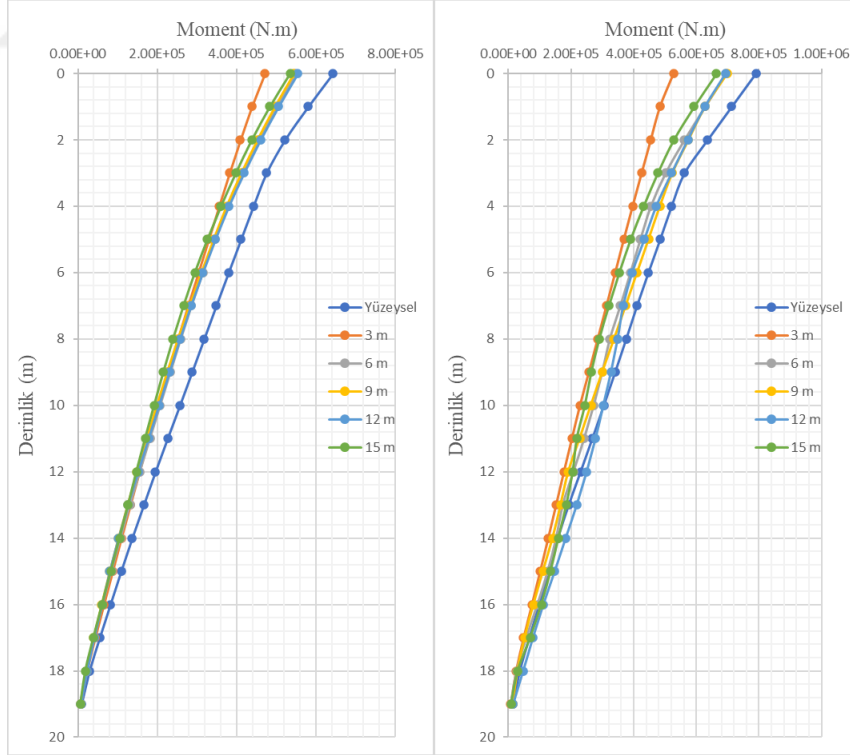
Şekil 8-37 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8)



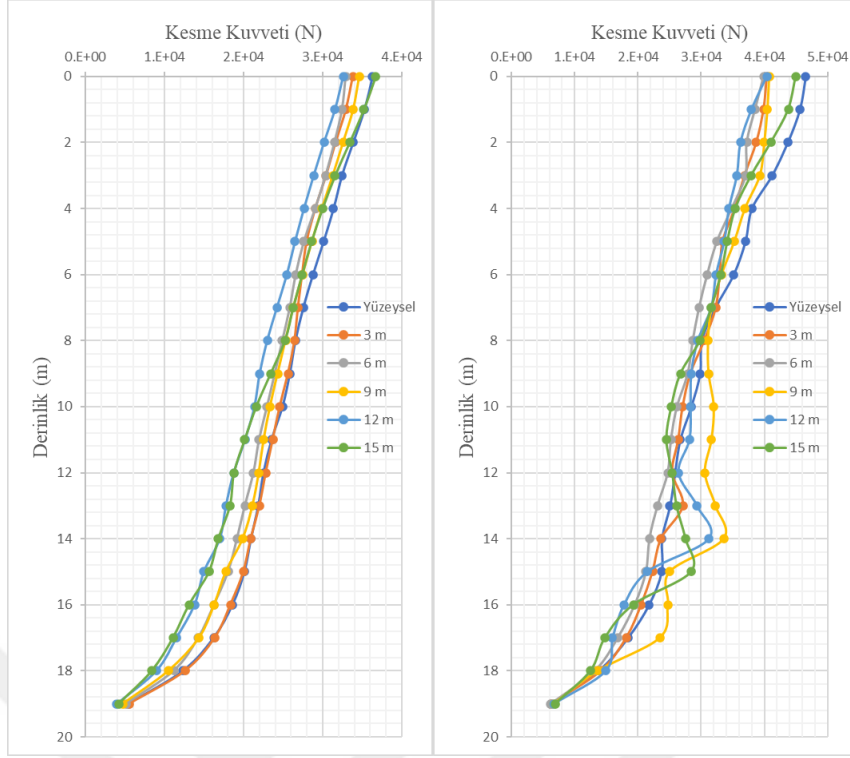
Şekil 8-38 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.8)



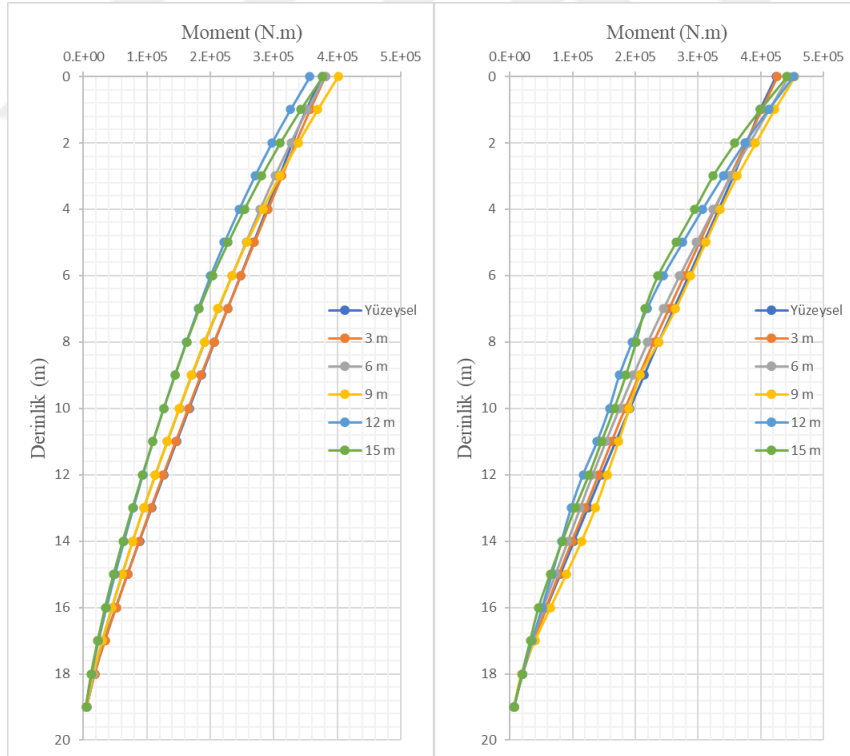
Şekil 8-39 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6)



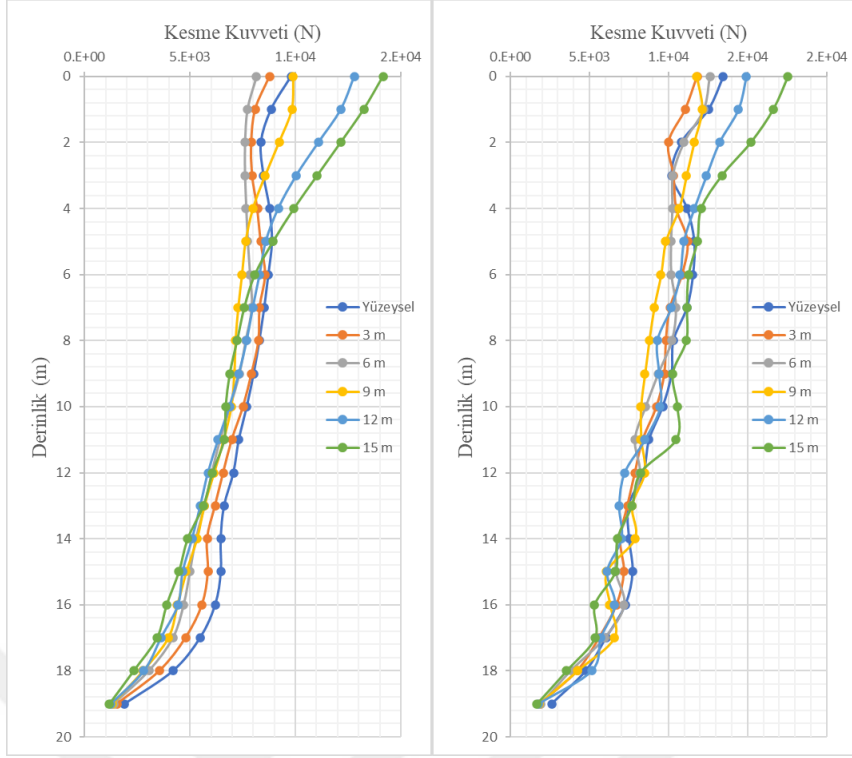
Şekil 8-40 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.6)



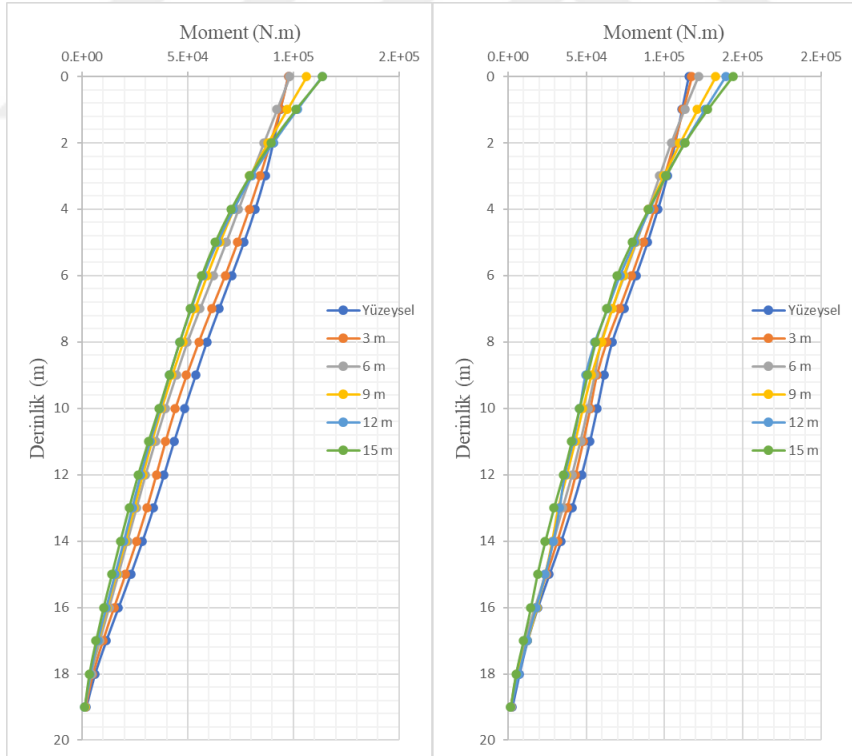
Şekil 8-41 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4)



Şekil 8-42 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.4)



Şekil 8-43 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) kesme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2)



Şekil 8-44 Gömme Derinliğine bağlı olarak kazıklarda oluşan ortalama (sol) ve maksimum (sağ) momentlerin derinliğe bağlı olarak değişimi (K_0.2)

8.3. Kat Ötelenmeleri – Zemin Parametreleri Değişimi

Yapıların analizinde irdelenen bir diğer konu da sistemde kullanılan kolon-kiriş boyutlarını da etkileyecek olan *kat ötelenmeleridir* (displacement). Kat ötelenmelerinin mertebesi, binanın yüksekliğine bağlı olarak aynı değer için farklı katlarda farklı anlamlara geleceği için katlar arası sapmalar (*Drift*) ve bu sapmaların, bulunulan katın bir önceki katla arasındaki düşey mesafeye bölünerek bulunmasıyla sapma oranları (*Drift Ratio*) hesaplanmaktadır. Bu tez kapsamında katlar boyunca oluşan ötelenmeler, sapmalar ve sapma oranları zemin değişimine bağlı olarak irdelenmiştir. Deplasmanlar için seçilen noktalar her katın orta noktasından seçilmiştir. Buradan elde edilen zamana bağlı deplasman sonuçlarının içinden mutlak olarak ötelenme ve sapma oranları bulunarak her kattaki en büyük ötelenmeler ve sapma oranları grafik olarak çizdirilmiştir. Grafiklerde sunulan en büyük ötelenme değerleri, her katın temel orta noktasına göre mutlak en büyük ötelenmeleridir.

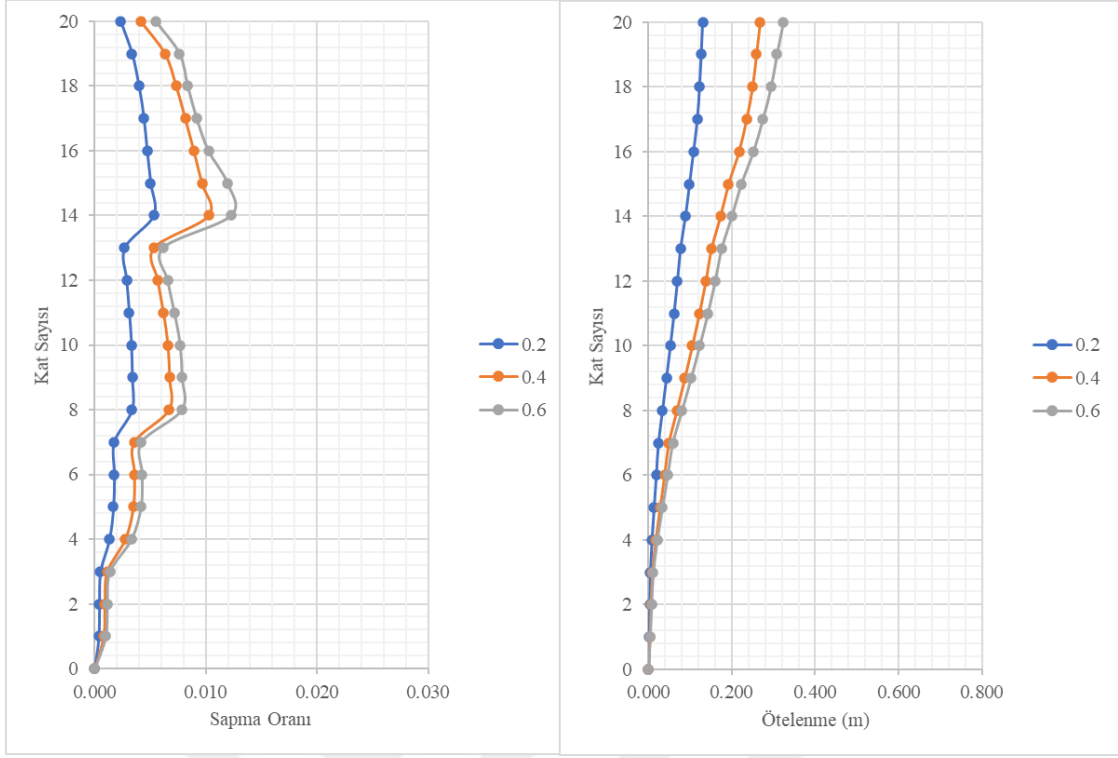
Dinamik analizler sonucunda temel orta noktasından elde edilen deplasman-zaman verilerinin içinden mutlak en büyük değerler her bir zemin parametre değişim durumu ve DİÇ için seçilmiş, Ortak Yöntem ve Altsistem Yöntemiyle yapılan modeller için hesaplanan değerler Tablo 8.7 ve Tablo 8.8’de sunulmaktadır.

Tablo 8.7 Temel orta noktasında oluşan maksimum deplasmanlar (m) (Üstyapı var)

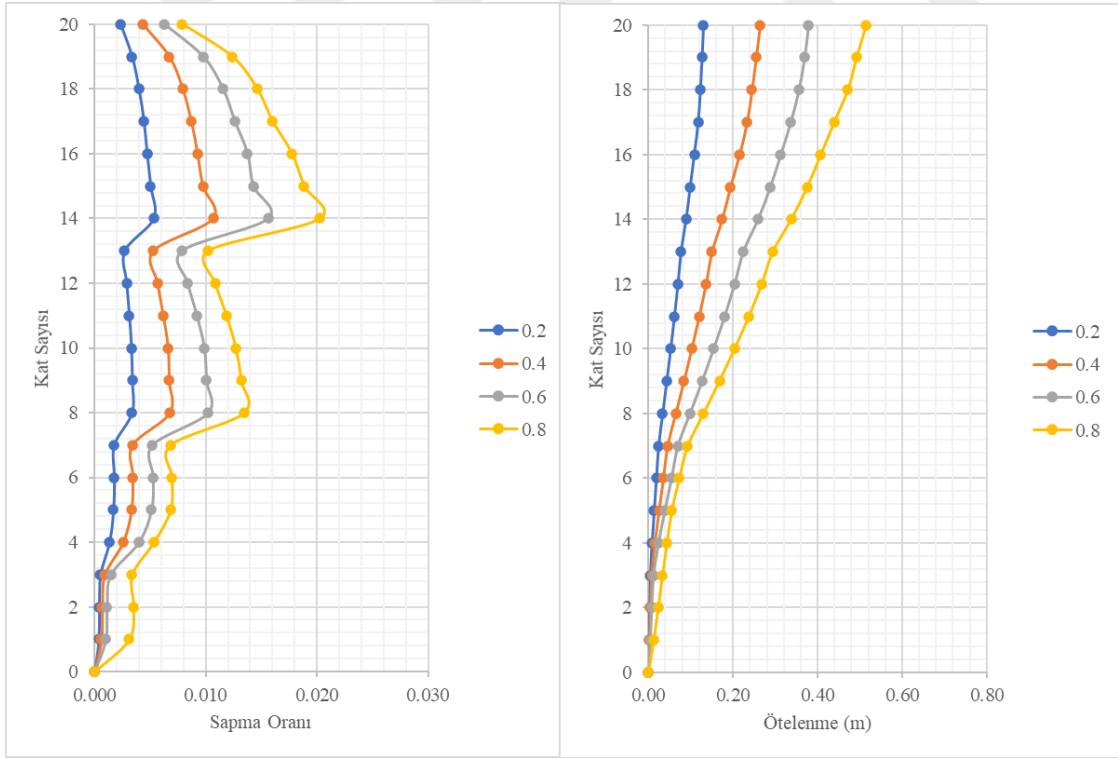
DİÇ \ Zemin	VS200	VS250	VS350	VS450
0.2	0.15	0.15	0.15	0.14
0.4	0.33	0.31	0.29	0.29
0.6	0.40	0.48	0.45	0.44
0.8		1.40	0.61	0.59
1			0.78	0.74

Tablo 8.8 Temel orta noktasında oluşan maksimum deplasmanlar (m) (Üstyapı yok)

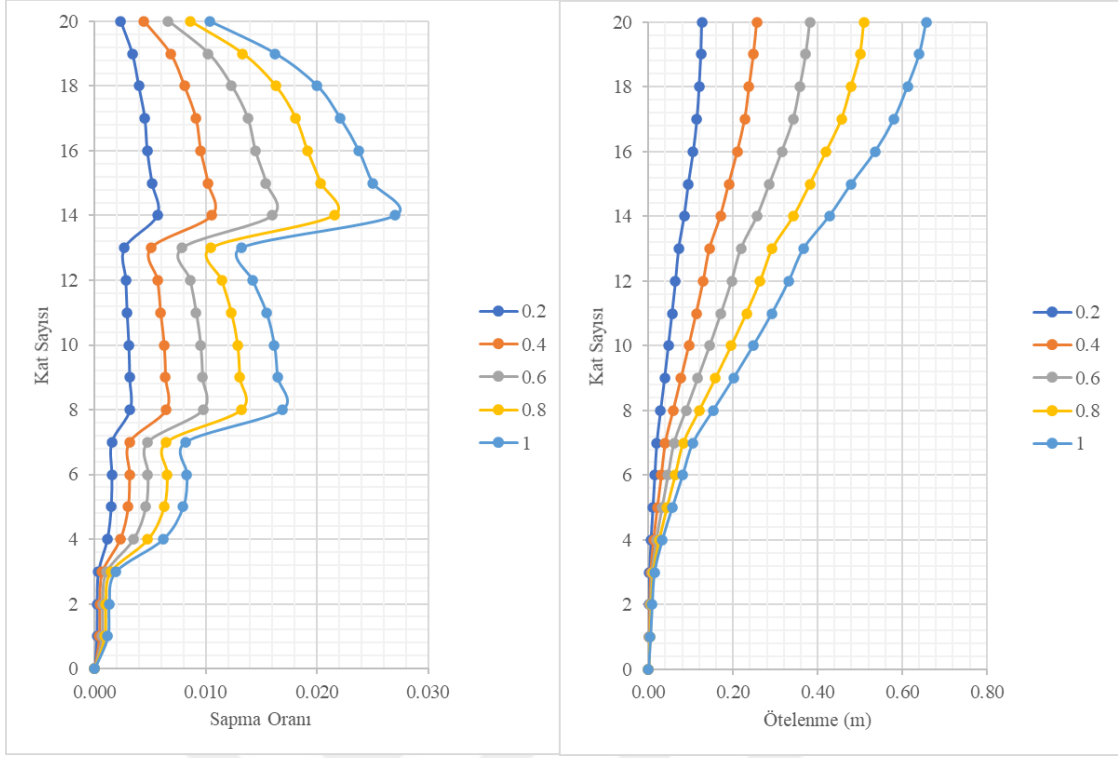
DİÇ \ Zemin	VS200	VS250	VS350	VS450
0.2	0.16	0.15	0.15	0.15
0.4	0.33	0.31	0.29	0.29
0.6	0.50	0.49	0.45	0.44
0.8		1.41	0.61	0.59
1			0.78	0.74



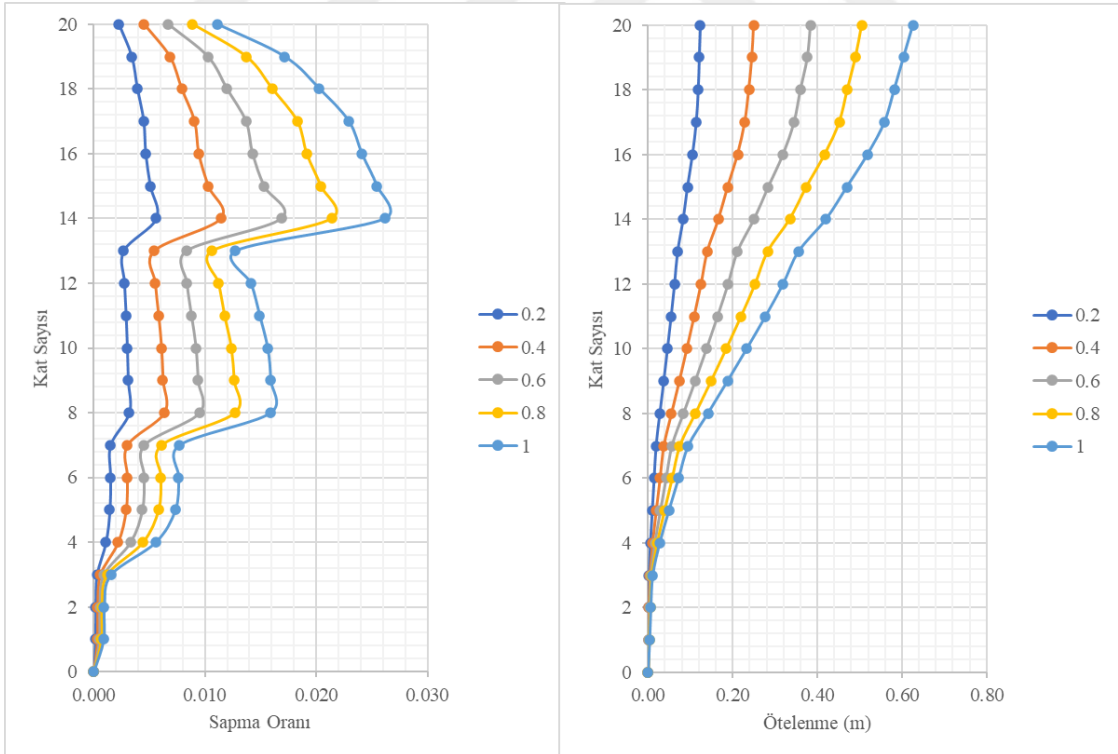
Şekil 8-45 Vs200 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi



Şekil 8-46 Vs250 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi

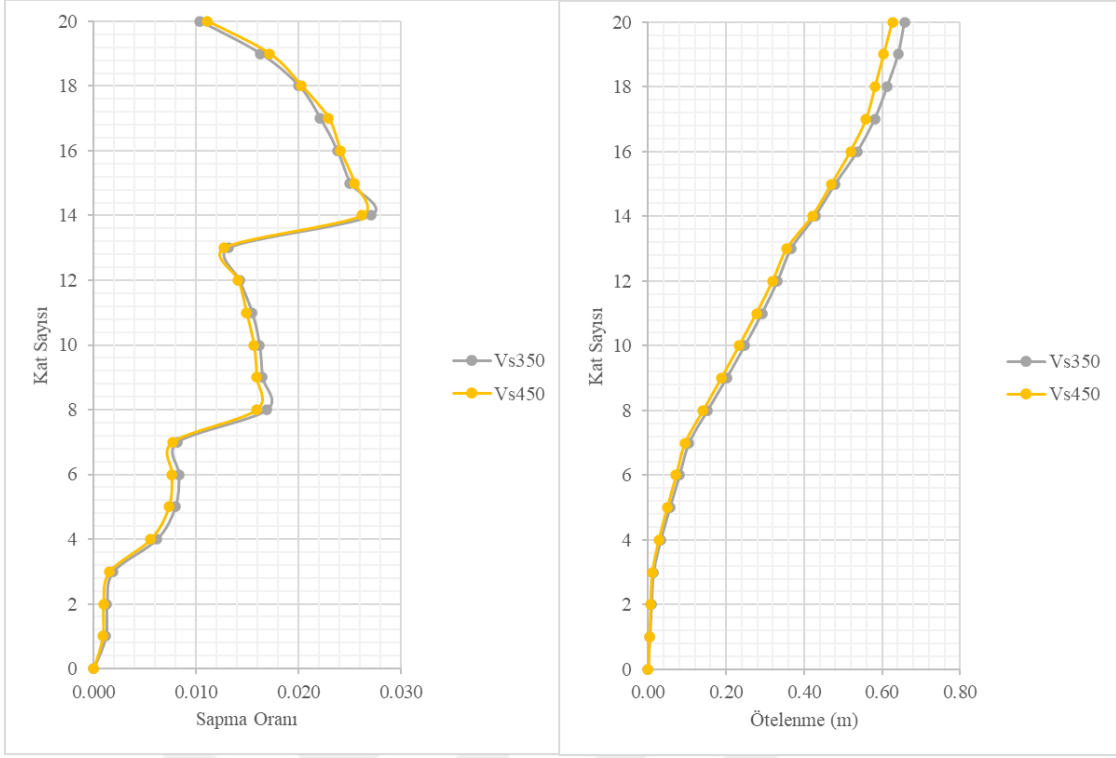


Şekil 8-47 Vs350 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi

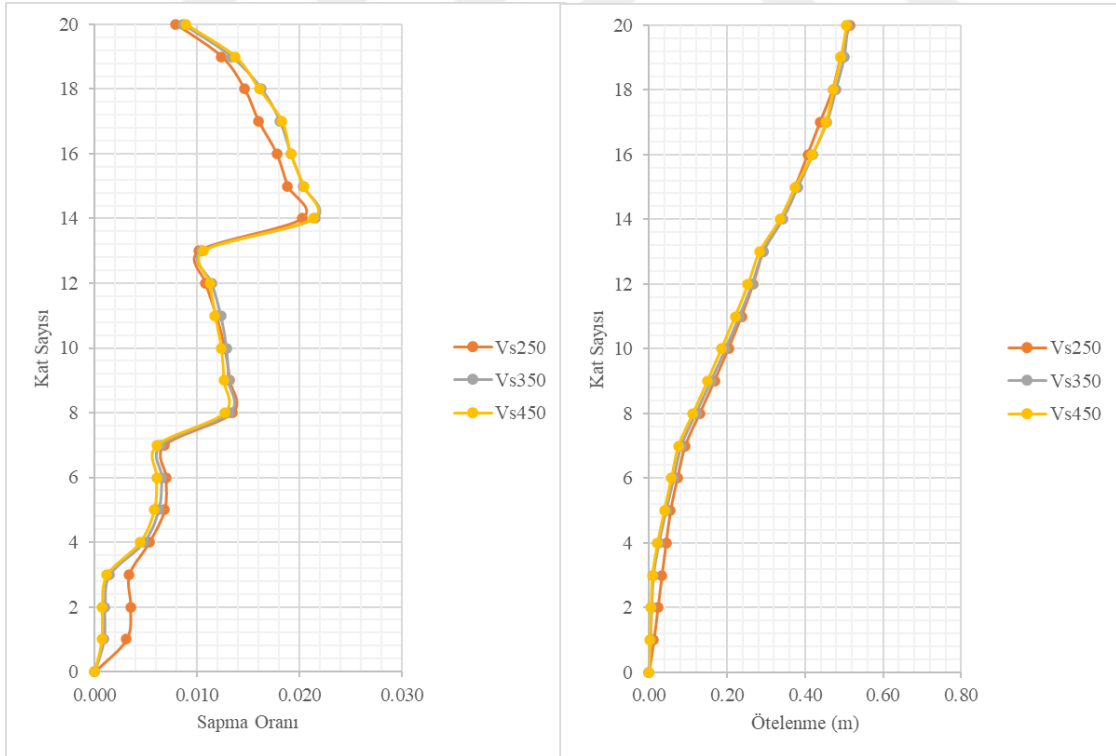


Şekil 8-48 Vs450 için Kat ötelenmeleri ve Sapma Oranı değerlerinin DİÇ'ya bağlı değişimi

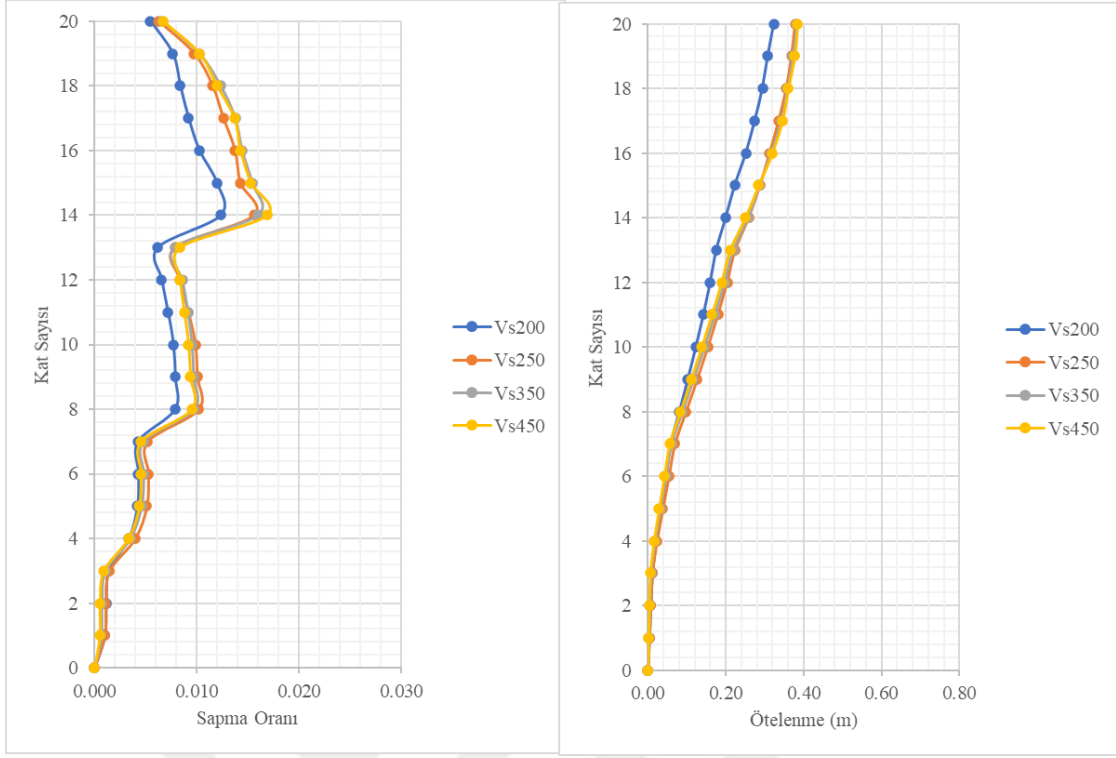
Ötelenme ve sapmaların, tek bir DİÇ için zemin değişimine bağlı olarak ne kadar değiştiğinin grafikler aşağıdaki grafiklerde de sunulmuştur.



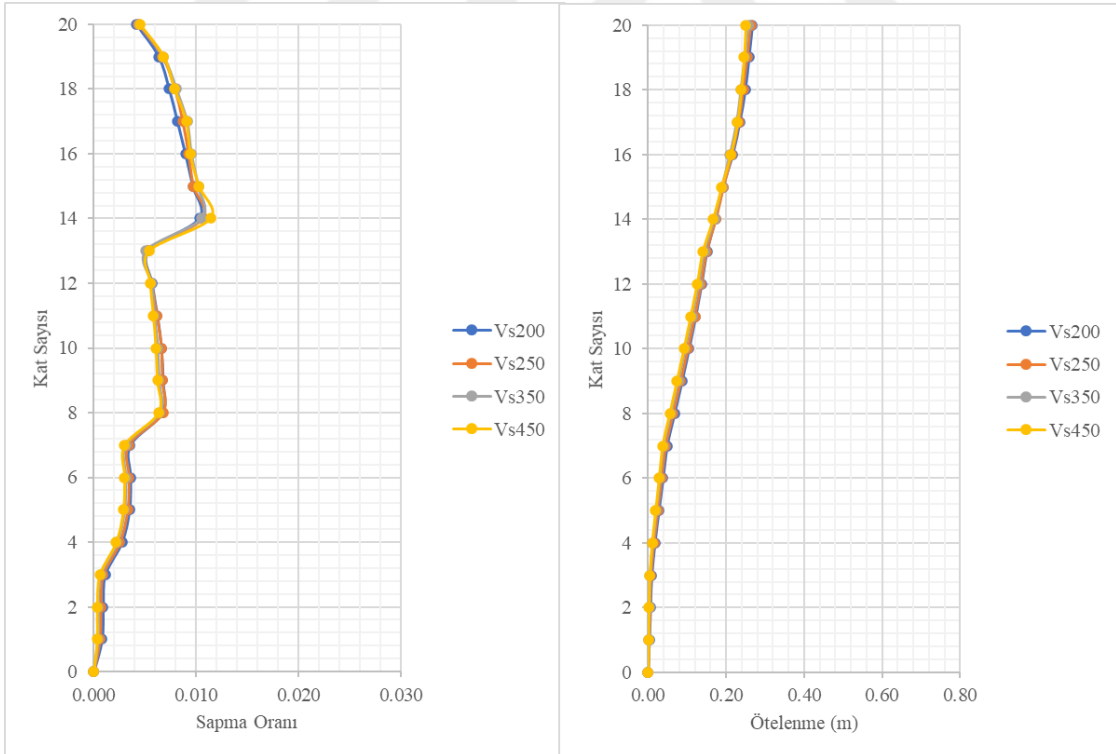
Şekil 8-49 DİÇ=1 için Zemin Parametre değişikimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi



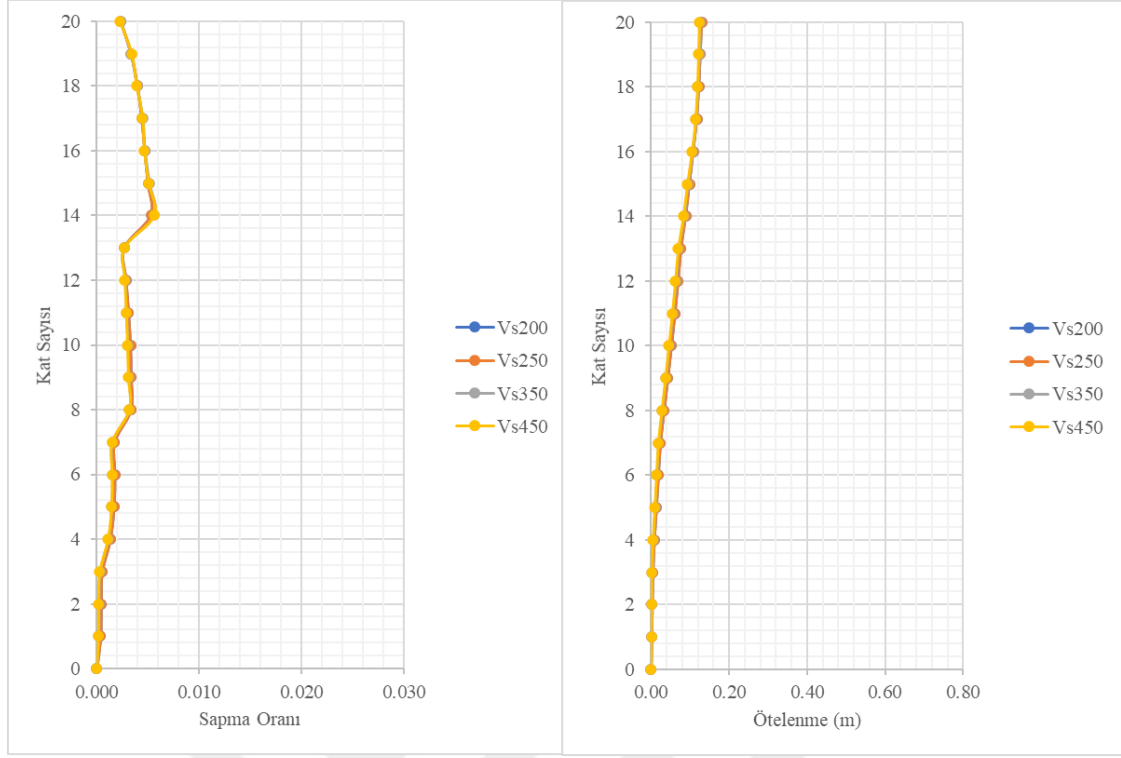
Şekil 8-50 DİÇ=0.8 için Zemin Parametre değişikimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi



Şekil 8-51 DİÇ=0.6 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi



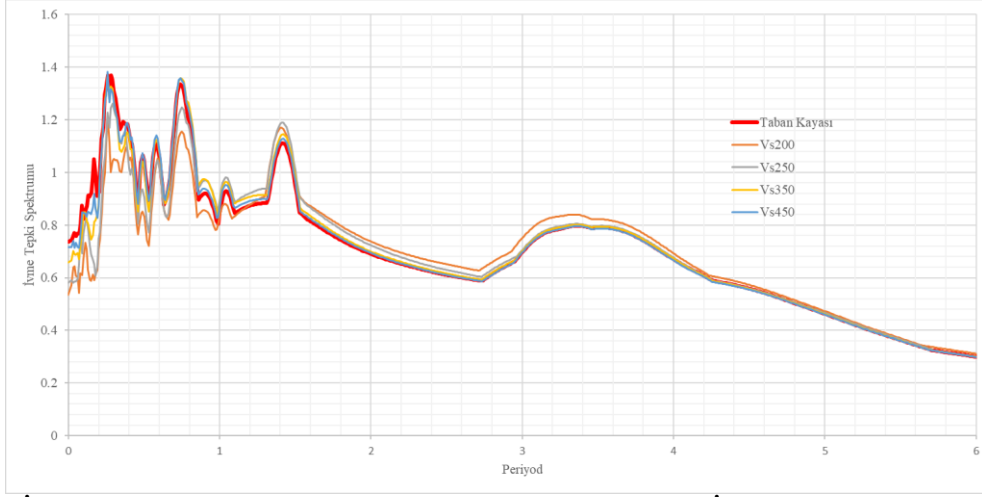
Şekil 8-52 DİÇ=0.4 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi



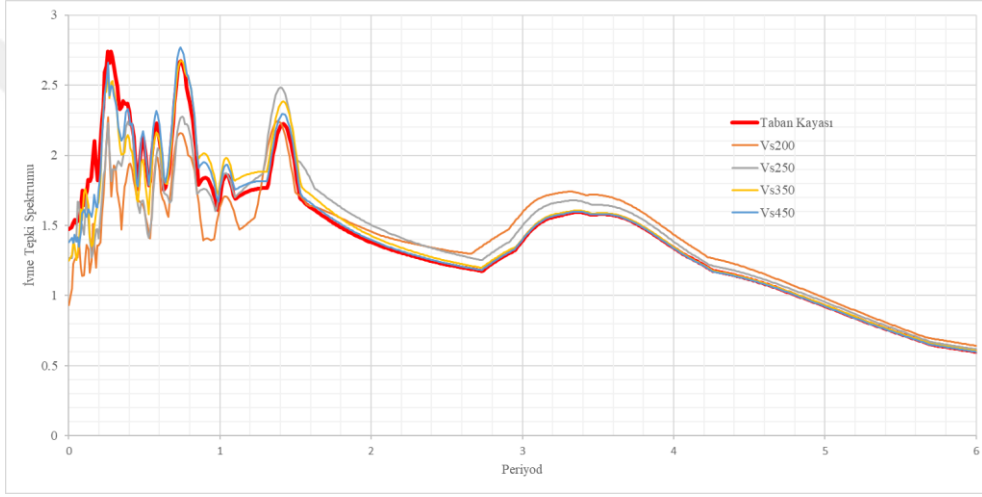
Şekil 8-53 DİÇ=0.2 için Zemin Parametre değişimine bağlı Ötelenme ve Sapma Oranı değişimi

8.4. Temel Seviyesindeki Spektral İvme Sonuçları

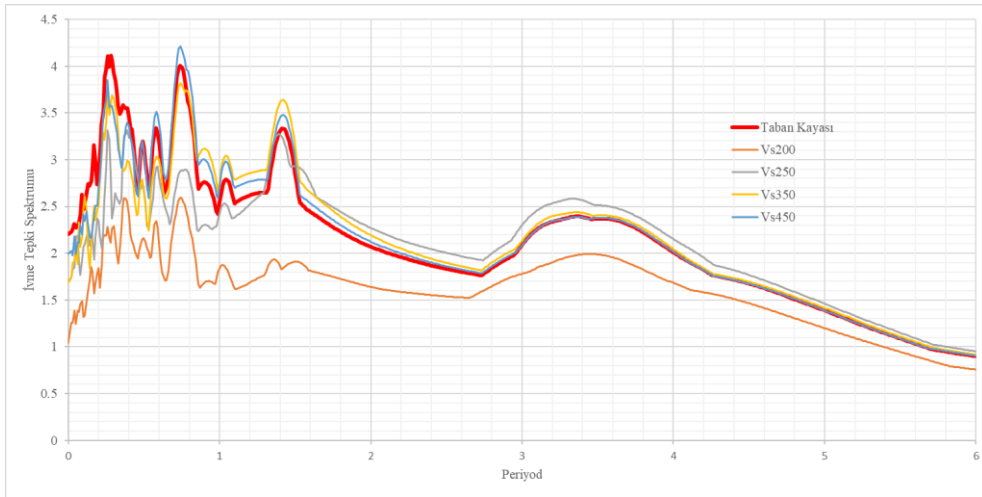
Yapısal analizlerde kullanılmak üzere ihtiyaç duyulan İvme Spektrumlarının, çeşitli yönetmeliklerde (TBDY, Eurocode, ASCE) nasıl elde edileceği belirlenmiştir. Genel olarak belirli bir bölge veya koordinat için alınan değerler, zemin sınıfı dikkate alınarak hesaplanan değerler (S_{DS} , S_{D1}) ile oluşturulan spektrumlar kullanılsa da kötü zemin koşulları (ZE, ZD, ZF) için Sahaya Özel Zemin Davranışı ile elde edilen ivme çıktılarıyla elde edilen spektrumlar da kullanılmaktadır. Periyod uzamasının (*Period lengthening*) ve sönüm etkilerinin (*histeretik ve yaylımsal*), gömme derinliği ve zemin parametrelerinin değişimi nedeniyle ne kadar etkilendiği irdelenecektir. Şekillerin açıklamasında bulun (D) harfi modelde üstyapının bulunduğunu (Ortak Yöntem), (K) harfi bulunmadığını (Kinematik etkileşim) imlemektedir. Bütün tepki spektrumları %5 sönümle hesaplanmıştır.



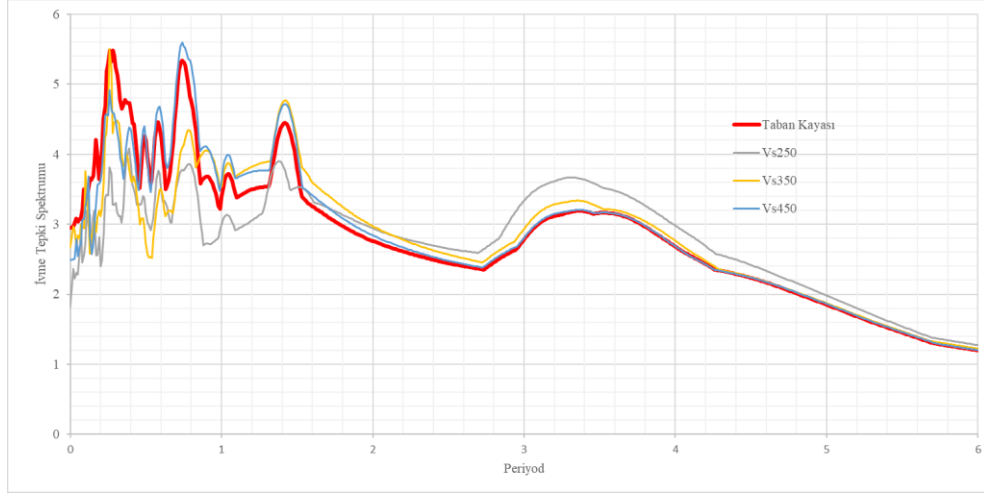
Şekil 8-54 DİÇ=0.2 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



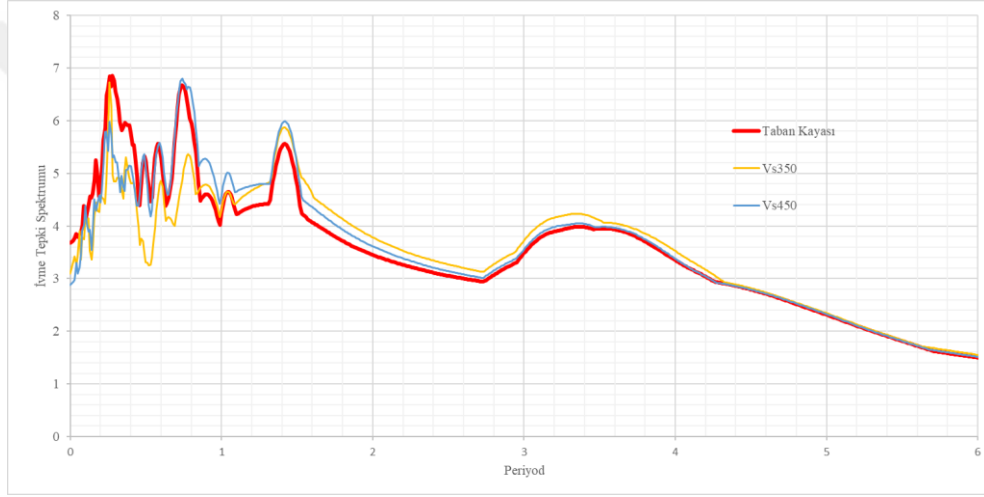
Şekil 8-55 DİÇ=0.4 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



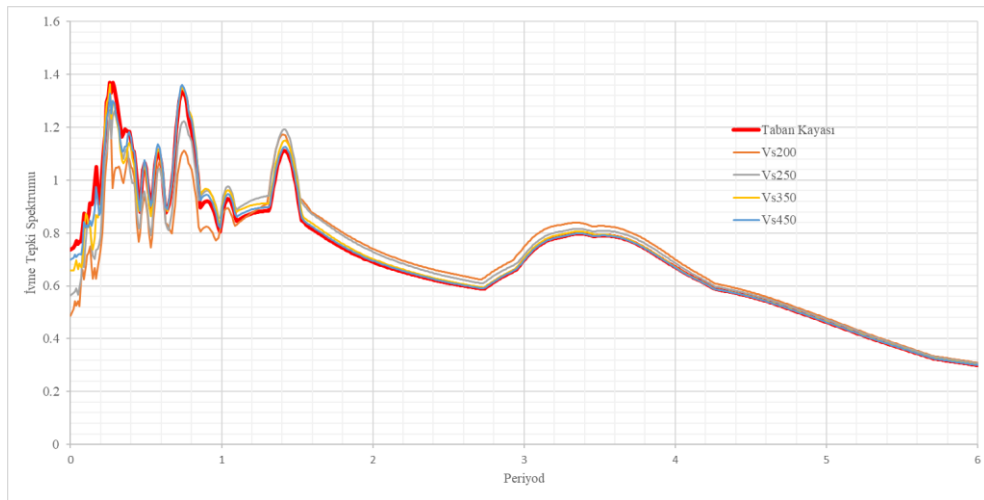
Şekil 8-56 DİÇ=0.6 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



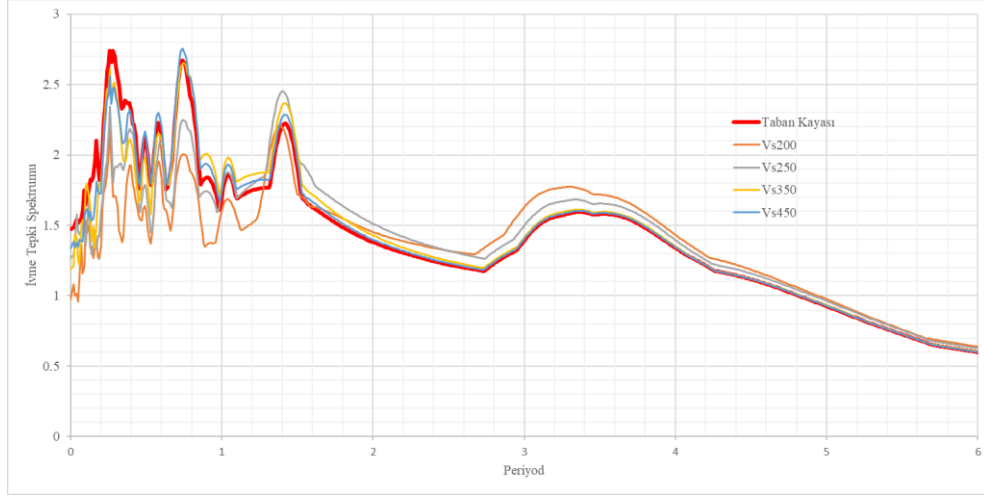
Şekil 8-57 DİÇ=0.8 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



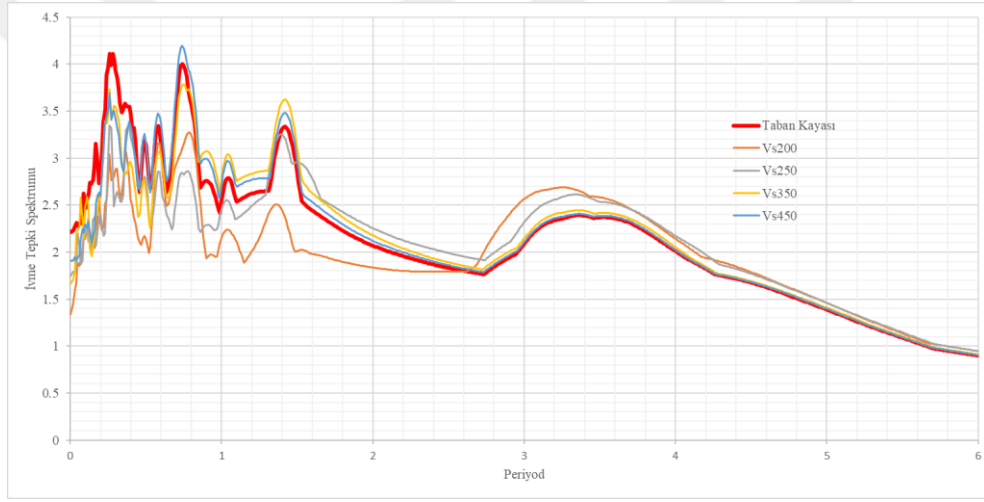
Şekil 8-58 DİÇ=1 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



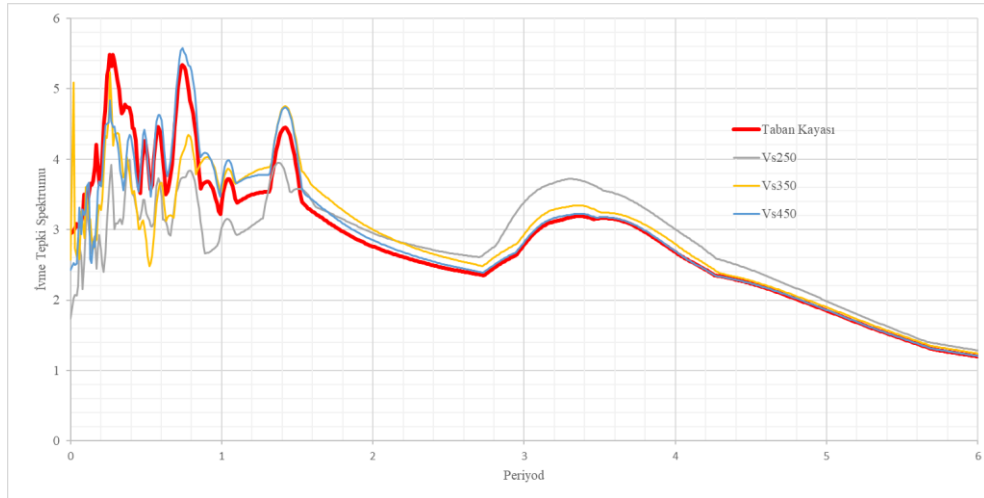
Şekil 8-59 DİÇ=0.2 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



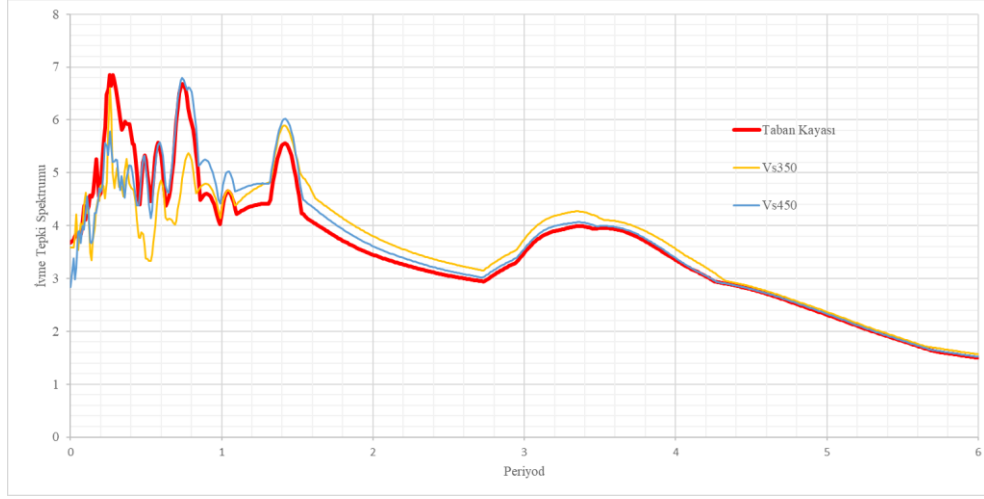
Şekil 8-60 DİÇ=0.4 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



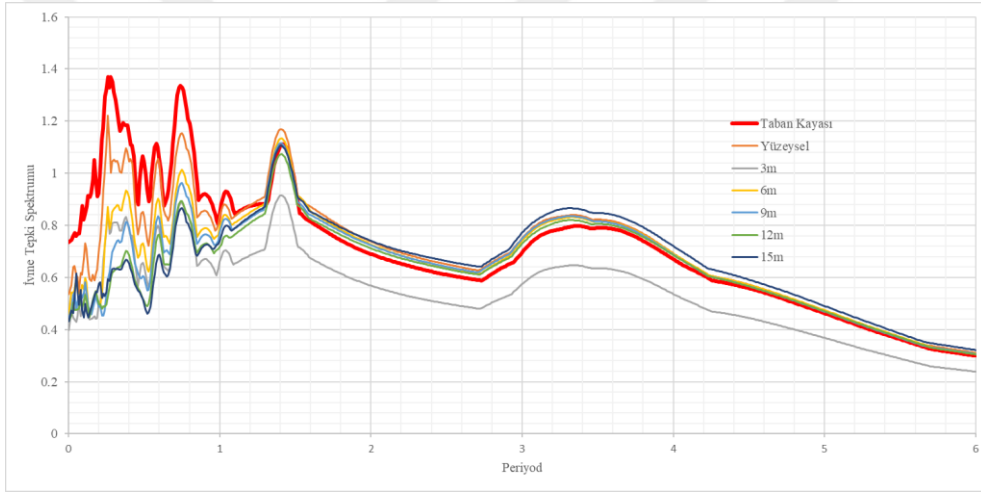
Şekil 8-61 DİÇ=0.6 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



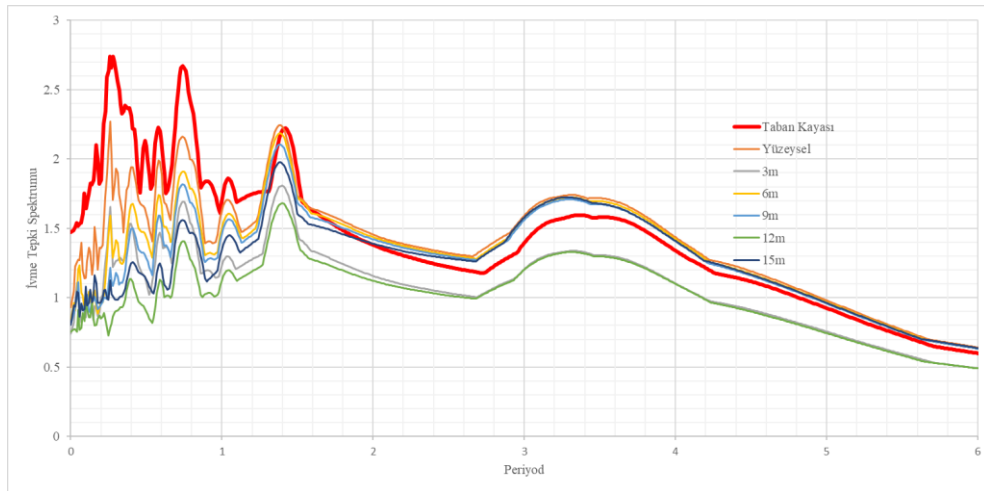
Şekil 8-62 DİÇ=0.8 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



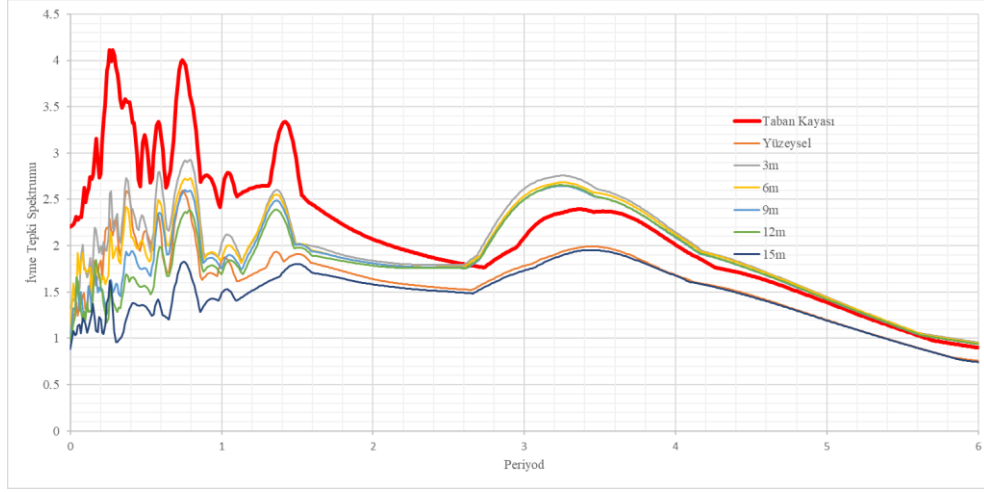
Şekil 8-63 DİÇ=1 için Zemin Modeli Parametrelerinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



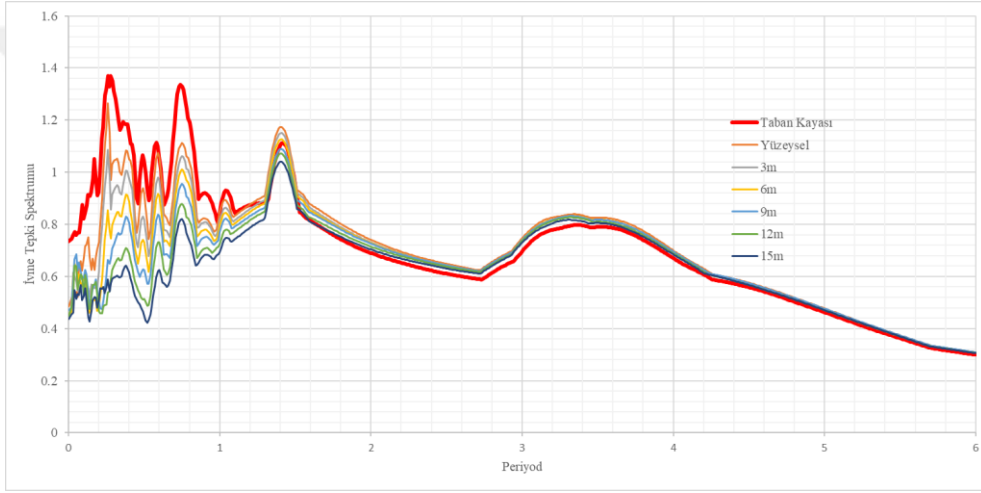
Şekil 8-64 DİÇ=0.2 için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



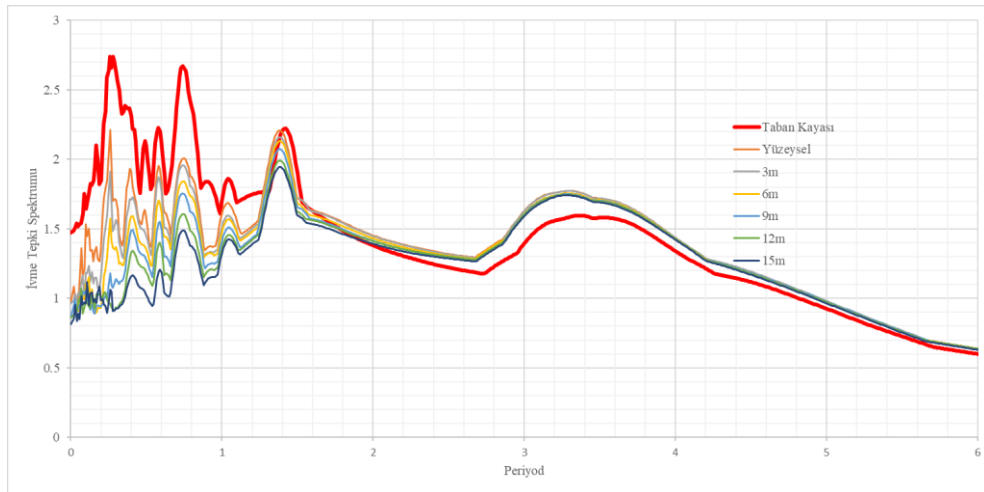
Şekil 8-65 DİÇ=0.4 için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



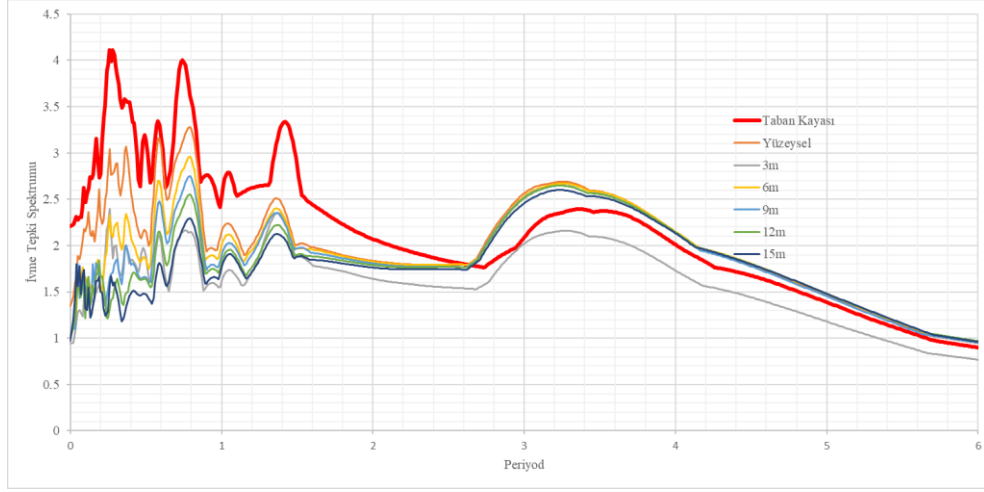
Şekil 8-66 DİÇ=0.6 için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (D)



Şekil 8-67 DİÇ=0.2 için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



Şekil 8-68 DİÇ=0.4 için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)



Şekil 8-69 $DİÇ=0.6$ için Gömme Derinliğinin değişimine göre İvme Spektrumu grafikleri (K)

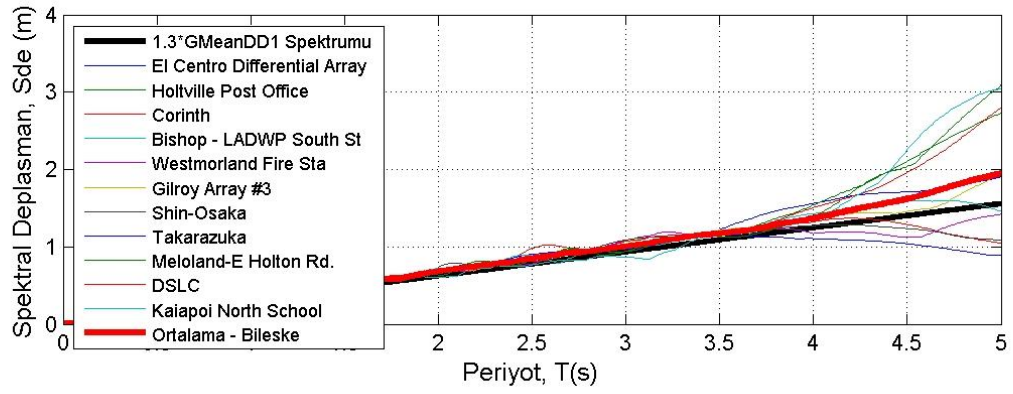
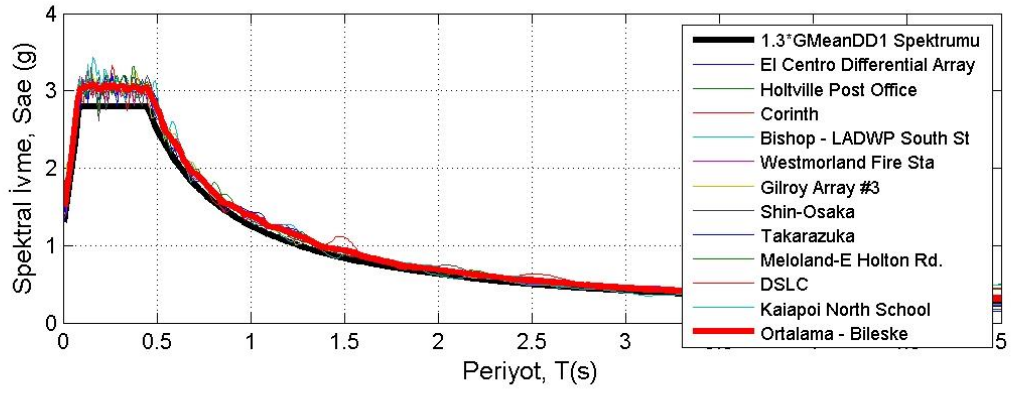


8.5. DD1 Seviyesi Depremleri - Gömme Derinliği

Tez kapsamında hazırlanan modellerin farklı depremler altında nasıl davranacağını araştırmak adına, TBDY 2018 Bölüm 2.5.1 altında belirlenen şartlar dikkate alınarak 11 adet deprem seçilmiş ve DD-1 seviyesi için ölçeklendirilip çift yönlü olarak analizlerde modele taban seviyesinden etki ettirilmiştir (Tablo 8.9). $H_N=61$ m olan modeldeki binanın Bina Yükseklik Sınıfı, $BYS=3$ olmakta, Bina Önem Katsayısı, $BKS=3$ ve ZD sınıfı ($V_s=250$ m/s) için deprem kuşağında bir nokta tdth.afad.gov.tr adresinden seçildiğinde $S_{DS}>0.75$ olmakta ve buna bağlı olarak $DTS=1$ bulunmaktadır. TBDY 2018 Bölüm 16C.2.1'de Yöntem I – Kapsam başlığı altında $DTS=1$ değeri için DD-1 deprem yer hareketi tanımlanmıştır.

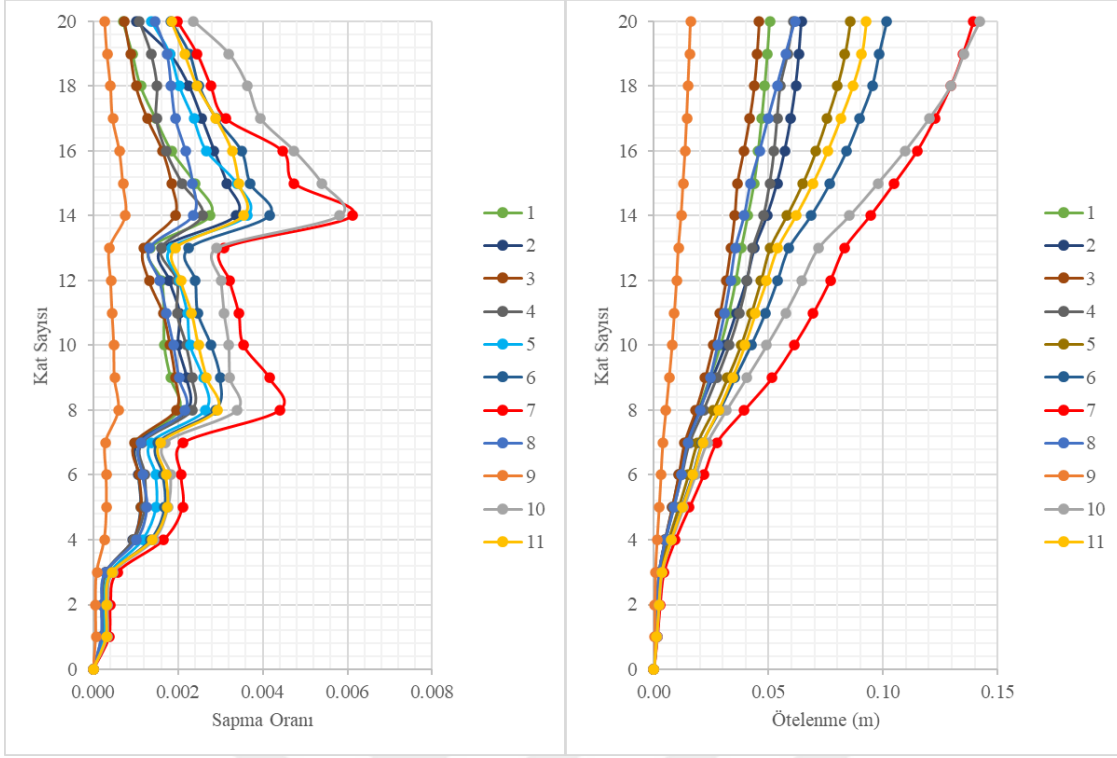
Tablo 8.9 11 Adet DD1 Seviyesi Depremin Bilgileri

Deprem Yılı	(Mw)	Fay Mekanizma	İstasyon	En Yakın Mesafe (km)	V_{s30} (m/s)
Kobe_ Japan (1) 1995 (RSN1119)	6.9	Doğrultu atımlı	Takarazuka	0.27	312
Kobe_ Japan (2) 1995 (RSN 1116)	6.9	Doğrultu atımlı	Shin-Osaka	19.15	256
Corinth_ Greece (3) 1981 (RSN 313)	6.6	Normal verev atımlı	Corinth	10.27	361.4
Chalfant Valley-02 (4) 1986 (RSN 549)	6.19	Doğrultu atımlı	Bishop - LADWP South St	17.17	303.47
Loma Prieta (5) 1989 (RSN 767)	6.93	Ters verev atımlı	Gilroy Array #3	12.82	349.85
Imperial Valley-06 (6) 1979 (RSN 184)	6.53	Doğrultu atımlı	El Centro Differential Array	5.09	202.26
Imperial Valley-06 (7) 1979 (RSN 185)	6.53	Doğrultu atımlı	Holtville Post Office	7.5	202.89
Superstition Hills-02 (8) 1987 (RSN 728)	6.54	Doğrultu atımlı	Westmorland Fire Sta	13.03	193.67
El Mayor-Cucapah_ Mexico (9) 2010 (RSN 5988)	7.2	Doğrultu atımlı	Meloland_E Holton Rd.	30.63	196
Darfield_ New Zealand (10) 2010 (RSN 6897)	7	Doğrultu atımlı	DSLÇ	8.46	295.74
Darfield_ New Zealand (11) 2010 (RSN 6923)	7	Doğrultu atımlı	Kaiapoi North School	30.53	255

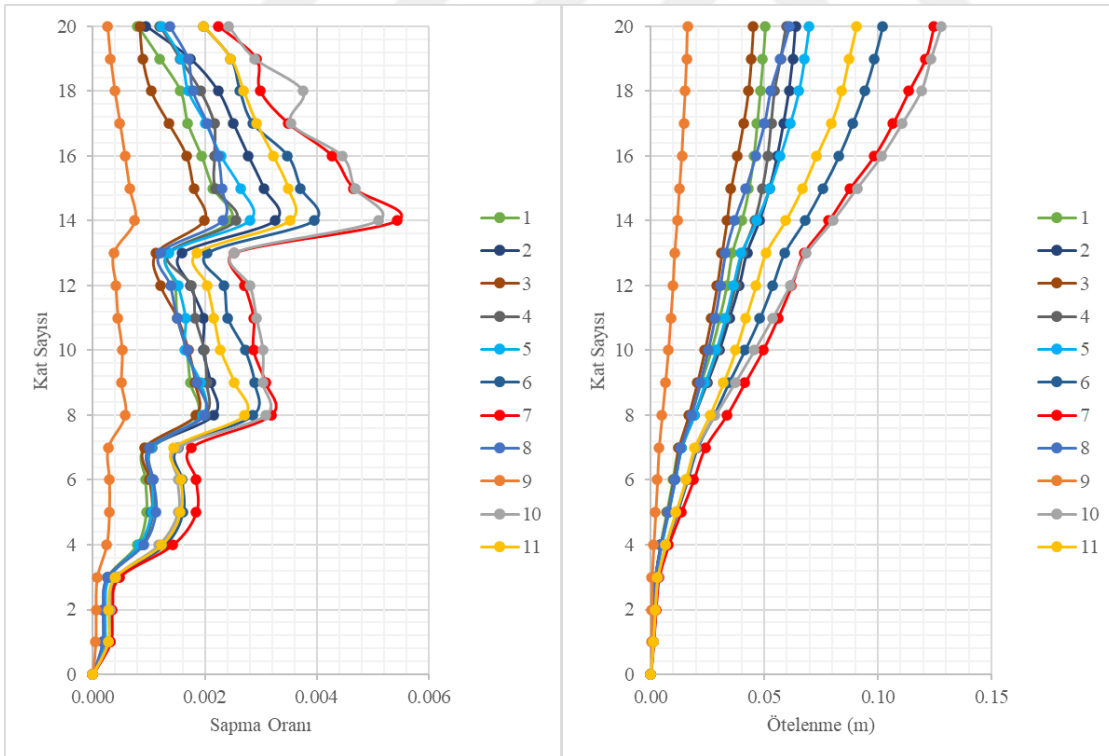


Şekil 8-70 Ölçeklendirilmiş İvme Spektrumları ve Deplasman Spektrumları

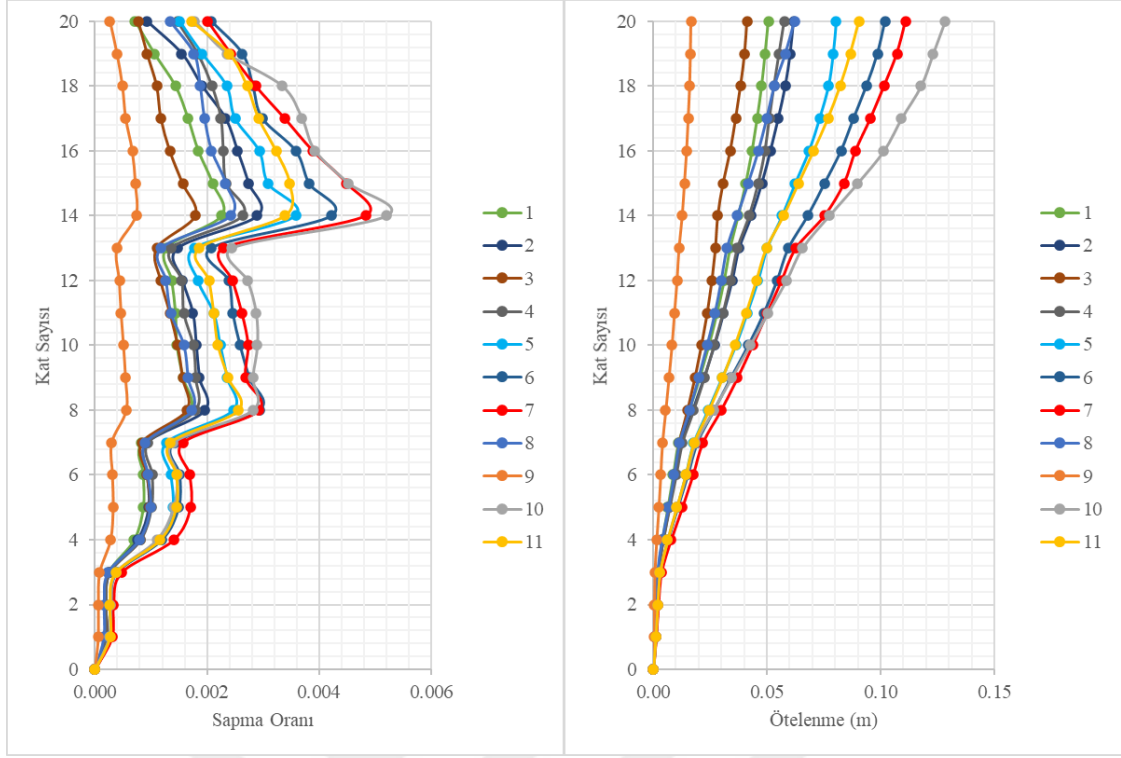
Bu depremler önceki bölümlerdeki mantık ve sistematik dikkate alınarak sisteme modelin hiçbir özelliği değiştirilmeden ve $V_s=250$ m/s model parametreleri kullanılarak uygulanmıştır. Sonuçlar aşağıdaki grafiklerde paylaşılmıştır.



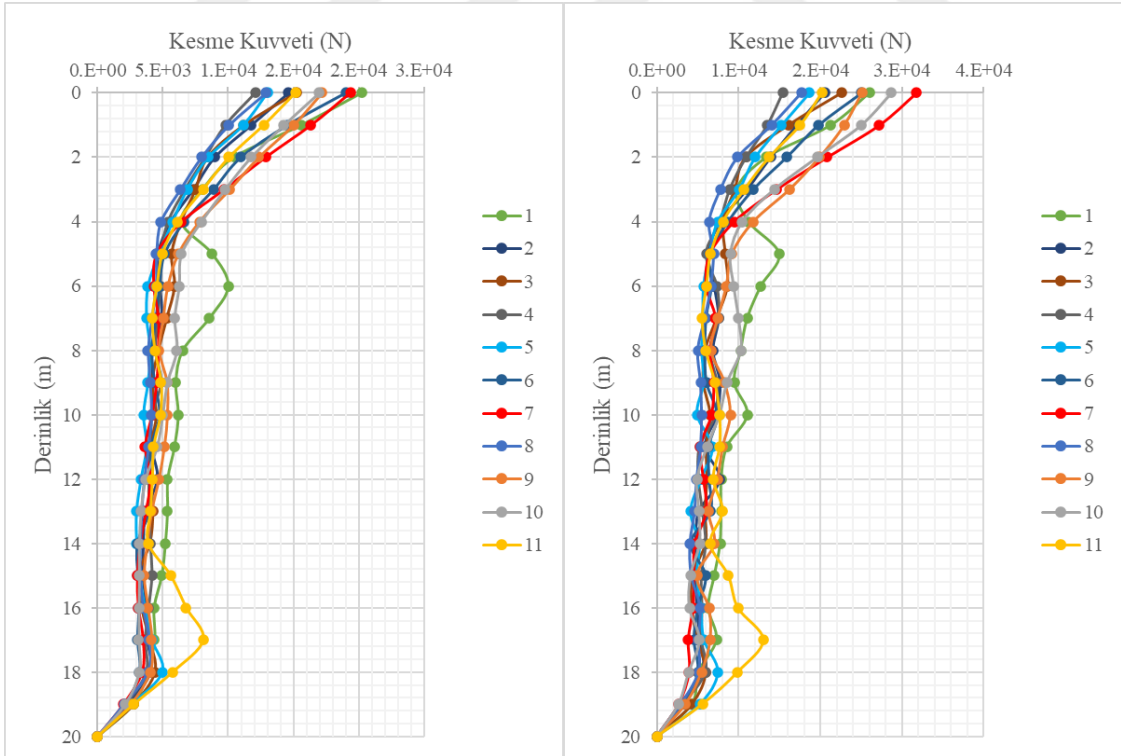
Şekil 8-71 Df=3m için Ötelenme ve Sapma Oranı değişimleri



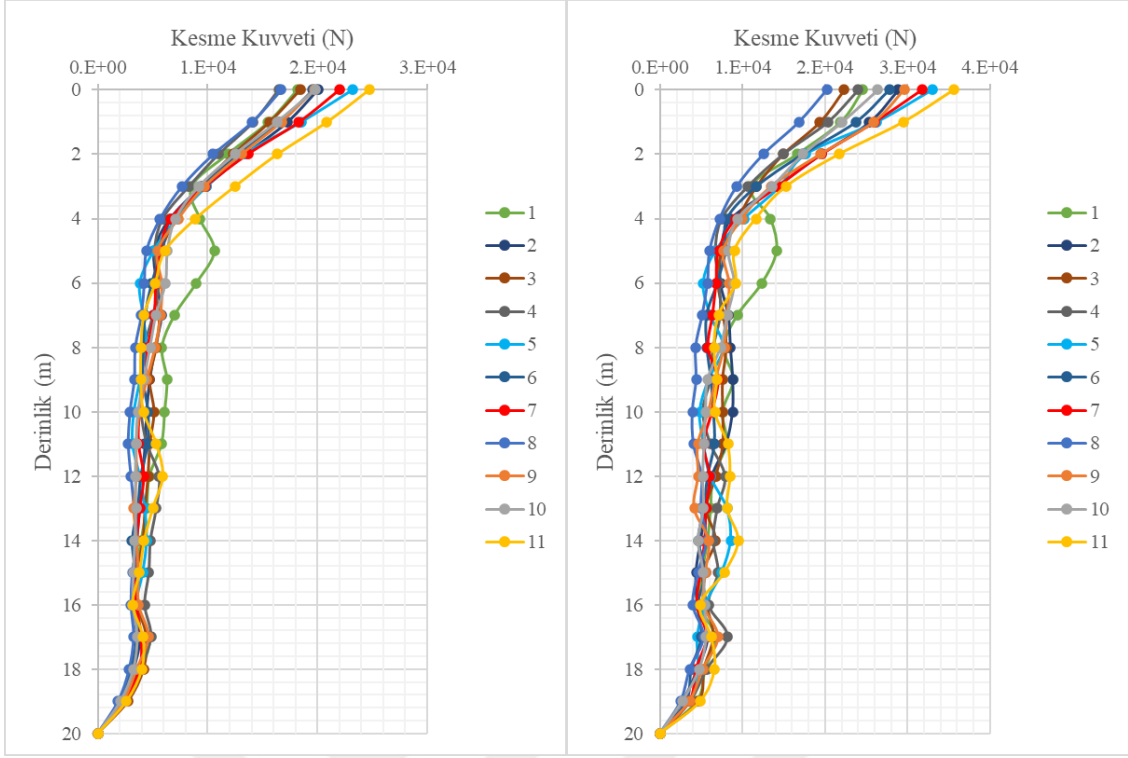
Şekil 8-72 Df=9m için Ötelenme ve Sapma Oranı değişimleri



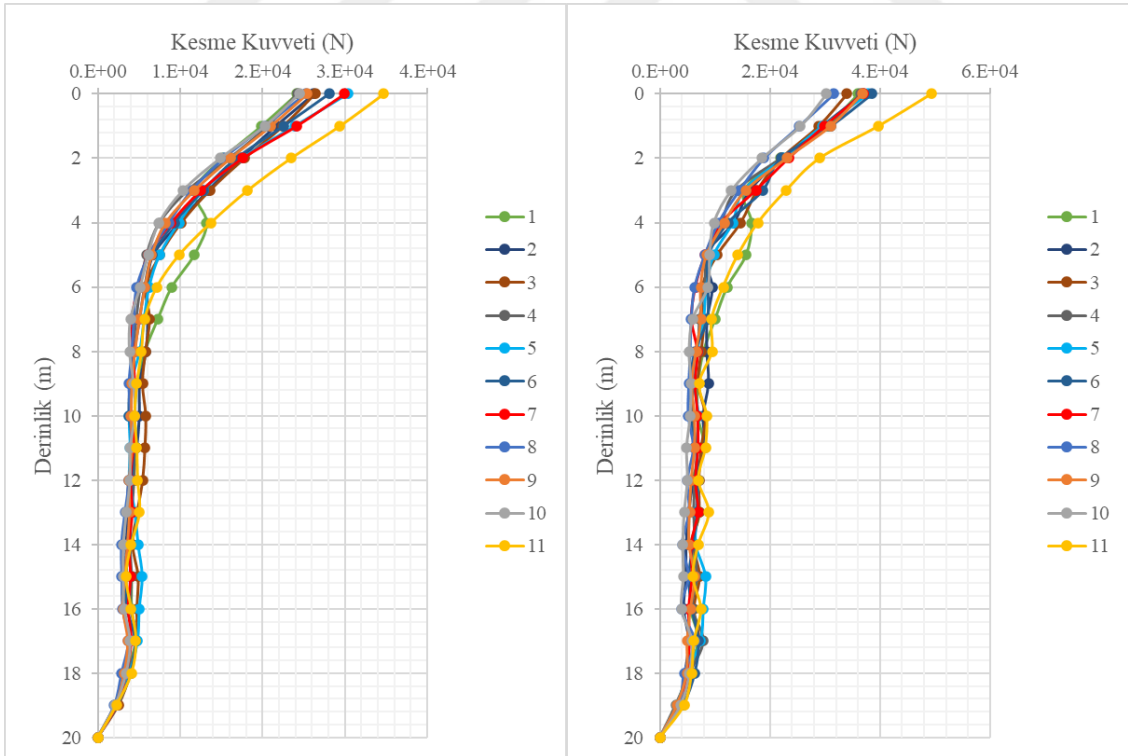
Şekil 8-73 Df=15m için Ötelenme ve Sapma Oranı değişimleri



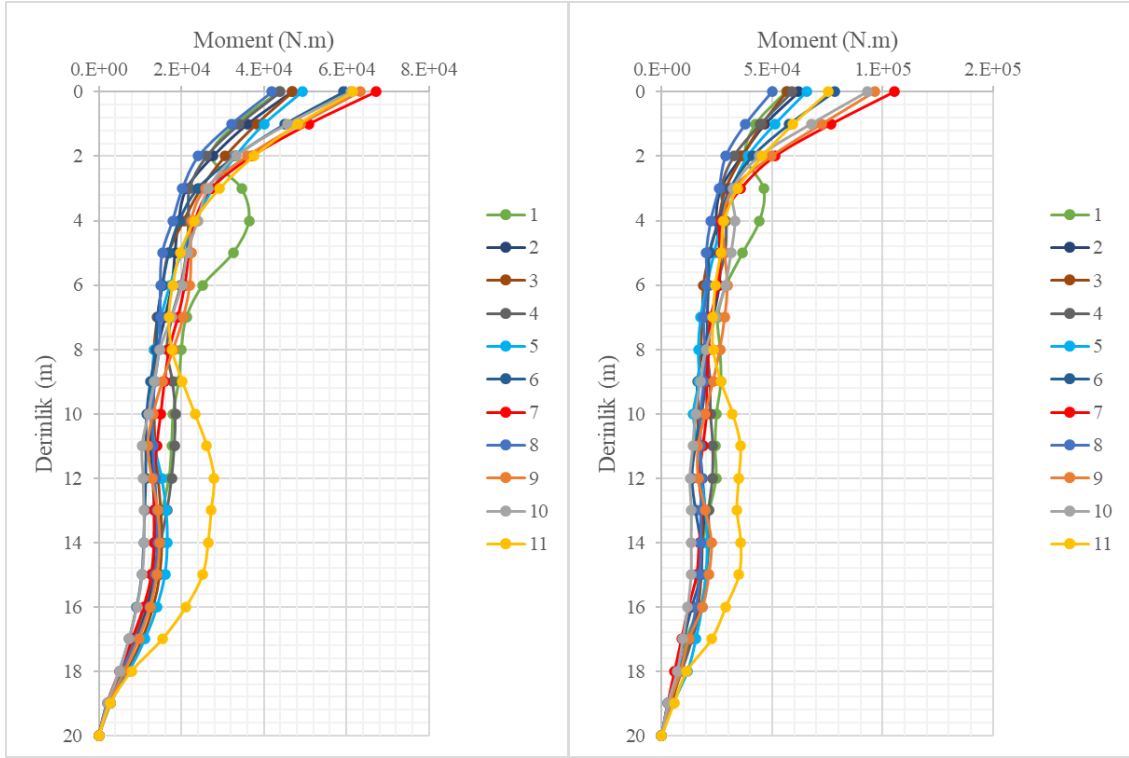
Şekil 8-74 Df=3m için Kesme Kuvveti değişimleri



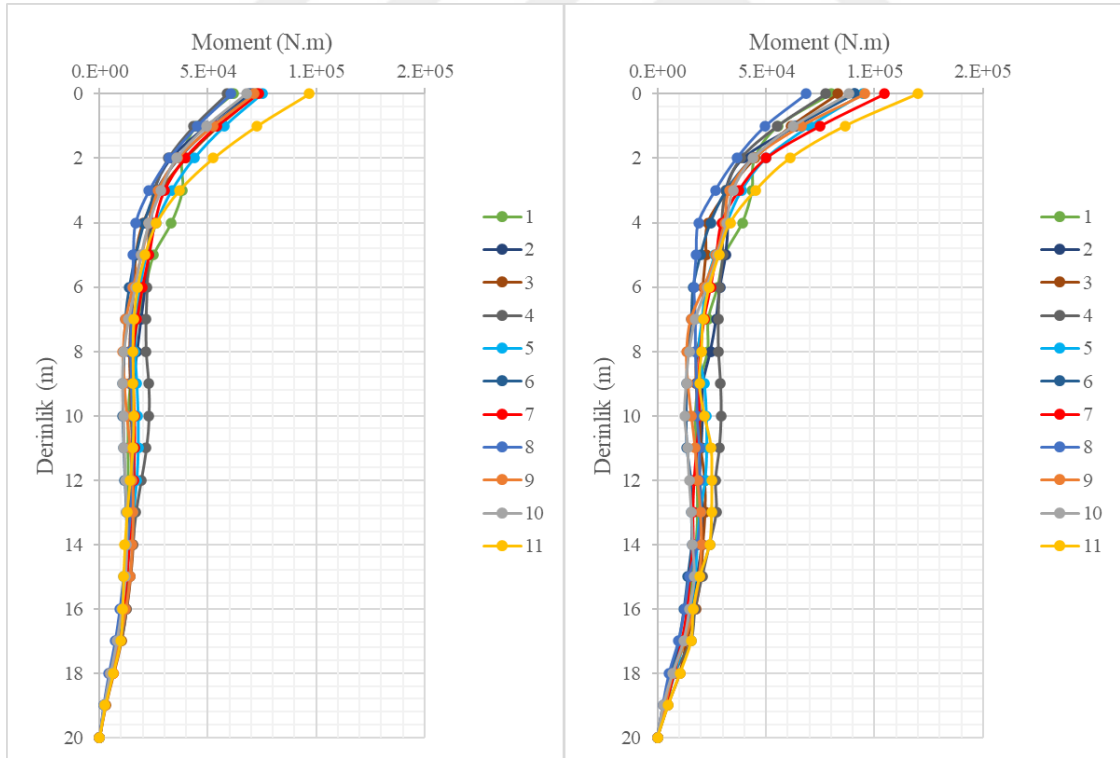
Şekil 8-75 Df=9m için Kesme Kuvveti değişimleri



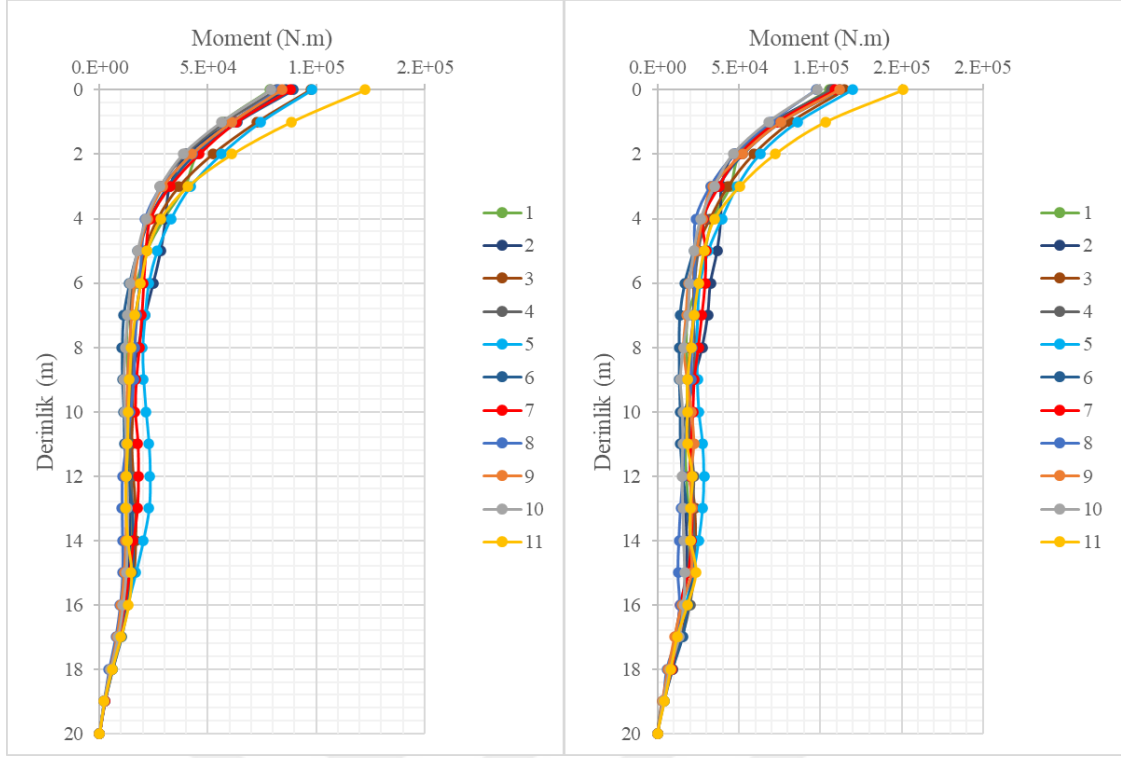
Şekil 8-76 Df=15m için Kesme Kuvveti değişimleri



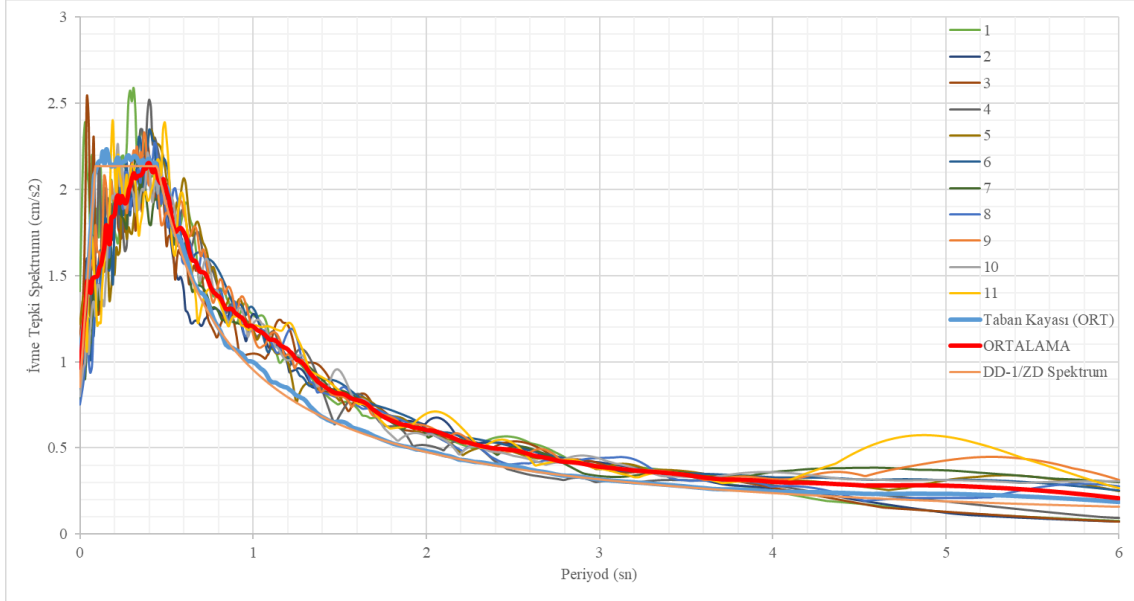
Şekil 8-77 Df=3m için Kazık Moment değişimleri



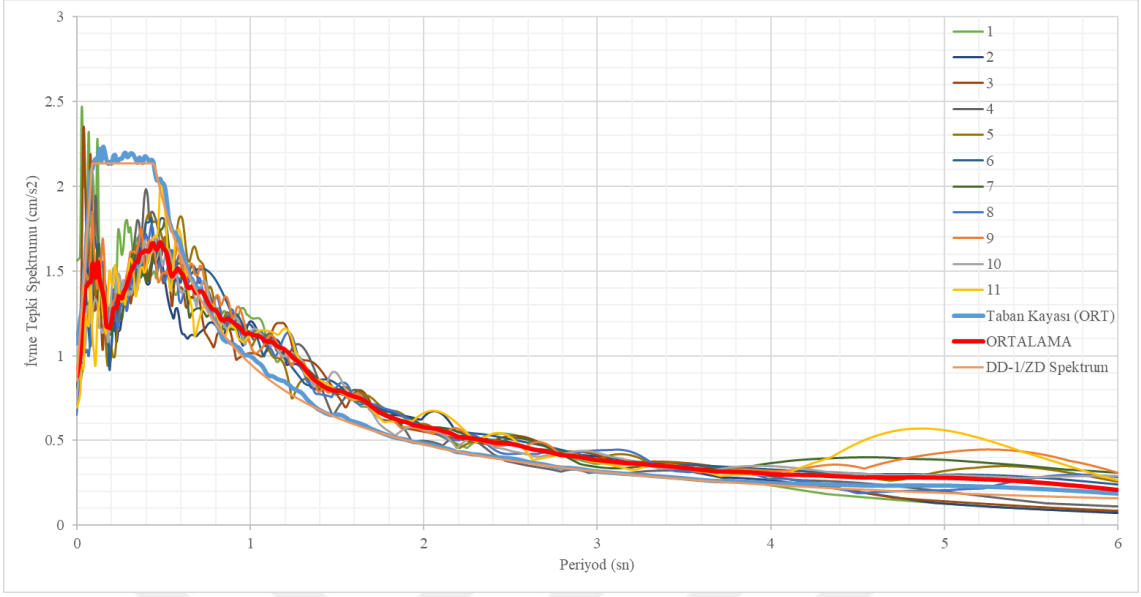
Şekil 8-78 Df=9m için Kazık Moment değişimleri



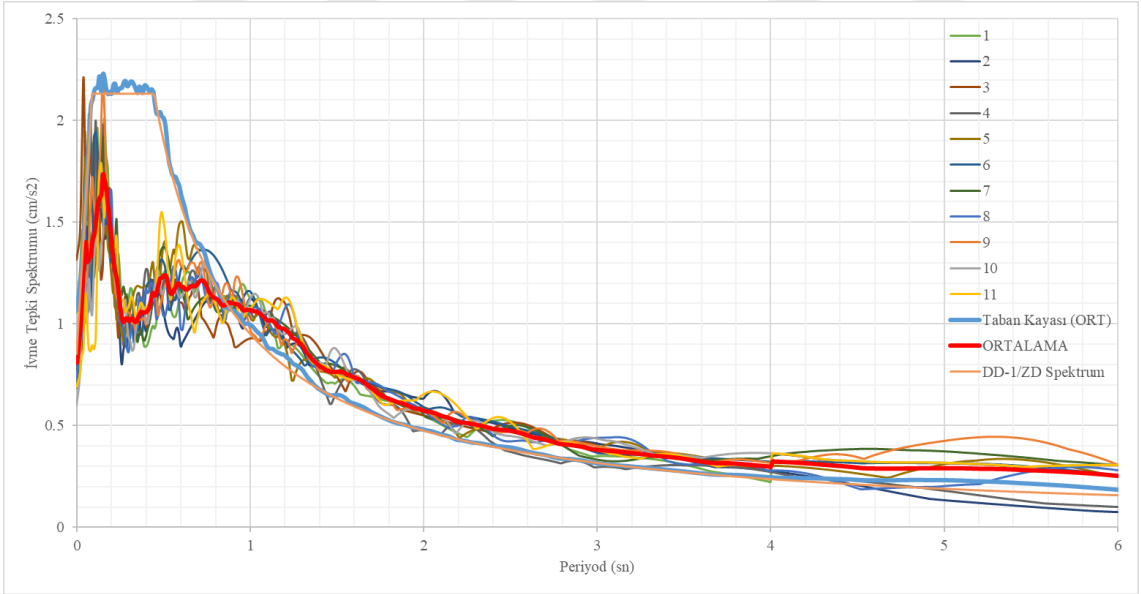
Şekil 8-79 Df=15m için Kazık Moment değişimleri



Şekil 8-80 Df=3m için Temel Seviyesi İvme Spektrum Eğrileri



Şekil 8-81 Df=9m için Temel Seviyesi İvme Spektrum Eğrileri



Şekil 8-82 Df=15m için Temel Seviyesi İvme Spektrum Eğrileri

9. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, yumuşak zemin üzerinde temellendirilen yüksek yapıların (BYS=1) artması, Dinamik Yapı-Kazık-Zemin etkileşiminin deprem yönetmeliğinde (TBDY, 2018) kendine yer bulmasına rağmen bu konuda yapılan 3B Modellerin (Direkt, Alsistem) analizlerinin mühendislik pratiğinde kullanılabilirliği bir yöntem arayışında olunması amacıyla hem modelleme aşamalarının basitleştirilebilirliği araştırılmış, bu araştırma sırasında gömme derinliği, zemin rijitliği, deprem ivme genliği değişiminin üstyapı davranışı ve kazıkların tasarımında etkin olan iç kuvvetleri ne kadar etkileyeceği ayrıca araştırılmıştır. Yapı-Kazık-Zemin etkileşiminin uzun yıllardır araştırılıyor olmasına rağmen bu alandaki çoklu-disipliner öğelerin (Geoteknik, Zemin Dinamiği, Yapı Dinamiği, Güçlü Yer Hareketi) hazmedilmesinin yoğun bir emek istemesi ve teknolojideki bu akıl almaz gelişmeye rağmen YKZE'nin kavranabilmesi için halen karar verici olarak büyük oranda insan aklına ihtiyacı olmasından ötürü üstüne ciddiyetle eğilinilmesi, bu konuyla ilgili detaylı çalışmaların yapılması ve bu çalışmaların yapılabilmesi için ortak akıla ihtiyaç duyulmasının bilincinde olan tezin yazarı, bu eksikleri bir nebze de olsa giderebilmek ümidiyle yola çıkmıştır. Aşağıda bu konuyla ilgili bulgular ve ileri çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

- Kullanılan Kocaeli 1999 Depreminin Yarımca İstasyonundan alınan deprem kaydının enerjisinden ötürü düşük zemin ortamı parametrelerine sahip olan modellerde analiz çıktıları, zemin ortamının rijitliğini kaybetmesinden ve Flac3D'nin açık (explicit) yöntemle çözüm yapmasından dolayısıyla deplasmanları dikkate almadan yüklemelere devam etmesi nedeniyle çok yüksek değerler elde edilmiştir. Gerçekçi sonuçlar olmadığı için grafiklere eklenmemiş fakat aynı zamanda bütün yapılan analizler tezin bütünselliği içerisinde dikkate alındığında, oluşturulan modelin etkililen deprem bağlamında dayanabileceği üst sınıra işaret etmektedir. Bölüm 8.5'te de görüleceği üzere, çift yönlü olarak uygulanan 11 farklı deprem etkisi altındaki 33 analiz sonucu da tez içerisinde kullanılan varsayımlarla oluşturulan modelin anlamlı sonuçlar ürettiğini gösterir niteliktedir.
- Kazıkların, zemin özelliklerinin değişimine bağlı olarak kazık içsel kuvvetlerinin değişimi incelendiğinde, görece daha rijit zeminlerde beklenildiği gibi içsel kuvvetler azalmaktadır. Fakat $V_s=250-350-450$ m/s olan zeminlerde, hemen hemen her deprem seviyesinde birbirine yakın sonuçlar verdiyse de $V_s=200$ m/s zemin özelliklerine göre

yapılan analizlerin bütün deprem seviyelerinde (0.2-0.4-0.6-0.8) diğer zeminlerden çok daha yüksek sonuçlar vermesinin düşük gerilme değerlerinde bile zeminin aşırı deformasyon göstermesine bağlı olarak kazık kuvvetlerinin çok yüksek olmasıyla açıklanmaktadır. Bunun sebebinin yumuşak zeminlerdeki, dinamik zemin davranışının etkisinin çok daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca $V_s=250$ m/s olan zeminlerden itibaren ise bu etkileşimin düştüğü çıkarılabilir. Bu aynı zamanda şu anlama gelmektedir: Herhangi bir zemin iyileştirmesi uygulanıp (Jet Grout – Enjeksiyon vb.) zeminin kayma dalgası hızı (V_s) artırıldığında, zemin tepki davranışının ivmeler açısından daha düşük mertebelerde olacağı ve kazık içsel kuvvetlerini dramatik bir şekilde düşeceği söylenebilir. Bu analizlerden elde edilen bir başka bulgu ise, $V_s=200$ m/s zemin ortamı özelliklerine sahip modellerde (D) ve (K) durumları karşılaştırıldığında genellikle Üstyapının varlığı kazıklardaki içkuvvetleri azaltan yönde olurken, görece daha iyi zeminlerde ($V_s=250-350-450$ m/s) tam tersi bir davranış göstermekte ve iç kuvvetleri artırmaktadır. Buradan şu çıkarılabilir: görece yumuşak zeminlerde Direkt yöntemle analiz yapılmadığı durumlarda (temelin yüzeye yakın olduğu durumlarda) kazık iç kuvvetleri tasarım kuvvetlerinin üstünde kalabilir ve bu bağlamda yetersiz kesitten dolayı kazıklar stabilitesini kaybedebilir. Fakat DİÇ'nun artması ve buna bağlı olarak zemin ortamının yüksek deformasyon göstermeye (yenilmeye) başladığı mertebelerde ($V_s200/DİÇ=0.6$, $V_s250/DİÇ=0.8$, $V_s350/DİÇ=1$) (D) olması durumunda iç kuvvetleri azaltıcı yönde etkisi olacağı yönünde eğilimler ortaya çıkmaktadır. Genel olarak çıkarılan sonuç, analizlerde doğrusal olmayan davranışın başladığı durumlarda Üstyapının kazık iç kuvvetlerinde azaltıcı etkisi bulunmaktadır. Bu bağlamda elde edilen bilgiler ışığında ileri çalışmalar olarak çalışmanın daha dar aralıkta DİÇ değerleri (0.4-0.45-0.50-0.55-...) kullanılarak ve doğrusal olmayan zemin modelleri ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarının (D) ve (K) durumları için yeniden değerlendirilmesi önerilmektedir.

- Gömme derinliği arttıkça (bodrum sayısı arttıkça) kazıklarda oluşan içsel kuvvetler genel olarak grafiklerde azalma (3-6-9m) eğiliminde gözükse de 12 m ve 15 m gömme derinliğine sahip modeller ve Yüzeysel temel modeli grafiklerde saçılım davranışına yol açmaktadır. Üstyapının olduğu (D) ve olmadığı (K) analiz çıktılarının grafiklerindeki genel davranış incelendiğinde, (K) durumunda kazık üst kotundan itibaren 6m derinliğe kadar eğriler birbirlerinden uzaklaşmakta fakat daha derinlere inildikçe grafikleri üst üste gelmektedir, değerler birbirine yakınsamaktadır. Fakat bu olgu, (D) durumunda

değişmekte ve grafikler birbirlerinden uzaklaşmaktadır. Bu durum, Direkt Yöntemle yapılan analizlerde binadan geri yansıyan dalgaların zemin ortamından gelen dalgalarla girişim yapmasından ötürü kazık içsel kuvvetlerini değiştirmesi yönünde yorumlanmıştır. Ayrıca her bir DİÇ için Gömme Derinliğine bağlı olarak iç kuvvet değişimleri grafikleri incelendiğinde, DİÇ'nun yüksek olduğu durumda (0.6) Üstyapının modelde bulunması derinlik arttıkça kazık iç kuvvetlerini azaltırken, bulunmaması iç kuvvetleri artırmakta ya da kayda değer bir değişiklik yapmamaktadır. Gömme derinliğinin etkisi kazık iç kuvvetlerinde belirgin bir şekilde çıkarsanabilirken, Üstyapıda etkisi bu çalışmada modellenen bina için bulunmamaktadır. Daha düşük periyodlara sahip yapılar modellenerek YKZE'nin Üstyapı davranışına etkileri belirgin bir şekilde ortaya çıkarılıp incelenebilir. İleri çalışma olarak bu etkilerin hangi düzeyde olacağının bilgisinin, farklı zemin tipleri ve yapı yükseklikleri için analizler gerçekleştirilerek ortaya çıkarılabileceği düşünülmektedir.

- Zemin parametrelerinin değişimine göre temel orta noktasında oluşan ötelenmelerin tabloları incelendiğinde (Tablo 8.5-8.6), (D) ve (K) durumları arasında zemin değişimi etkilenmemekte fakat sadece $V_s=200\text{m/s}$ zemin ortamına sahip model için (D) ve (K) farklılığından etkilenmektedir. Bunun sebebinin, görece yumuşak zemin özelliklerine sahip ortamlarda (ZD) YKZE'nin, TBDY 2018'de *Yüksek Bina* olarak belirlenen $DTS=1, 1a, 2, 2a$ için yüksekliği $H_N>70$ m kategorisine girmeyen bu tezdeki modelde ($H_N=61$ m) dahi etkin olduğu, (D) durumu ile (K) durumu temel orta noktasındaki oluşan en büyük deplasman farkıyla (10 cm) anlaşılabilir. Bu bulgular ışığında 'Bina Yüksekliğinin (H_N) değişiminin bu durumu ne kadar etkilediği yazar tarafından ileri çalışma olarak önerilmektedir.
- Kat ötelenmeleri ve Sapma oranlarının (*Drift*) grafikleri (Şekil 8.41-44) DİÇ'nun değişimine bağlı olarak incelendiğinde, beklendiği gibi DİÇ arttıkça ötelenmeler ve sapma oranları artmaktadır. Bu durum, doğrulanma analizleri haricinde sistemin kendi içerisinde de tutarlı olduğunu göstermektedir. DİÇ- V_s değişimlerine göre olan grafikler (Şekil 8.45-49) incelendiğinde ise, görece daha düşük zemin özelliği ortamına sahip ($V_s200-250$) modellerde ötelenmeler ve sapma oranları daha düşük çıkmaktadır. Bu durumun yumuşak zeminlerdeki sönümün artmasından dolayı kaynaklandığı ve buna bağlı olarak da yapı sistemi içerisindeki elemanlarda (kolon-kiriş) oluşan iç kuvvetlerin azalacağı bulgulanmıştır fakat bunun mertebesinin tasarımda ne kadar etkisi olduğu

tartışılmalıdır. Ayrıca temel seviyesindeki ivme spektrumları incelendiğinde, $DİÇ=0.6$ için (D) ve (K) durumları karşılaştırıldığında Vs200 için (D) durumunda (K) durumuna göre daha düşük değerlere sahip ivme spektrumu elde edilmiştir. Üstyapı olduğu durumda kazıklardaki iç kuvvetler üstyapının olmadığı duruma göre daha yüksek çıkmakta fakat İvme Tepki Spektrumundaki ivme genliğini genel olarak bütün periyodlarda azaltmaktadır. Bu saptamalar nezdinde, ileri çalışmalar olarak altsistem yönteminin kapsamında yapılan eylemsizlik etkileşimi hesabı sonucunda elde edilebilecek iç kuvvetler, ortak sistem yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak bir bağıntı olup olmadığı ve aradaki uyumun sağlanıp sağlanmadığının araştırılması önerilmektedir.

- Zemin ortamı özelliği değişimine bağlı olarak dinamik analizler sonucu temel seviyesinde oluşan tepki spektrumu grafikleri (Şekil 8.50-59) incelendiğinde, Vs değerleri azaldıkça zemin ortamındaki sönümden ötürü spektral ivme değerleri azalmakta fakat yaklaşık $T=1$ değerinden büyük değerlerde ivme değerleri artmaktadır. $DİÇ$ arttıkça yüksek periyodlardaki ivmeler de artmakta, genel olarak her bir Vs değeri için hesaplanan ivme spektrumları düşük periyodlardaki ivmelerde düşüş, yüksek periyodlarda artış davranışı sergilemektedir. Bir önceki paragrafta da değinildiği üzere $DİÇ=0.6$ için (D) ve (K) durumlarının Vs200 sonuçları karşılaştırıldığında (D) durumunda YKZE'den ötürü spektral ivme değerlerinin genel olarak düştüğü söylenebilse de aynı mantıkla $DİÇ=0.8$ sonuçlarında aynı davranış belirmemiştir. Fakat gömme derinliği değişimine bağlı olarak, temel seviyesi ivme spektrumlarının grafikleri incelendiğinde (Şekil 8.60-65) özellikle 3m-12m gömme derinliğine sahip analizlerde (D) durumunda $DİÇ=0.2-0.4$ mertebesinde de ivmelerde azalma bulgulanmıştır. Ayrıca gömme derinliği (Df) arttıkça spektral ivmelerde belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Gömme derinliğinin dikkate alınmaması durumunda, yaklaşık olarak $T=2$ sn mertebelerine kadar kinematik etkileşim analizlerinin çıktılarında biri olan temel seviyesi ivme spektrumlarında büyük farklara yol açacağı fakat daha yüksek periyodlarda bir etkisinin olmayacağı bulgulanmıştır.
- 11 adet DD-1 Seviyesinde ölçeklendirilen depremler kullanılarak, 3 farklı gömme derinliği için yapılan (D) durumundaki analiz sonuçları incelendiğinde, (1) numaralı depremin manyitüdü yüksek ($M_w=6.9$) ve mesafesi en yakın (0.27 km) olan deprem yer hareketi olmasına rağmen en düşük manyitüde sahip ($M_w=6.19$) depremden (4) daha

düşük ötelenme ve sapma oranı bulgulanmıştır. Fakat kazıklarda oluşan iç kuvvetler karşılaştırıldığında tam tersi değerler bulgulanmıştır. Aynı şekilde yine (3) numaralı deprem verisi kullanılarak yapılan analiz sonuçları grafiklerde incelendiğinde en düşük sapma oranı ve ötelenme değerlerine sahipken, kazık iç kuvvetleri açısından genel oranla daha yüksek değerlere sahip olduğu gözükmektedir. En bariz sonuç ise (9) numaralı en yüksek manyitüde sahip yer hareketinin analizi sonucunda en düşük Sapma Oranı ve Ötelemelere ve fakat en yüksek kazık iç kuvvetlerine sahip çıktılar incelendiğinde görülebilir (Gömme derinliğinin artmasıyla bu fark azalmaktadır). (10) numaralı yer hareketinin analiz sonuçları incelendiğinde, diğer deprem yer hareketlerine göre Sapma oranı ve Ötelenmeleri en yüksek değerleri analiz sonuçları verse de Kazık iç kuvvetleri diğer deprem yer hareketlerine görece daha düşüktür. Fakat (7) numaralı görece en düşük manyitüde sahip olan deprem hareketinin sonuçları incelendiğinde en yüksek Sapma Oranı, Ötelenme ve Kazık İç Kuvvet sonuçları elde edilmektedir. Bu sonuçlardan, Yapı-Kazık-Zemin sisteminin bütün olarak davranışının, gelen deprem hareketi frekans içeriğine bağlı olarak, zemin ortamının doğal frekansıyla kazık sisteminin doğal frekansının farklı frekansta olması durumunda kazıkların direnç göstererek oluşan iç kuvvetlerin artışına yol açtığı, aynı frekansta olduğu durumda ise zemin-kazık ortamı doğası gereği dalga içeriğini en kayıpsız şekilde (rezonans) direnç göstermeden üstyapı sistemine iletmesi nedeniyle ötelenmelerin fazla oluşu çıkarsanmaktadır. Özet olarak yapı-kazık sistemi, girdi hareketi dolayısıyla titreşen zemin ortamına direndiğinde kazıklarda iç kuvvetler artmakta, direnmediği durumda kazıklar esnek hareket etmekte fakat bu durum üstyapıdaki yerdeğiştirmeleri artırmaktadır. Bu durum Baziar'ın (2018) çalışmalarıyla da uyumlu niteliktedir. Bu bağlamda, ölçeklendirilmiş ve belirli bir deprem seviyesiyle uyumlu hale getirilmiş bile olsa farklı depremlerin seçilmesinin önemi bulgulanmıştır. İleri çalışma olarak (K) durumundaki kazık iç kuvvet sonuçları (D) durumları ile karşılaştırılıp doğrulanması sağlanmalıdır.

- Doğrulama analizleri için yapılan Serbest Zemin modeli karşılaştırması (DeepSoil – Flac3D) incelendiğinde, Deepsoil ve Flac3D yüzey spektral ivmelerinin her zemin modeli için ($V_s=150-250-350-450\text{m/s}$) sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu bulgulanmıştır. Bu modellerin karşılaştırılmasının yapılması için deprem ivmesi tek yönlü (YPT_FN) olarak sisteme etki ettirilmiştir. Fakat tez içeriğindeki aynı zemin özelliklerine sahip, deprem ivmesinin *çift yönlü olarak* (YPT_FN, YPT_FP) etki

ettirildiği modellerdeki analiz sonuçları incelendiğine (D_1, K_1), analizlerin ırsadığı ve çok yüksek değerler (Moment, kesme kuvveti ve deplasmanlar) verdiği bulgulanmıştır. Buradan ıkarılan sonuç, eğer deprem ivmesi tek yönlü uygulanırsa makul sonuçlar elde edilebileceği fakat yanlış sonuçlar elde edilebileceği yönündedir. TBDY 2018’de de bahsedildiği üzere sistemlere deprem etkisinin çift yönlü olarak uygulaması gerçekçi sonuçlar elde edilmesi için bir zorunluluk olduğu düşünülmektedir.

- Bu tez çalışmasının devam ettiği süreç içerisinde 30 Ekim 2020 İzmır-Seferihisar açıklarında, merkez ss Sisam adası olan, Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) verilerine göre manyitüdü $M_w=6.6$, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü verilerine göre manyitüdü $M_w=6.9$ olan bir deprem meydana gelmiştir. Can kayıplarının olduğu (115 vatandaş) bu depremin merkez üssünden 70 km uzaklıkta bulunan İzmır’in Bayraklı ilçesinde meydana gelen yapısal hasarlar bağlamında, bu tez kapsamında yapılan çalışmaların da (YKZE) nemi ortaya çıkmaktadır. Bayraklı’da yer alan 3513 nolu istasyondan ($V_{s30}=196$ m/s) alınan veriler incelendiğinde yumuşak zeminde 1.5 sn’ye kadar periyod uzaması sonucu spektral ivme genliği artmıştır. Bundan dolayı çeşitli İzmır-Seferihisar Deprem Raporlarında da (ODTÜ, İT, AYBÜ, 2020) belirtildiği üzere yer hareketinin sarsıntı bileşenin, doğal periyot aralığı 0.7-1.5 sn’ye denk gelen binalarla (7-10 katlı) rezonansa girmesiyle ağır hasarlar ve can kayıpları meydana gelmiştir. şimdiye kadarki uygulamada bulunan herhangi bir Deprem Yönetmeliğine (1975, 2007, 2019) uygun olarak tasarlanrsa ve en olumsuz durumlar dikkate alınsa dahi tasarım ivme spektrumu, zemin ortamından kaynaklanan periyod uzatma (*period lengthening*) sonucu artan ivmelerin üstünde kalmaktadır. Yapısal hasarların sebebinin, tasarımdaki eksiklikler, kötü malzeme kullanımı ve sıklıkla görülen ek kat çıkılması gibi sebeplerden kaynaklandığı raporlarda belirtilmektedir. Bu çalışmalardan da elde edinilen sonuçlara göre Sahaya zel Zemin Davranış analizlerinin dikkate alınarak yapıldığı YKZE’nin, Deprem Kuşağında bulunan ülkemizin bu konuyu önemle dikkate alması ve bununla ilgili çalışmaların artırılması için gerekli mühendislik kültürünün oluşturulması gereklidir.

Böylelikle yapılan bu çalışmalar sonucunda yazarın eriştiği bilgiler ve anlayışlar sonucunda genel itibariyle YKZE'nin detaylı bir şekilde incelenmesinin sadece bu konu düzleminde bir eylem olmadığı, mühendislik seviyesini de toplumsal düzeyde ilerletecek çoklu-

disipliner bir konu olduğu benimsenmiştir. Bu konunun daha çok aydınlığa kavuşması hem mühendislik kalitesini artıracadı hem de inşaat mühendisliği alanının ufkunu genişleteceği düşünülmektedir. Toplumsal bazda da sadece bu konu özelinde bile hizmet vermek ve regülasyonları uygulanabilir hale getirmek, İnşaat Mühendisliği alanının saygınlığını artıracak eylemler bütünlüğünü oluşturacaktır. Bu da aynı zamanda topluluk olarak bizi dünyadaki İnşaat Mühendisliği alanına bilimsel olarak daha çok katkı veren bir konuma yükseltecektir.



10.KAYNAKÇA

- Aydınoglu, M.N.** (2011). A Practical Method for Dynamic Structure-Soil-Pile Interaction on Weak Soils. Bogaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Department of Earthquake Engineering, Report No: 2011/1 (in Turkish).
- Okabe, S.**, “General Theory of Earth Pressure,” Jour. of the Japanese Society of Civil Engrs, Tokyo, Japan (1926).
- Mononabe, N. and Matsuo, H.**, “On the Determination of Earth Pressure During Earthquakes,” Proc. of the World Eng. Conf., Vol. 9, p. 176 (1929).
- Martel, R. R.**, “Effect of Foundation on Earthquake Motion,” Civil Engineering, Jan. (1940).
- Reissner E.**, “Stationäre axialsymmetrische durch eine schüttelnde masseerregte schwingungen eines homogenen elastischen halbraumes. Ingenieur - Archiv 1936;7(6):381–96.
- Merritt, R. G. and Housner, G.W.**, “Effects of Foundation Compliance on Earthquake Stress in Multi-Story Buildings,” Bull. SSA, Vol. 44, No. 4, pp. 551-570 (1954).
- Housner, G. W.**, “Interaction of Building and Ground During an Earthquake,” Bull. S.S.A., Vol. 47, No. 3, pp. 179-186 (1957).
- Biggs, J. M.**, Introduction to Structural Dynamics, Mc Graw & Hill (1964).
- Kausel, E.**, “Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media,” Sc. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1974).
- Whitman, R. V.**, “Soil-Structure Interaction,” Seismic Design for Nuclear Power Plants, edited by Robert J. Hanson, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. (1970).
- Seed HB.** “Soil–structure interaction analysis for seismic response”. ASCE 1975; 101(5):439–57.
- Vucetic, M. & Dobry, R.**. Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, 117:1, 87-107. (1991)
- Fan K, Gazetas G, Kaynia A, Kausel E, Ahmad S.** Kinematic Seismic Response of Single Piles and Pile Groups. J Geotech Eng 1991;117:1860–79
- Vaish, A. K. and A. K. Chopra.** “Earthquake Finite Element Analysis of Structure-Foundation Systems.” (1974)
- Seed HB, Idriss IM.** Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses [Report No. EERC 70-10] 1970:41.
- Luco, J. E. (1974).** Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium. Nuclear Engineering and Design, 31(2), 204–217. doi:10.1016/0029-5493(75)90142-93
- Kausel, E, and Roesset, J M.** Soil structure interaction problems for nuclear containment structures. United States: N. p., 1974. Web.
- Kausel, E.** Soil–structure interaction. Soil Dynamics for Earthquake Design. International Centre for Computer-aided Design (ICCAD), SantaMargherita, Italy. 1976
- Terzaghi, K. and Peck, R.** (1967) Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd Edition, John Wiley, New York.
- Blaney, G.W., Kausel, E. and Roesset, J.M.** (1976): "Dynamic Stiffness of Piles," Proc. of the 2nd International Conference on Numerical Methods
- Kuhlemeyer, R.L. (1979a):** "Vertical Vibration of Piles," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 273-287.
- Kuhlemeyer, R.L. (1979b):** "Static and Dynamic Laterally Loaded Floating Piles," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 289-304.

Matlock, H. (1970): "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay," Proc. of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Vol. 1, pp. 577-594.

API. (2000) Recommended Practice for Planning , Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design. Api Recomm Pract 2007;24-WSD:242.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974): "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand," Proc. of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Paper OTC 2080.

Reese, L.C. and Welch, R.C. (1975): "Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT7, pp. 633-649.

Novak, M. (1974): "Dynamic Stiffness and Damping of Piles," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 4, pp. 574-598.

Kim S, Stewart JP. Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings. J Geotech Geoenvironmental Eng 2003;129:323–35.

Chore, H.S. and Ingle, R.K. (2008 a) "Interaction analysis of building frame supported on pile group", Indian Geotech. J., 38(4), 483-501

Chore, H.S. and Ingle, R.K. (2008 b) "Interactive analysis of building frame supported on pile group using a simplified F.E. model", J. Struct. Eng. SERC, 34(6), 460-464.

Chore, H.S., Ingle, R.K. and Sawant, V.A. (2009) "Building frame- pile foundation- soil interactive analysis", Interact. Multiscale Mech., (4), 397-411

Chore, H. S., Ingle, R. K., & Sawant, V. A. (2010). Building frame - pile foundation - soil interaction analysis: a parametric study. Interaction and Multiscale Mechanics, 3(1), 55–79. <https://doi.org/10.12989/imm.2010.3.1.055>

Xilin Lu, Bo Chen, Peizhen Li & Yueqing Chen (2003) Numerical Analysis of Tall Buildings Considering Dynamic Soil-Structure Interaction, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2:1, 1-8, DOI: 10.3130/jaabe.2.1

Lu X, Li P, Chen B, Chen Y. Computer simulation of the dynamic layered soil-pile-structure interaction system. Can Geotech J 2005;42:742–51.

Boulanger RW, Curras CJ, Kutter BL, Wilson DW, Abghari A. Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses. J Geotech Geoenvironmental Eng 1999;125:750–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:9\(750\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(750)).

El - Marsafawi, H., Han, Y. C., & Novak, M. (1992). Dynamic Experiments on Two Pile Groups. Journal of Geotechnical Engineering, 118(4), 576 - 592. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1992)118:4(576)

Nikolaou, S., Mylonakis, G., Gazetas, G., & Tazoh, T. (2001). Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements. Géotechnique, 51(5), 425–440.

Lai CG, Martinelli M. Soil-Structure Interaction Under Earthquake Loading: Theoretical Framework. ALERT Dr Sch Soil-Structure Interact 2013:2013.

Di Laora, R., Mandolini, A., & Mylonakis, G. (2012). Insight on kinematic bending of flexible piles in layered soil. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43, 309–322.

Kavvads M, Gazetas G. Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil. Géotechnique 1993;43:207–22.

Maheshwari BK, Truman KZ, El Naggat MH, Gould PL. Three-dimensional nonlinear analysis for seismic soil–pile-structure interaction. Soil Dyn Earthq Eng 2004;24:343–56.

Hokmabadi AS, Fatahi B, Samali B. Assessment of soil–pile–structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations. Comput Geotech 2014;55:172–86.

Luo C, Yang X, Zhan C, Jin X, Ding Z. Nonlinear 3D finite element analysis of soil–pile–structure interaction system subjected to horizontal earthquake excitation. Soil Dyn Earthq Eng 2016;84:145–56.

- Hussien MN, Tobita T, Iai S, Karray M.** Soil-pile-structure kinematic and inertial interaction observed in geotechnical centrifuge experiments. *Soil Dyn Earthq Eng* 2016;89:75–84.
- Ullah MS, Yamamoto H, Goit CS, Saitoh M.** On the verification of superposition method of kinematic interaction and inertial interaction in dynamic response analysis of soil-pile-structure systems. *Soil Dyn Earthq Eng* 2018;113:522–33.
- Baziar MH, Rafiee F, Saeedi Azizkandi A, Lee CJ.** Effect of super-structure frequency on the seismic behavior of pile-raft foundation using physical modeling. *Soil Dyn Earthq Eng* 2018;104:196–209.
- Rahmani A, Taiebat M, Finn WDL, Ventura CE.** Evaluation of p-y springs for nonlinear static and seismic soil-pile interaction analysis under lateral loading. *Soil Dyn Earthq Eng* 2018;115:438–47.
- Zhang L, Liu H.** Seismic response of clay-pile-raft-superstructure systems subjected to far-field ground motions. *Soil Dyn Earthq Eng* 2017;101:209–24.
- Lysmer. J. and Kuhlemeyer, R.L.** (1969) Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 95, 859-878.
- Itasca** (2012). *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, FLAC 3D Version 5.0.* Itasca Consulting Group. www.itascacg.com
- Groholski, D. R., Hashash, Y. M. A., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., & Stewart, J. P.** (2016). Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(9), 04016042. doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001496
- Darendeli, M. B.** (2001). “Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.” Ph.D. thesis, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX
- Kausel E.** (2009) Early history of soil-structure interaction. *Soil Dyn Earthq Eng* 2010;30:822–32.
- Yang L.** *Seismic Soil-Structure Interaction In Performance-Based Design* by Yang Lu BEng , MSc 2016.
- Wolf, J.P.,** 1985. *Dynamic Soil–Structure Interaction.* Elsevier.
- Trifunac MD, Stewart JP, Fenves GL, Seed RB.** 2000 Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods; seismic soil-structure interaction in buildings. ii: Empirical findings. *J Geotech Geoenvironmental Eng* 2000;126:668–72.
- McGuire, W., and R. H. Gallagher.** (1979) *Matrix Structural Analysis.* New York: John Wiley & Sons Inc.
- Cook, R. D., D. S. Malkus and M. E. Plesha. (1989). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, Third Edition. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Nagtegaal, J. C., D. M. Parks and J. R. Rice.** (1974). “On Numerically Accurate Finite Element Solutions in the Fully Plastic Range,” *Comp. Meth. Appl. Mech. & Eng.*, **4**, 153-177
- Martin, G. R., W. D. L. Finn and H. B. Seed.** (1975) “Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading,” *J. Geotech., Div. ASCE*, **101**(GT5), 423-438
- Cundall, P. A., et al.** (1980) “NESSI – Soil Structure Interaction Program for Dynamic and Static Problems,” Norwegian Geotechnical Institute, Report 51508-9
- Phillips, C. and Hashash, Y.** (2009) “Damping formulation for non-linear 1D site response analyses” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 29, pp 1143–1158.
- ODTÜ,** 2020, “30 EKİM 2020 İZMİR-SEFERİHİSAR AÇIKLARI (SİSAM) DEPREMİ (MW 6.6) KEŞİF GÖZLEMLERİ ve BULGULAR” RAPOR NO: ODTÜ/DMAM 2020-03
- İTÜ,** 2020, İZMİR DEPREMİ DEĞERLENDİRME RAPORU,
- AYBÜ,** 2020, İZMİR SEFERİHİSAR DEPREMİ DEĞERLENDİRME RAPORU