

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK KATLI YAPILARDA YAPI-KAZIK-ZEMİN DİNAMİK  
ETKİLEŞİMİNİN İKİ BOYUTLU OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Deniz KURT**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK KATLI YAPILARDA YAPI-KAZIK-ZEMİN DİNAMİK  
ETKİLEŞİMİNİN 2 BOYUTLU OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Deniz KURT  
(501161309)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayfer ERKEN**

**HAZİRAN 2019**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161309 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Deniz KURT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK KATLI YAPILARDA YAPI-KAZIK-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİNİN İKİ BOYUTLU OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Ayfer ERKEN** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMÜR** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER** .....

Boğaziçi Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **03 Mayıs 2019**

**Savunma Tarihi** : **11 Haziran 2019**





*Eşime ve Aileme,*





## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince verdiği destek ve gösterdiği anlayıştan ötürü Sayın Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında göstermiş olduğu anlayış ve sonsuz destek için eşim Ezgi'ye ve eğitim hayatım boyunca her zaman arkamda olan ve beni cesaretlendiren aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Haziran 2019

Deniz KURT  
(İnşaat Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY .....	xxvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ ANALİZ YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>5</b>
2.1 Yapı-Zemin Etkileşimi .....	5
2.2 Yapı-Zemin Etkileşiminin Etkileri.....	6
2.2.1 Elastik zemin üzerine oturan tek serbestlik dereceli sistem için yapı-zemin etkileşimi .....	8
2.3 Yapı-Zemin Etkileşimi Analiz Yöntemleri .....	16
2.3.1 Yapı-zemin etkileşimi probleminin dinamik formülasyonu .....	16
2.3.2 Direkt yöntem (ortak sistem) .....	20
2.3.3 Alt sistem yöntemi .....	21
2.3.3.1 Kinematik etkileşim .....	22
2.3.3.2 Eylemsizlik etkileşimi.....	24
<b>3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİNE GÖRE YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ ESASLARI .....</b>	<b>29</b>
3.1 TBDY Genel Bilgiler .....	29
3.1.1 Deprem yer hareketi düzeyleri ve tasarım spektrumları .....	29
3.1.2 Deprem yer hareketlerinin seçilmesi ve ölçeklenmesi.....	35
3.1.2.1 Deprem yer hareketlerinin seçilmesi.....	35
3.1.2.2 Deprem yer hareketlerinin ölçeklenmesi .....	40
3.1.3 Yerel zemin sınıfı, bina kullanım sınıfı, bina yükseklik sınıfı ve deprem tasarım sınıfı kavramları .....	46
3.1.4 Sahaya özel serbest zemin davranış analizi .....	50
3.2 Yapı-Zemin-Kazık Etkileşim Analiz Yöntemlerinin Kapsamı .....	53
3.3 Yöntem I İle Etkileşim Hesabı .....	55
3.3.1 Yöntem I kinematik etkileşim hesabı.....	56
3.3.2 Yöntem I eylemsizlik etkileşimi hesabı .....	57
3.3.3 Ortak sistem yaklaşımı.....	58
3.4 Yöntem II İle Etkileşim Hesabı.....	61
3.4.1 Yöntem II kinematik etkileşim hesabı .....	61
3.4.2 Yöntem II eylemsizlik etkileşimi hesabı.....	65
3.4.3 Ortak sistem yaklaşımı.....	66
3.5 Yöntem III İle Etkileşim Hesabı .....	68

3.5.1 Yöntem III kinematik etkileşim hesabı .....	69
3.5.2 Yöntem III eylemsizlik etkileşimi hesabı.....	71
3.5.3 Ortak sistem yaklaşımı .....	73
3.6 Kazık Zemin Etkileşimi İçin Doğrusal Olmayan Zemin Yaylarının Tanımlanması.....	74
<b>4. YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNİN 2 BOYUTLU ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ.....</b>	<b>79</b>
4.1 Zemin Koşulları , Geoteknik Değerlendirme ve Tasarım Parametreleri.....	79
4.1.1 Saha araştırmaları .....	79
4.1.2 İnceleme alanının jeolojisi .....	80
4.1.3 SPT-N <sub>30</sub> değerleri .....	81
4.1.4 Jeofizik ölçümlerin değerlendirilmesi .....	83
4.1.5 Laboratuvar deney sonuçları .....	83
4.2 Sıvılaşma Riskinin Değerlendirmesi ve Alınacak Önlemler .....	86
4.3 Geoteknik Tasarım Parametreleri .....	89
4.4 Proje Bilgileri ve Planlanan Yapı .....	93
4.5 Deprem Hareketlerinin Seçilmesi ve Dönüştürülmesi .....	95
4.5.1 Deprem hareketlerinin seçilmesi .....	95
4.5.2 Deprem hareketlerinin dönüştürülmesi .....	97
4.6 Analiz Yaklaşımı ve Model Bilgileri .....	103
4.6.1 Analiz ve model bilgileri.....	103
4.6.2 Sonlu elemanlar modeli özellikleri .....	107
4.6.2.1 Model boyutları ve eleman sayısı.....	107
4.6.2.2 Malzeme modeli .....	108
4.7 Analiz Sonuçları .....	111
4.7.1 GAZ090 deprem kaydı ile analiz sonuçları.....	113
4.7.1.1 Yatay ivme kaydı ve tepki spektrumu değişimi .....	113
4.7.1.2 Zeminde oluşan kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyonu değerleri .....	122
4.7.1.3 Kazık moment ve kesme kuvveti değerleri .....	125
4.7.2 SHLCS50E deprem kaydı ile analiz sonuçları .....	131
4.7.2.1 Yatay ivme kaydı ve tepki spektrumu değişimi .....	131
4.7.2.2 Zeminde oluşan kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyonu değerleri .....	139
4.7.2.3 Kazık moment ve kesme kuvveti değerleri .....	141
4.7.3 Model-1 ve model-2 kazıklarda oluşan etkilerin karşılaştırılması .....	145
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>147</b>
5.1 Deprem hareketlerinin değişimi .....	147
5.2 Kazık moment ve kesme kuvveti değerlerinin değişimi .....	148
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>153</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>157</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>173</b>

## **KISALTMALAR**

<b>BYS</b>	: Bina Yükseklik Sınıfı
<b>DBYBHY</b>	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
<b>DLH</b>	: Devlet Liman ve Hava Yolları
<b>DTS</b>	: Deprem Tasarım Sınıfı
<b>FEMA</b>	: Federal Emergency Management Agency
<b>İYBDY</b>	: İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği
<b>NEHRP</b>	: National Earthquake Hazards Reduction Program
<b>PEER</b>	: The Pacific Earthquake Engineering Research Center
<b>TBDY</b>	: Türkiye Bine Deprem Yönetmeliği



## SEMBOLLER

<b>F<sub>s</sub></b>	: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
<b>F<sub>1</sub></b>	: 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi [ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ]
<b>S<sub>ae(T)</sub></b>	: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi [g]
<b>S<sub>aeD(T)</sub></b>	: Düşey elastik tasarım spektral ivmesi [g]
<b>S<sub>de(T)</sub></b>	: Yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmesi [m]
<b>S<sub>DS</sub></b>	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
<b>S<sub>D1</sub></b>	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
<b>S<sub>s</sub></b>	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
<b>S<sub>1</sub></b>	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
<b>T</b>	: Doğal titreşim periyodu [s]
<b>T<sub>A</sub></b>	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
<b>T<sub>AD</sub></b>	: Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
<b>T<sub>B</sub></b>	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
<b>T<sub>BD</sub></b>	: Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
<b>T<sub>L</sub></b>	: Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]
<b>T<sub>LD</sub></b>	: Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]
<b>T<sub>P</sub></b>	: Binanın hakim doğal titreşim periyodu [s]
<b>(V<sub>s</sub>)<sub>30</sub></b>	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı [m/s]
<b><math>\bar{m}</math></b>	: Kütle oranı
<b><math>\bar{s}</math></b>	: Yapının rijitliğinin zeminin rijitliğine oranını
<b><math>\omega</math></b>	: Açısal frekans
<b><math>\xi</math></b>	: Histeretik Sönüm Katsayısı





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Deprem yer hareketi düzeyleri (TBDY, 2019).....	30
Çizelge 3.2 : Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı FS (TBDY, 2018). .....	31
Çizelge 3.3 : 1.0 sn. periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı F1 (TBDY, 2018). .....	31
Çizelge 3.4 : Türkiye’de çeşitli yönetmeliklerde deprem hareketlerinin seçilmesi ve ölçeklenmesine dair kurallar. ....	39
Çizelge 3.5 : Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018, Bölüm 16) . ....	46
Çizelge 3.6 : Bina kullanım sınıfları ve bina önem katsayıları (TBDY, 2018, Bölüm 3) . ....	48
Çizelge 3.7 : Bina yükseklik sınıfları (TBDY, 2018, Bölüm 3) . ....	49
Çizelge 3.8 : Deprem tasarım sınıfları (TBDY, 2018, Bölüm 3). ....	50
Çizelge 3.9 : Analiz yöntemleri ve kapsamaları (TBDY, 2018, Bölüm 16.10). ....	53
Çizelge 3.10 : Kazık-zemin etkileşim yayları ve referans bağıntılar.....	75
Çizelge 4.1 : Sondaj bilgileri. ....	79
Çizelge 4.2 : SPT-N <sub>30</sub> değerleri . ....	81
Çizelge 4.3 : Jeofizik test sonuçları . ....	83
Çizelge 4.4 : İnce malzeme oranları. ....	83
Çizelge 4.5 : Mukavemet deney sonuçları.....	84
Çizelge 4.6 : Zemin sınıflandırma deney sonuçları. ....	85
Çizelge 4.7 : SK-1 sondajı sıvılaşma analizi sonuçları.....	88
Çizelge 4.8 : SK-5 sondajı sıvılaşma analizi sonuçları.....	88
Çizelge 4.9 : Sıvılaşmaya karşı DSM ile zemin iyileştirmesi. ....	89
Çizelge 4.10 : Değişik zemin türlerinde $\alpha$ faktörünün olası değerleri (Lunne vd, 1997). ....	91
Çizelge 4.11 : Tasarım için kullanılan zemin parametreleri.....	92
Çizelge 4.12 : Seçilen deprem kayıtları. ....	98
Çizelge 4.13 : Zemin Malzeme Özellikleri.....	109
Çizelge 4.14 : Kazık malzeme özellikleri . ....	111



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Deprem hareketinin zemin-üstü yapısı ortamında yayılması (Aydınöğlü, 2012). .....	5
Şekil 2.2 : Kaya ve Zemine oturmuş yapıların deprem etkisi altında davranışı a) saha; b) kaya ortam; c) serbest zemin; d) kinematik etkileşim; e) eylemsizlik etkileşimi (Wolf, 1985) . .....	7
Şekil 2.3 : Tek dereceli titreşim sistemi modeli a) Elastik zemin üzerinde TDTS sistemi; b) yay ve sönüm katsayıları ile idealiz edilmiş sistem c) Taban ve kütlelerin hareketi (Kramer, 1996). .....	9
Şekil 2.4 : Rijitlik ve kütle oranının etkisi a) Doğal Frekans b) Yapı-zemin sisteminin sönüm oranı ( $h=1$ , $v=0.33$ , $\xi=0.025$ , $\xi_g=0.05$ ) (Kramer, 1996). .....	14
Şekil 2.5 : Rijitlik ve narinlik oranının etkisi a) Doğal Frekans b) Yapı-zemin sisteminin sönüm oranı ( $m=3$ , $v=0.33$ , $\xi=0.025$ , $\xi_g=0.05$ ) (Wolf, 1985). .....	14
Şekil 2.6 : Yapay bir deprem hareketi altında maksimum deplasmanlar a) Yapısal deplasman b) Kütlelerin (m) zemine maksimum deplasmanı ( $h=1$ , $m=3$ , $v=0.33$ , $\xi=0.025$ , $\xi_g=0.05$ ) (Wolf, 1985). .....	15
Şekil 2.7 : Yapı-Zemin etkileşimi probleminin şematik gösterimi (Pecker, 2007)..	16
Şekil 2.8 : Süperpozisyon teoremi (Kausel, 1978) . .....	18
Şekil 2.9 : Üç adım çözümü (Kausel&Whitman, 1978) .....	19
Şekil 2.10 : Direkt Analiz yönteminin şematik gösterimi (NEHRP, 2012). .....	20
Şekil 2.11 : Kazıklı temel durumunda altsistem yönteminin şematik gösterimi (Aydınöğlü, 2011). .....	21
Şekil 2.12 : Serbest yüzeyli yer hareketi ile kinematik etkileşim (kesik çizgiler serbest yüzeyli yer hareketi durumu) a) Yüzeysel temelin eğilme rijitliği nedeniyle serbest yüzeyli durumdaki düşey deplasman bileşeninin engellenmesi b) Gömülü temel rijitliği nedeniyle serbest yüzeyli durumdaki yatay deplasman bileşeninin engellenmesi c) Yüzeysel temelin aksel rijitliği nedeniyle temelin hemen altındaki zeminin bağımsız hareketinin engellenmesi (Kramer, 1996). .....	22
Şekil 2.13 : Düşeyde yayılan S dalgaları altında sallanma hareketi a) Devrilme momenti etkisi ile sallanma b) Burulma (Kramer, 1996). .....	23
Şekil 2.14 : Yapı-Zemin-Kazık Kinematik Etkileşim Modeli (Aydınöğlü, 2011)...	24
Şekil 2.15 : Yapı-Zemin-Kazık Eylemsizlik Etkileşimi, a) Zemin-kazık altsisteminin eşdeğer dinamik rijitliği, b) Üstü yapı-temel altsisteminin eylemsizlik etkileşimi analizi (Aydınöğlü, 2011). .....	25
Şekil 3.1: Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018) .....	32
Şekil 3.2 : Yatay elastik tasarım yerdeğiştirme spektrumu (TBDY, 2018) .....	32
Şekil 3.3 : Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018) .....	33
Şekil 3.4 : Yatay elastik tasarım spektrumu ve zemin sınıfları . .....	34
Şekil 3.5 : Düşey elastik tasarım spektrumu ve zemin sınıfları .....	34

Şekil 3.6 : Deprem büyüklüğü hakim periyot ilişkisi (Graizer & Kalkan, 2009) .....	36
Şekil 3.7 : Faya olan uzaklığın hakim periyot üzerine etkisi (Graizer & Kalkan, 2009) .....	36
Şekil 3.8 : Kaya ve zemin ortamların spektral ivme-periyot grafiği üzerine etkisi (Graizer & Kalkan, 2009) .....	37
Şekil 3.9 : Zaman tanım alanında ölçekleme : (a) San Fernando 1971 depremi kaydı, (b) 1,47 ölçekleme katsayısı ile ölçeklenmiş kayıt (c)NEHRP C -D zeminler için tasarım spektrumu ve ölçeklenmiş, orijinal kayıt spektrumları (Nikolaou, 1998).....	43
Şekil 3.10 : Kocaeli depremi (1999) ARC090 kaydının frekans tanım alanında Z2 yerel zemin koşulu ve 1. Derece deprem bölgesi için yapılan ölçeklemesi (Özdemir & Fahjan, 2007) .....	45
Şekil 3.11 : Yöntem kapsamlarının gösterimi . .....	54
Şekil 3.12 : Yöntem-I'de model gereksinimleri. ....	56
Şekil 3.13 : Yöntem-I'de ortak sistem yaklaşımı (Midas GTS NX, 2015). ....	59
Şekil 3.14 : Yöntem-I'de ortak sistem yaklaşımı-Köprü (Midas GTS NX, 2015)....	60
Şekil 3.15 : Yöntem-I kapsam ve hesap adımları .....	60
Şekil 3.16 : Yöntem-II'de model gereksinimleri. ....	62
Şekil 3.17 : Kazıklarda grup etkisi hesaplaması. ....	63
Şekil 3.18 : Yöntem-II Kinematik etkileşim sistemi . ....	65
Şekil 3.19 : Yöntem-II ortak sistem çözümü (Midas GEN, 2015) . ....	67
Şekil 3.20 : Yöntem-II kapsam ve hesap adımları .....	68
Şekil 3.21 : Yöntem-III kapsam ve hesap adımları . ....	73
Şekil 3.22 : Kazık-zemin etkileşim yaylarının gösterimi . ....	74
Şekil 3.23 : Statik yükleme (sol) ve tekrarlı yükleme sonucu elde edilen p-y eğrileri (Kuruoğlu ve diğ., 2011).....	75
Şekil 3.24 : Çeşitli bağıntılara göre p-y bağıntıları (Pando, 2013) . ....	76
Şekil 3.25 : Kazık ucu yük- deplasman (Q-Z) eğrisi (API WSD RP-2A, 2000). ....	76
Şekil 3.26 : Kazık eksenel yük-deplasman (t-z) eğrisi (API WSD RP-2A, 2000). ...	77
Şekil 4.1 : Sondaj yerlerinin gösterimi .....	80
Şekil 4.2 : SPT-N <sub>30</sub> değerlerinin derinlikle değişiminin grafiği. ....	82
Şekil 4.3 : Kıvam limitleri ve plastisite indisi dağılımı. ....	84
Şekil 4.4 : A-A Kesiti sıvılaştırılabilir silt zeminler. ....	86
Şekil 4.5 : Genel zemin modeli.....	90
Şekil 4.6 : Killerde efektif kayma direnci açısı ile plastisite indisi (PI) arasındaki ilişki (Gibson, 1953) .....	92
Şekil 4.7 : Planlanan yapı kesit ve plan görünüşleri. ....	93
Şekil 4.8 : Adhezyon faktörü ( $\alpha$ ) -s <sub>u</sub> ilişkisi (API, 1987). ....	94
Şekil 4.9 : PEER NGA veritabanı deprem kaydı arama kriterleri. ....	96
Şekil 4.10 : Gazli_ USSR Depremi Gaz000 Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri .....	99
Şekil 4.11 : Gazli_ USSR Depremi Gaz000 Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler.....	99
Şekil 4.12 : Gazli_ USSR Depremi Gaz090 ( <b>Analizde kullanılan</b> ) Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri.....	100
Şekil 4.13 : Gazli_ USSR Depremi Gaz090 Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler.....	100

<b>Şekil 4.14</b> : Christchurch_ New Zealand Depremi SHLCS40W Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri.....	101
<b>Şekil 4.15</b> : Christchurch_ New Zealand Depremi SHLCS40W Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler. ....	101
<b>Şekil 4.16</b> : Christchurch_ New Zealand Depremi SHLCS50E ( <b>Analizde kullanılan</b> ) Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri.....	102
<b>Şekil 4.17</b> : Christchurch_ New Zealand Depremi SHLCS50E Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler. ....	102
<b>Şekil 4.18</b> : Gazli_ USSR ve Christchurch_ New Zealand Depremlerine ait ortalama spektrum ve DD-1 düzeyine göre tasarım spektrumu. ....	103
<b>Şekil 4.19</b> : Sonlu elemanlar model boyutları: Model-1 (üstte) , Model-2 (Altta)..	104
<b>Şekil 4.20</b> : Model-1 Analiz görünüşleri : 1-1 Kütlesiz sonsuz rijit temel alt modeli ( <b>Üstte</b> ), 1-2 Kütlesiz sonsuz rijit temel+Bina yükü alt modeli ( <b>Ortada</b> ) , 1-3 Üstyapı+Temel+Kazık+Zeminden oluşan 2 boyutlu ortak sistem alt modeli ( <b>Altta</b> ). ....	105
<b>Şekil 4.21</b> : Model-2 Analiz görünüşleri : 2-1 Kütlesiz sonsuz rijit temel alt modeli ( <b>Üstte</b> ), 2-2 Kütlesiz sonsuz rijit temel+Bina yükü alt modeli ( <b>Ortada</b> ) , 2-3 Üstyapı+Temel+Kazık+Zeminden oluşan 2 boyutlu ortak sistem alt modeli ( <b>Altta</b> ). ....	106
<b>Şekil 4.22</b> : Zemin elemanlardaki düğüm ve gerilme noktaları (Plaxis, 2019) .....	107
<b>Şekil 4.23</b> : Sekant ve tanjant kayma modülü azalım grafiği (Plaxis, 2019) .....	109
<b>Şekil 4.24</b> : Killi zeminlerde G/Gmax oranının çevrimsel birim kayma deformasyonu ile değişimi (Vucetic & Dobry, 1991). ....	109
<b>Şekil 4.25</b> : Plaxis 2D Gömülü kiriş elemanı(embedded beam) ile kazık modellenmesi (Sluis, 2012). ....	111
<b>Şekil 4.26</b> : Model-1 ve Model-2 Sonuç karşılaştırma noktaları.....	112
<b>Şekil 4.27</b> : Model 1-1 Kinematik Etkileşim (Bina yükü olmadığı durum) için analiz sonuçları .....	114
<b>Şekil 4.28</b> : Model 1-2 Kinematik Etkileşim (Bina yükü altında) için analiz sonuçları.....	115
<b>Şekil 4.29</b> : Model 1-3 Üstyapı-Temel-Kazık-Zeminden oluşan iki boyutlu ortak sistem modeli analiz sonuçla . ....	116
<b>Şekil 4.30</b> : GAZ090 Kaydı Temel orta noktası yatay ivme kaydı değişimi .....	117
<b>Şekil 4.31</b> : İvme, hız ve deplasman değerlerinin karşılaştırıldığı eksenler : a) Düşey eksenler, b) yatay eksenler .....	118
<b>Şekil 4.32</b> : Düşeyde model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum ivme değerleri. ....	119
<b>Şekil 4.33</b> : Düşeyde model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum hız değerleri. ....	119
<b>Şekil 4.34</b> : Düşeyde model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum deplasman değerleri. ....	120
<b>Şekil 4.35</b> : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum ivme değerleri. ....	120
<b>Şekil 4.36</b> : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum hız değerleri. ....	121

<b>Şekil 4.37</b> : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum deplasman değerleri. ....	121
<b>Şekil 4.38</b> : GAZ090 kaydı ile analiz sonucu temel tabanı orta noktasında elde edilen %5 sönümlü tepki spektrumu karşılaştırması. ....	122
<b>Şekil 4.39</b> : Model 1-1 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme .....	123
<b>Şekil 4.40</b> : Model 1-2 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme .....	124
<b>Şekil 4.41</b> : Model 1-3 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme .....	125
<b>Şekil 4.42</b> : Model -1 GAZ090 Kaydı ile analiz moment değişim grafikleri. ....	126
<b>Şekil 4.43</b> : Model -1 GAZ090 Kaydı ile analiz Kesme kuvveti değişim grafikleri. ....	127
<b>Şekil 4.44</b> : Model -1 GAZ090 Kaydı Kesme kuvveti ve Moment Zarfı değişim grafiği. ....	128
<b>Şekil 4.45</b> : Model -1 ve Model-2 GAZ090 kaydı moment zarfı karşılaştırma grafiği. ....	129
<b>Şekil 4.46</b> : Model -1 ve Model-2 GAZ090 kaydı kesme kuvveti zarfı karşılaştırma grafiği. ....	130
<b>Şekil 4.47</b> : Model 1-1 Kinematik Etkileşim (Bina yükü olmadığı durum) için ivme kaydı değişimleri. ....	131
<b>Şekil 4.48</b> : Model 1-2 Kinematik Etkileşim (Bina yükü altında) için ivme kaydı değişimleri. ....	132
<b>Şekil 4.49</b> : Model 1-3 Üstyapı-Temel-Kazık-Zeminden oluşan iki boyutlu ortak sistem modeli için ivme kaydı değişimleri. ....	133
<b>Şekil 4.50</b> : SHLCS50E Kaydı Temel orta noktası yatay ivme kaydı değişimi .....	134
<b>Şekil 4.51</b> : Model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum ivme değerleri .....	135
<b>Şekil 4.52</b> : Model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum hız değerleri. ....	136
<b>Şekil 4.53</b> : Model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum deplasman değerleri. ....	136
<b>Şekil 4.54</b> : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum ivme değerleri. ....	137
<b>Şekil 4.55</b> : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum hız değerleri. ....	137
<b>Şekil 4.56</b> : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum deplasman değerleri. ....	138
<b>Şekil 4.57</b> : SHLCS50E kaydı ile analiz sonucu temel tabanı orta noktasında elde edilen %5 sönümlü tepki spektrumu karşılaştırması. ....	138
<b>Şekil 4.58</b> : Model 1-1 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme. ....	139

<b>Şekil 4.59</b> : Model 1-2 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksenindeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme .....	140
<b>Şekil 4.60</b> : Model 1-3 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksenindeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme .....	141
<b>Şekil 4.61</b> : Model -1 SHLCS50E Kaydı ile analiz moment değişim grafikleri. ....	142
<b>Şekil 4.62</b> : Model -1 SHLCS50E Kaydı ile analiz Kesme kuvveti değişim grafikleri. ....	143
<b>Şekil 4.63</b> : Model -1 SHLCS50E Kaydı Kesme kuvveti ve Moment Zarfı değişim grafiği.....	144
<b>Şekil 4.64</b> : Model -1 ve Model-2 SHLCS50E kaydı Moment zarfı karşılaştırma grafiği.....	145
<b>Şekil 4.65</b> : Model -1 ve Model-2 SHLCS50E kaydı Kesme Kuvveti zarfı karşılaştırma grafiği. ....	146







## YÜKSEK KATLI YAPILARDA YAPI-KAZIK-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİNİN İKİ BOYUTLU OLARAK İNCELENMESİ

### ÖZET

Mevcut durumda nükleer santral, baraj, köprü ve yüksek katlı yapılar gibi rijit, büyük ölçekli ve deprem davranışının önemli olduğu yapılar açısından göz önüne alınan yapı-zemin etkileşimi analizleri 2019 yılında yürürlüğe giren “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği” ile birlikte belirli deprem tasarım sınıfları ve yerel zemin koşulları altında yüksek katlı kazıklı temelli yapılar için zorunlu hale gelmiştir. Bu tez çalışması ile yapı-kazık-zemin etkileşimi analizleri açısından TBDY (2018) kapsamında belirtilen çözüm yöntemlerinin detaylıca açıklanması, analizler için gerekli deprem hareketlerinin seçilmesi ve dönüştürülmesi, analiz modellerinin kurulması ve çeşitli analiz modellerinden elde edilen sonuçların ivme kaydı değişimi ve kazıklarda oluşan kesme kuvveti, moment değerleri açısından incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu bağlamda İzmir İli, Karşıyaka ilçesinde yüksek katlı bir konut projesi için yapılmış olan sondaj loğu, arazi ve laboratuvar deneylerinden faydalanarak zemin modeli oluşturulmuştur. Söz konusu proje alanında 75 m yüksekliğinde, 25 katlı 30x50m boyutlarında derin temelli, yüksek katlı bir yapı inşa edileceği kabul edilmiştir. Yüksek katlı yapının ağırlığını karşılayacak şekilde Ø165cm çapında, L=75 m boyunda ve 5 m yatay- düşey aralıklı temel altı kazıkların gerekli olacağı hesaplanmıştır.

Söz konusu yapı için yapı-kazık-zemin etkileşimi analizleri kapsamında Model-1 ve Model-2 olmak üzere iki adet sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Sonlu elemanlar modelleri üç adet alt modele ayrılmıştır. Bu alt modeller bina ağırlığının yayılı yük olarak göz önüne alınması ve alınmaması durumlarına karşın, temel ve bodrum perdelerinin kütsüz sonsuz rijit olarak tanımlandığı iki boyutlu temel-kazık-zemin kinematik etkileşim modelleri (Model 1-1, 1-2) ve üstyapı-temel-kazık-zemin elemanların kütleleri ve rijitlikleri ile birlikte tanımlandığı iki boyutlu ortak sistem modelidir (Model 1-3).

Model-2 ise temel genişliği (B=30m) kadar bir mesafe sonrasında ikinci bir yüksek katlı yapı olması durumunu ele alan analizdir. Yukarıda bahsedilen alt modeller için verilen bilgiler Model-2 alt modelleri (2-1, 2-2 ve 2-3) için de aynen geçerlidir. Model-2’de analiz sonuçları açısından yakın mesafede benzer özellikte ikinci bir yüksek katlı yapının olması durumunun kazık kesme kuvveti ve moment zarfına olan etkisi incelenmiştir.

Model-1 ve Model-2 alt modelleri ile birlikte toplamda 6 adet analiz modeli kurulmuştur.

Plaxis 2D yazılımı ile oluşturulan sonlu elemanlar modelinde model boyutları yatayda temel sınırından itibaren temel genişliğinin dört katı (4B), düşeyde ise temel sınırından itibaren beş katı (5B) mesafe uzaklıkta olacak şekilde düzenlenmiştir. Düşey model sınırlarında ve model tabanında geçirgen sınır koşulları kullanılmıştır.

Dinamik analizler kapsamında zemin tabakaları hiperbolik gerilme- birim deformasyon davranışının dikkate alındığı malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Bu malzeme modeli düşük birim deformasyon rijitliği ile birim deformasyonla sertleşen zemin modelidir (HSsmall).

Plaxis yazılımında kazıklar, kazık ve zeminin farklı rijitliklerinin ve bağımsız hareketlerinin göz önüne alınabildiği, kazık boyunca çeper sürtünmesi değişimi ve uç direnci değerlerinin tanımlanabildiği gömülü kiriş elemanlar (embedded beam) ile tanımlanmıştır. İki boyutlu ortak sistem modelinde kullanılan bina elemanları ise plaxis yazılımında mevcut olan levha (plate) elemanlar ile tanımlanmıştır.

Bahsedilen analiz modelleri için TBDY (2018)'de belirtilen esaslar dahilinde seçilen ve DD-1 deprem düzeyi (tekrarlanma periyodu 2475 yıl ve 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem hareketi) tasarım spektruma spektral uyum sağlayacak şekilde dönüştürülen iki adet deprem kaydı model tabanından etkilerek toplamda 12 adet dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Yapılan dinamik analizler sonucunda gerek deprem hareketinin zemin ortam içerisinde yayılarak dönüştüğü durum, gerek kazıklarda oluşan moment ve kesme kuvveti değerleri olmak üzere aşağıda başlıklar halinde özetlenen sonuçlar elde edilmiştir:

- i. Statik ve dinamik durumdaki kazık kuvvetlerinin karşılaştırılması:
  - o İki farklı deprem kaydına göre yapılan analiz sonucunda kinematik etkileşim analizi ile elde edilen maksimum moment değerleri statik durumdaki maksimum moment değerinin 3 ile 6 katı, iki boyutlu ortak sistem modelinde ise 5 ile 7 katı olarak elde edilmiştir. Kesme kuvveti değerleri ise kinematik etkileşim analizlerinde statik durumda hesaplanan değerlerin 2 ile 3 katı, iki boyutlu ortak sisteminde ise 3 ile 5 katı olarak hesaplanmıştır.
- ii. Bina yükünün göz önüne alınmasının kinematik etkileşimde ivme ve kazık kuvvetlerine etkisi
  - o Kinematik etkileşim analizlerinde bina ağırlığının yayılı yük olarak göz önüne alınması temel tabanı orta noktasında elde edilen maksimum ivme değerlerini %10, temel alt kotu seviyesi için temelden “B=30m” kadar mesafe sonra elde edilen maksimum ivme değerlerini ise %5 oranında (bina yükünün dikkate alınmadığı Model 1-1'e göre) azaltmıştır.
  - o Kinematik etkileşim analizleri olarak gerçekleştirilen 1-1 ve 1-2 modellerinde bina yükünün varlığı nedeniyle 1-2 modelinde daha düşük moment ve kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda bina ağırlığının yayılı yük olarak etki ettirilmesi moment ve kesme kuvveti değerlerini azaltmıştır. Moment değerleri için %35-%40 oranında bir azalım söz konusu iken, kesme kuvveti değerinde bu azalım %20-%30 aralığında hesaplanmıştır.
- iii. Üstyapının varlığının deprem hareketine ve kazık kuvvetlerine etkisi
  - o Üstyapı ve temelin kütle ve rijitliklerinin göz önüne alınması (Model 1-3) kinematik etkileşim sonuçlarına göre hem temel tabanı seviyesindeki hem de temel dışındaki ivme kaydını ve pik ivme değerlerini değiştirmiştir. Bu değişiklik genel olarak daha düşük pik ivme değerlerinin ortaya çıkması şeklinde olmuştur. 1-3 modelinde

temel tabanı seviyesinde kinematik etkileşim modellerine göre %10-%20 arasında daha düşük pik ivme değerleri elde edilmiştir. Bu fark temel genişliği (B=30m) kadar uzaktaki nokta için %35-%40 oranına çıkmaktadır.

- İki boyutlu ortak sistem modeli (1-3) modeli moment dağılımlarında genel olarak kazıklarda oluşan etkilerin birbirine yakınsadığı, her iki depremler analizinde de kazıklardaki maksimum zorlanmaların temel-kazık birleşim bölgesinde ve köşe kazıklarında oluştuğu görülmüştür.
- İki boyutlu ortak sistem modeli (1-3) ile üstyapının ve kütesinin göz önüne alınmadığı 1-1 kinematik etkileşim modelinde benzer mertebelerde kazık kuvvetlerine rastlanmıştır. Ancak diğer kinematik etkileşim modeli (1-2: üstyapının ağırlığını yayılı yük olarak göz önüne alan) ile sonuçlar karşılaştırıldığında iki boyutlu ortak sistem modelinde yaklaşık olarak %60 daha fazla kazık kuvvetleri oluştuğu anlaşılmıştır.

iv. İkinci bir yapının varlığının kazık kuvvetlerine etkisi:

Model -2 ile yapılan analizler sonucunda yakın mesafede aynı özellikte yüksek katlı, derin temelli başka bir yapının varlığı sadece tek bir binanın göz önüne alındığı Model-1'e göre aşağıdaki değişikliklere yol açmıştır:

- Kinematik etkileşim analizlerinden elde edilen moment değerleri açısından ikinci bir yapının varlığının hesaplanan değerler üzerinde  $\pm$  %1 mertebelerinde bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ancak iki boyutlu ortak sistem modelleri açısından bu etkinin maksimum moment değerini %6 ~ %12 oranında azaltacak şekilde olduğu tespit edilmiştir.
- Kesme kuvveti değerlerinin ise ikinci yapının varlığı ile artış gösterdiği anlaşılmıştır. Kinematik etkileşim modellerinde bu artış oranının %1~%15, iki boyutlu ortak sistem modellerinde ise %1~%10' mertebelerinde olduğu anlaşılmıştır.
- Dolayısıyla, yapılan analizler sonucunda ikinci yapının varlığının göz önüne alınmasının kazıklarda hesaplanan moment değerleri açısından azaltıcı, kesme kuvvetleri açısından ise arttırıcı yönde etkileri olduğu tespit edilmiştir.



## 2D ANALYSING OF DYNAMIC SOIL-PILE-STRUCTURE INTERACTION FOR HIGH RISE BUILDINGS

### SUMMARY

Soil structure interaction analysis is considered for the structures which are rigid, large-scale and earthquake behavior is important in the current situation. It has become compulsory for high rise - piled raft foundation building designs under specific seismic design and local soil conditions upon the inurement of Turkey Earthquake Building Code in 2019. In this thesis, it is intended to explain the details of the methods of analysis mentioned within the scope of TBDY (2018) in terms of soil-pile-structure interaction analysis and selection and scaling of earthquake motion records required for analysis, setting finite element models. Besides the variation of earthquake motions in depth and pile forces are aimed to be examined from various analysis models corresponding kinematic interaction and 2D direct analysis.

In line with this purpose, an idealized soil model has been formed by using bore hole logs, site and laboratory tests performed for a high-rise residence project in Karşıyaka district of İzmir province. In the project area it is assumed that a 25-story high rised-piled raft foundation structure will be constructed. The height of the building and foundation dimensions are assumed as 75m and 30mx50m respectively. Pile diameter, length and spacings are defined as 165cm,  $L=75m$  and 5m with reference to total building weight.

Two main finite element models, Model-1 and Model-2, have been established within the soil-pile-structure interaction analysis of aforementioned high rised buildings. Finite element models are divided into three sub-models. These sub-models consist of two kinematic interaction models and one 2D direct analysis model. Kinematic models are subdivided whether building weight is considered as distributed load or not.

Model-2 considers the existence of another high-rise building in a distance of foundation width " $B=30m$ ". The information given for the abovementioned sub-models is also valid for the Model-2 sub-models (2-1, 2-2 and 2-3). In the Model-2, the effect of a second high-rise structure on the pile shear force and moment envelopes additionally.

Six finite element models were established in Plaxis 2D v.18 including Model-1 and Model-2 sub-models.

Finite element model dimensions are adjusted as four times foundation width (4B) away from foundation border in lateral direction and five times foundation width (5B) away from foundation border in vertical direction. Transmitting boundary conditions are used for  $x_{min}$ ,  $x_{max}$  and  $y_{min}$  boundaries.

Soil layers are defined by Hardening soil with small strain stiffness material model (HSsmall). This model describes small strain stiffness with a simple hyperbolic law.

There are several methods to define piles in plaxis 2D. Conventional methods are defining piles as plate or node to node anchor elements, but conventional methods have some disadvantages in terms of disregarding bending stiffness and pile-soil interaction for node to node anchors and continuous out of plane behavior of plates. Recommended modeling option for foundation piles is embedded beam row in Plaxis 2D. This modelling options enables pile-soil interaction, continuous soil mesh, pile soil independent movement and interface stiffness factors for axial, lateral directions and pile tip, thus embedded beam elements were used to define piles within the scope of this thesis. Structural elements in Model-3 for superstructure and foundation were modelled by plate elements.

The mesh for models generated considering average element size of triangular elements less or equal to one-eight of the wavelength calculated with respect to minimum shear wave velocity of the soil profile and maximum frequency from fourier spectrum of ground motion records.

Earthquake records were obtained from PEER NGA database considering magnitude, fault mechanism, fault distance and scaling factor. Ground motion records eliminated to eleven specific records. Two of eleven records were selected for the analyzes . The selected two records were scaled to match design spectrum of 2475 year return period earthquake (an earthquake with 2% chance of exceedance in 50 year) defined according to Earthquake building regulation code requirements.

Twelve dynamic 2D analyses performed for Model-1 and Model-2 sub-models considering scaled ground motion records.

As a result of the dynamic analyses performed, the variation of ground motion records and maximum acceleration values through horizontal and vertical directions and shear forces and moments values can be summarized in below headlines:

- i. Comparison of static and dynamic pile forces
  - As a result of the dynamic analyses, maximum moments from kinematic interaction were obtained 3~6 times more and 5~7 times more from 2D direct analysis model than static condition.
  - Maximum shear forces obtained from kinematic interaction analysis is 2~3 times more than static conditions and 3~5 times more from 2D direct analysis model than static condition.
- ii. Effect of considering building weight as distributed load on accelerations and pile forces
  - In kinematic interaction analyses taking into consideration the weight of the building as distributed load reduced the maximum acceleration obtained at the midpoint of the foundation bottom level by 10%. The maximum acceleration value obtained at “B=30m” distance from the foundation border were reduced by 5% (according the model 1-1 which distributed load was not considered).
  - Due to the building distributed loads in Model 1-2 less moment and shear forces than Model 1-1 obtained. Accordingly, building weight as distributed loads reduces the moment and shear force values. The reduction in shear force values calculated in the range of 20%-30%, and for the moment values the reduction is in the range of %35~% 40.

- iii. Effect of superstructure on accelerations and pile forces
  - Consideration of rigidity and mass of the superstructure and foundation (Model 1-3), changes ground motion records and peak acceleration values both at the foundation bottom level (midpoint) and the point B=30m away. This change is generally in the form of less peak accelerations. Model 1-3 shows 10%~20% lower peak acceleration values than kinematic interaction analyses (Model 1-1, Model 1-2). This reduction percent increases to 35% ~ 40% for the point “B=30m (foundation width)” away.
  - In 2D direct system model (1-3) pile moments converge to a similar distribution. The maximum pile forces were obtained at the foundation bottom level and corner piles showed larger moment and shear force values than inner piles.
  - Similar pile forces observed between Model 1-3 and Model 1-1 which is the kinematic interaction model that building weight is not considered as distributed load. On the other hand, Model 1-3 gives 60% more pile forces when compared to kinematic interaction model 1-2 which considers building weight.
- iv. Effect of second high rise building on pile forces
  - Model 2 analyses show the effect of second high rise building to the pile forces calculated in Model -1. The general effects of second high rise building and variations are indicated as follows.
  - The existence of second high rise building around the primary one resulted  $\pm 1\%$  variation in terms of moment values for kinematic interaction models. However, comparison of 2D direct system results for both models shows maximum moment values is 6% ~ 12% less when another high-rise building located to a B=30m distance.
  - The shear forces increase with the existence of second structure against the situation observed for moments. The increase rate is 1%~15% for kinematic interaction models and 1% ~10 % for 2D direct system models.
  - As a result, based on the dynamic analyses performed with two different ground motion record both Model-1 and Model-2 it is determined that second high rise structure had a reducing effect on the moment values and increasing effect on the shear forces.





# 1. GİRİŞ

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışması ile yapı-kazık-zemin etkileşim analiz yöntemlerinin, temel yapı-zemin etkileşim prensiplerinin ve bu analiz yöntemleri kapsamında deprem hareketlerinin seçilmesi, dönüştürülmesi, iki-üç boyutlu ortamlarda modelleme gereksinimlerinin tespit edilmesi konularının ele alınması ve iki boyutlu analiz ortamında etkileşim analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.

## 1.2 Konu ile ilgili Mevcut Çalışmalar

2019 yılında yürürlüğü giren yeni deprem yönetmeliği ile kapsamı genişletilen yapı-zemin dinamik etkileşimi analizleri mevcut durumda nükleer güç santralleri, yüksek binalar, barajlar, köprüler gibi hem rijit, büyük ölçekli hem de deprem davranışının önemli olduğu yapılar açısından göz önüne alınmaktadır. Nükleer güç santrali gibi önemli yapılar için yapı-zemin dinamik etkileşiminin analizlerine dair 1979 yılında “Committee on Nuclear Structures and Materials” tarafından yayınlanan bir çalışma bulunmaktadır.

Yapı-zemin, yapı-temel-zemin, yapı-kazık-zemin vb. şekillerde ifade edilen etkileşim analizleri yukarıda bahsedilen büyük ölçekli, önemli yapıların yanında sürekli dinamik etkilere maruz kalan makine temelleri gibi küçük ölçekli yapılar açısından da bir tasarım kriteri olarak göz önüne alınmaktadır. Bu bağlamda literatürde bulunan çalışmalar genel olarak dinamik yüklü temellerin tasarımı başlığı altında ifade edilebilir. Makine temelleri özelinde yapı-zemin etkileşimini konu alan çalışmalar arasında R.V. Whitman tarafından 1969 yılında yayınlanan “Dinamik Yüklü Temellerin Tasarım Prosedürleri Kitabı” gösterilebilir. Bu çalışmada Whitman makine temellerinin tasarım kriterlerini, sönüm-yay katsayısı kavramlarını anlatmaktadır. Makine temelleri ile ilgili Gazetas tarafından 1991 yılında “Temel Mühendisliği El Kitabı” kapsamında daha güncel bir çalışma yayınlanmıştır.

Bahsedilen çalışmalar arasında problemi bütün hatları ile ortaya koyan John P. Wolf tarafından 1985 yılında yayınlanmış “Dinamik Yapı Zemin Etkileşimi” başlıklı kitaptır. Bu kitap içerisinde Wolf hareket denklemleri ve dalga yayılımının temellerinden başlayarak, serbest zemin davranışı, zemin ve yapının farklı temel sistemleri için modellenmesi, ortak sistem ve alt sistem çözüm yöntemleri ve etkileşim analizlerinin mühendislik uygulamaları gibi konulara değinmektedir.

Uygulamalarda çoğu zaman ihmal edilebilen yapı- zemin etkileşimi konusuna günümüzde deprem şartnamelerinde değinilmekte ve bir tasarım yöntemi olarak göz önüne alınması zorunlu kılınmaktadır.

DBYBHY (2007) şartnamesinde yapı zemin etkileşimi açısından herhangi bir zorunluluk veya yönlendirmeye yer verilmemiştir. Uygulamada bu durum yüksek katlı yapıların tasarımında “Kıyı ve liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği (2008)”, “İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği (2008 Son Taslak)” ve Yeni Kent Merkezinde (Bayraklı Salhane/Turan bölgesi-Alsancak Liman arkası kesimi ve Salhane bölgesi) yapılacak yüksek binalar için zemin geoteknik ve yapı/deprem mühendisliği proje ve raporlarında uyulması gereken teknik önermeler” isimli yönetmeliklerde verilen düzenlemeler takip edilerek aşılmıştır. Yeni deprem yönetmeliğinde ise yerel zemin sınıfı ZD, ZE ve ZF olan bölgelerde yapılacak kazık temelli yapılarda deprem tasarım ve bina yükseklik sınıflarına göre 3 farklı yöntemle gerçekleştirilebilecek şekilde yapı-kazık-zemin etkileşimi analizleri zorunlu kılınmaktadır (TBDY, 2018).

Aydınoğlu (2011) zayıf zeminlerde yapılacak yüksek katlı yapılar için yapı-kazık-zemin etkileşim analiz yöntemlerinin, başlıca tasarım prensiplerinin ve tasarıma esas büyüklüklerin tespitine dair bir hesap yöntemi ile etkileşim analizlerin anlaşılması açısından önemli bir rapor yayınlamıştır.

Uluslararası standartlar açısından FEMA ve Eurocode 8 yönetmeliklerinde yapı-zemin etkileşim hesaplarına değinilmektedir. Bu yönetmeliklerde etkileşim analizleri ile ilgili yaklaşımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Çelik vd., 2015) :

- FEMA 273, 356 yönetmeliklerinde basit ve açık yöntem olarak iki etkileşim analiz çözümü yer almakta ancak detaylı bir hesap yöntemi bulunmamaktadır.
- FEMA 368, 369 yönetmelikleri sadece eylemsizlik etkileşimini dikkate almakta kinematik etkileşim etkileri göz ardı edilmektedir. Etkileşim analizleri

ile bulunan taban kesme kuvvetinin etkileşim göz önüne alınmaksızın hesaplanan taban kesme kuvvetinin %70'inden fazla olması gerektiği belirtilmektedir.

- FEMA 440'ın ise yapı-zemin etkileşimi konusunun kinematik ve eylemsizlik etkileşimleri olarak incelendiği daha kapsamlı bir yönetmelik olduğu belirtilebilir. Bu yönetmelikte analizlerle ilgili detaylı bilgi ve çözüm yöntemlerine yer verilmiştir.
- Benzer şekilde NEHRP tarafından yayınlanan "NIST GCR 12-917-21 Soil-Structure Interaction for Building Structures" raporu ile yapı-zemin etkileşimine dair temel prensipler, kinematik- eylemsizlik etkileşim analizleri ve direkt- alt sistem çözüm yöntemleri detaylıca anlatılmış ve örnek uygulamalar üzerinden açıklamalar yapılmıştır.
- Eurocode-8'de ise etkileşim analizlerinin göz önüne alınacağı durumlara değinilmiş ancak bir analiz yöntemi açıklanmamıştır.





olarak deprem davranışının önemli olduğu rijit ve büyük ölçekli : nükleer güç santralleri, yüksek binalar, barajlar , viyadükler, asma köprüler vb. yapılarda ve aynı zamanda makine temelleri, demiryolu-karayolu trafiğinin yoğun yerleşim bölgesinden geçmesi gibi durumlarda sürekli dinamik etkiye maruz kalınması ve yüksek seviyedeki titreşimlerin çevre yapılara etkilerinin değerlendirilmesi açısından gerekli olmaktadır (Çelebi, 2005).

## 2.2 Yapı-Zemin Etkileşiminin Etkileri

Deprem etkisi altında yapılan geleneksel analiz yöntemlerinde: yapının taşıdığı zemin ortamın şekil değiştirmedeği kabulü ile rijit temel varsayımı söz konusu olur. Bunun sonucu olarak yapı, temelden zemine ankastre bağlı (fixed base) bir sistem, yer hareketi de (deprem verisi) yapının varlığından etkilenmeyen yatay bir rijit ötelenme olarak ele alınır (Çelebi, 2005).

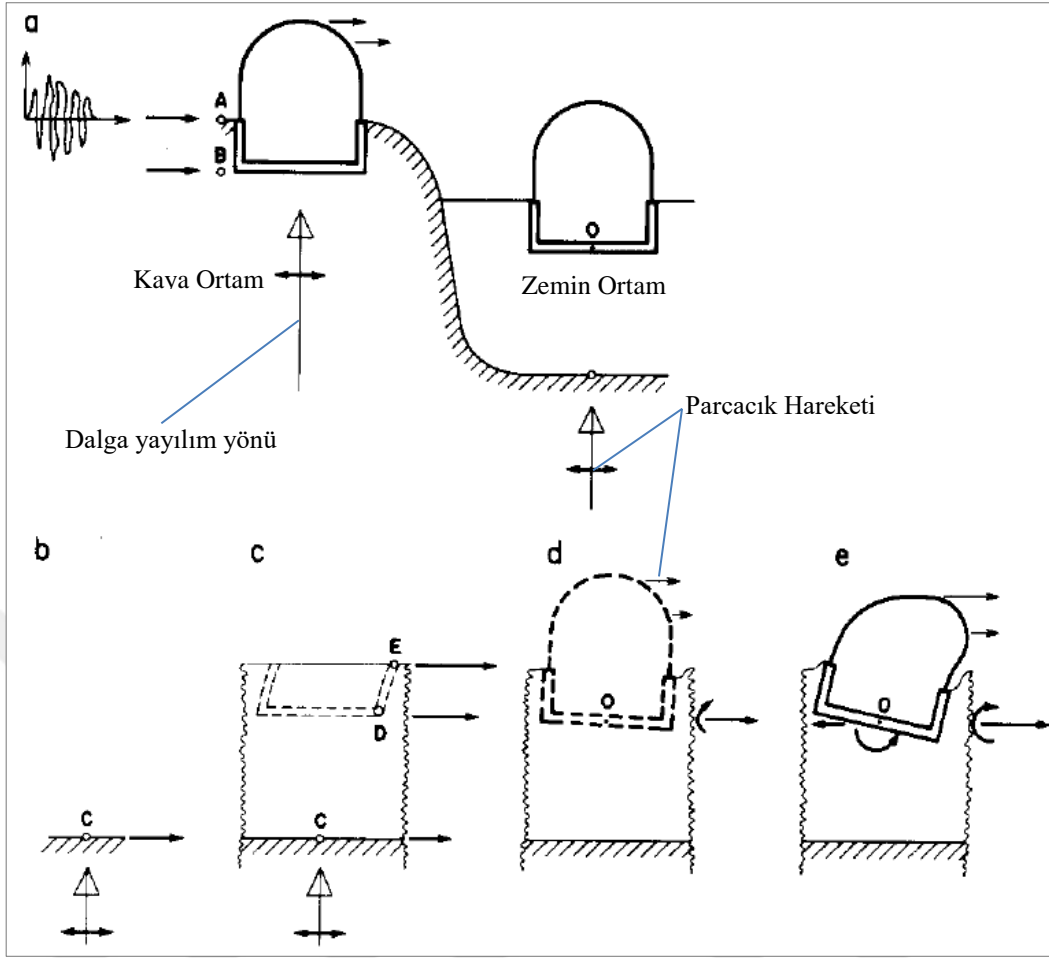
Yapı-zemin etkileşimi yapı elemanlarının zemin ortam içerisindeki varlığı nedeniyle temel tabanındaki deprem hareketinin serbest zemin hareketine göre değişimini içermektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin etkilerinin incelenmesi amacıyla bir yapının kaya veya zemin ortam üzerine oturtulduğu durumlarda deprem etkisine vereceği tepkiler incelenebilir (Şekil 2.2).

Şekil-2.2'de içi dolu oklar parçacık hareketini, içi boş oklar ise düşey doğrultuda yayılan dalga hareketini göstermektedir. İçi dolu okların uzunlukları gözlemlenen deprem etkisinin büyüklüğü ile orantılıdır.

Kaya ortam için temel tabanına etkileyen deprem hareketi ile tabanda kesme ve dönme momenti etkileri ortaya çıkacaktır. Ancak kaya ortamın yüksek rijitliği nedeniyle zemine göre temelde farklı deplasman ve dönme oluşmayacak temel ve zeminin deplasmanları aynı olacaktır. Dolayısıyla kaya ortam üzerine oturtulmuş yapıda, deprem hareketi ile oluşan etkiler açısından yapının özellikleri belirleyici olacaktır (Wolf, 1985).

Görece daha yumuşak zemin ortamlara oturtulan zeminlerde ise Şekil 2.2a'da O noktasındaki hareket, A noktasında belirtilen hareketten farklı olacaktır. Bu farklılık yapı ve zeminin bileşik hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu farklılığı anlamak adına zeminin yapının dinamik davranışına etkisi 3 şekilde incelenebilir (Wolf, 1985).



**Şekil 2.2 :** Kaya ve Zemine oturmuş yapıların deprem etkisi altında davranışı a) saha; b) kaya ortam; c) serbest zemin; d) kinematik etkileşim; e) eylemsizlik etkileşimi (Wolf, 1985).

Öncelikle serbest zemin davranışında, yapının ve kazının olmaması durumlarında, zemin ortamda sahada gözlemlenen hareket kaya ortamda gözlemlenenenden farklı olacaktır (Şekil 2.2c). Eğer Şekil 2.2c’de gösterilen kaya mostrasındaki C noktası üzerinde zemin ortam olmasaydı (Şekil 2.2b) bu noktadaki deprem hareketi Şekil 2.2a’da belirtilen A noktasındaki hareketten çok farklı olmazdı. C noktası üzerinde zemin tabakalarının olması bu noktadaki hareketi azaltacaktır. Zemin ortam içerisinde yayılan deprem dalgaları D ve E noktalarının C noktasına göre farklı deplasman yapmasına neden olacaktır. D ve E noktaları serbest zeminde ve daha sonra yapı temeli inşa edildiğinde zemin-yapı ara yüzündeki yer alacak noktalardır. Deprem hareketi genellikle frekans içeriğine de bağlı olarak yüzeye doğru büyütülerek çıkar. Bu durumda C noktasından E noktasına doğru yatay deplasmanlar artacaktır.

İkinci olarak kazının ve zemine gömülü rijit temelin varlığı deprem hareketini değiştirecektir (Şekil 2.2d). Rijit temelde dönme ve yatay deplasmanlar gerçekleşecek

ve kaya ortamda karşılaşılandan farklı olarak rijit cisim hareketi nedeniyle yapı yüksekliğince değişen ivmelenmeler (eylemsizlik kuvvetleri) ortaya çıkacaktır (Kinematik Etkileşim).

Üçüncü olarak ise yapıda oluşan eylemsizlik kuvvetleri O noktasında bir devrilme momentine ve taban kesmesine yol açacaktır (Şekil 2.2e). Bu durum temelin serbest zemine göre dönme ve ötelenmesine yol açacak ve temel seviyesindeki deprem hareketini değişikliğe uğratacaktır (Eylemsizlik Etkileşimi).

Ayrıca Şekil 2.2 üzerinden yapı-zemin etkileşimin ana etkilerine dair aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılabilir:

- Zemin içerisinde yapının varlığı nedeniyle deprem hareketinin gerek genlik gerek frekans içeriği değişime uğrayacaktır.
- Dinamik modelde zeminin varlığının hesaba katılması (Şekil 2.2e) ile sistem daha esnek hale gelecek ve sonsuz rijit zemin durumuna göre hakim frekans değeri azalacaktır.
- Radyasyon sönümü ile, temelden zemin ortam içerisine doğru dalga yayılması ile ilgili sönüm, nihai dinamik sistemin sönüm oranında artış sağlanacaktır.

Çelebi (2005) bina türü yapıların dinamik davranışını önemli şekilde değiştiren yapı-zemin etkileşiminin üç etkisini “Temel rijitliği ve Sönüm, Temel seviyesindeki yer hareketi -serbest zemin hareketi arasındaki değişim ve Temel deformasyonu” olarak belirtmektedir.

### **2.2.1 Elastik zemin üzerine oturan tek serbestlik dereceli sistem için yapı-zemin etkileşimi**

Yapı-zemin etkileşimin önemli sonuçları Şekil 2.3 ‘te belirtilen tek serbestlik dereceli rijit, kütsüz, L şeklinde bir temel üzerinde yer alan, elastik zemin üzerine oturtulmuş bir sistem ile gösterilecektir. Burada yapı kütsesi “m”, rijitliği “k” ve sönüm katsayısı “c” ile temsil edilmektedir.

Eğer temel, kaya gibi rijit bir ortam üzerine oturtulmuşsa ortaya çıkan sistemin doğal frekansı sadece yapının kütle ve frekansına bağlı olacaktır.

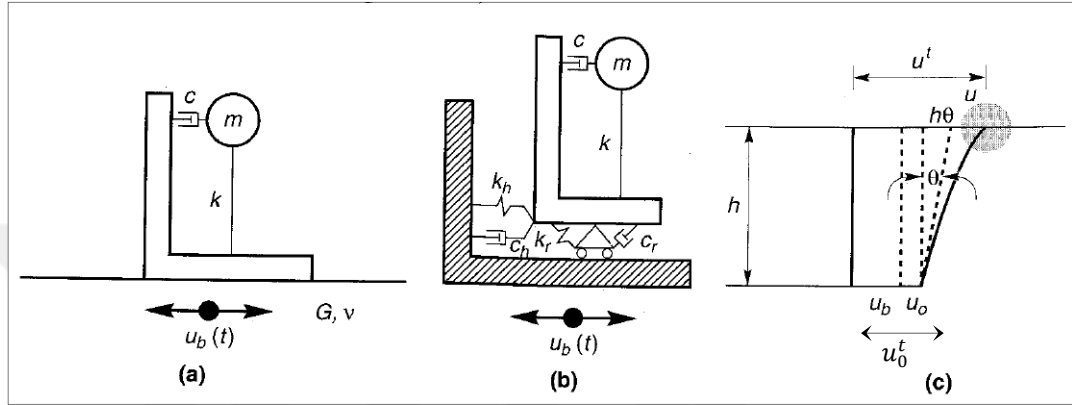
$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (2.1)$$



Histeretik sönüm katsayısı ise aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

$$\xi = \frac{c\omega_0}{2k} \quad (2.2)$$

Eğer temelin oturtulduğu ortam görece daha az rijit ve temelin zemine göre dönme ve ötelenme yapmasına müsaade ediyorsa temel-zemin sisteminin rijitlik ve sönüm özellikleri dönme-ötelenme yayları ve sönüm katsayıları ile ifade edilebilir (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3 :** Tek dereceli titreşim sistemi modeli a) Elastik zemin üzerinde TSDS sistemi; b) yay ve sönüm katsayıları ile idealiz edilmiş sistem c) Taban ve kütle hareketi (Kramer, 1996).

Fiziksel sistemlerde ısı-sürtünme vb. nedenlerle hareket sonsuza kadar devam etmez, enerji kaybına paralel olarak zamanla yavaşlar ve durur (Özkan , 2017). Bu sebepten ötürü kütle-yay sistemine bir sönüm elemanı, “c” de eklenerek daha gerçekçi matematik modeller kurulmuştur.

Zemin ortamlarda radyasyon ve malzeme sönümü olarak iki tür sönüm vasıtasıyla enerji kaybı olur. Geometrik sönüm olarak da bilinen radyasyon sönümü yapıdaki dinamik kuvvetler nedeniyle temel zeminin deforme olması ile üretilen gerilme dalgalarının zeminin sonsuzluğu içerisinde yayılması ile ortaya çıkan sönümdür ve poisson oranı, temelin kütlesi, eşdeğer yarıçap ve zeminin yoğunluğuna bağlı olarak değişir (Das & Ramana, 2011).

Malzeme sönümü aynı zamanda histeretik sönüm olarak da adlandırılır ve zemin içerisindeki elastik olmayan şekil değiştirmeler ile enerjinin soğurulması olarak ifade edilir. Malzeme sönümünün 0.01~0.1 arasında değiştiği ifade edilir ve temel tasarımı açısından ortalama olarak 0.05 değerinin kullanımı yeterli bir kabul olarak görülmektedir (Richart & Whitman , 1967).

Malzeme sönümü zeminde ortaya çıkacak deformasyonlarla ilgilidir ve küçük şekil değiştirmeler için ihmal edilebilir. Radyasyon sönümü ise tamamen geometrik bir etkidir ve zeminde ortaya çıkan şekil değiştirmenin oranından bağımsızdır. Genellikle radyasyon sönümü malzeme sönümünden daha büyüktür.

Şekil 2.3c’de belirtilen deplasmanlar aşağıdaki gibidir.

$$u^t = u_b + u_0 + h\theta + u \quad (2.3a)$$

$$u_0^t = u_b + u_0 \quad (2.3b)$$

Burada  $u^t$  toplam yatay deplasmanı,  $u_0$  temelin zemine göre ( $u_b$ ) deplasmanını,  $u$  ise kütlelin yapısal deformasyonu göstermektedir. Zeminin malzeme sönümü ihmal edilirse ( $\xi_g=0$ ) zemine etkileyen yanal yük aşağıdaki gibi olacaktır.  $x$  indisi ( $\xi_g=0$ ) durumu için yatay yönü ifade etmektedir.

$$P_x = k_x u_0 + c_x \dot{u}_0 \quad (2.4)$$

Harmonik hareket için malzeme sönümü kompleks rijitlik kullanımı ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_h = k_x(1 + i2\xi_x + i2\xi_g)u_0 \quad (2.5)$$

$P_h = k_h u_0 + c_h \dot{u}_0$  olduğundan dolayı yanal rijitlik ve sönüm katsayısı denklem 2.6a ve 2.6b deki gibi olacaktır. 2.6b denkleminin sağ tarafındaki 1. terim radyasyon sönümünü, 2. terim ise malzeme sönümünü ifade etmektedir.

$$k_h = k_x \quad (2.6a)$$

$$c_h = c_x + \frac{2}{\omega} \xi_g k_x \quad (2.6b)$$

Eğer yapının rijit ve temelin dönmediği ( $k_r=\infty$ ) kabul edilirse yanal hareket için doğal frekans denklem 2.7 belirtildiği gibi elde edilir. Aynı işlemler sallanma hareket modu için tekrar edilirse denklem 2.8’de belirtilen sonuçlara ulaşılır.

$$\omega_h = \sqrt{\frac{k_h}{m}} \quad (2.7)$$

$$k_r = k_\theta \quad (2.8a)$$

$$c_r = c_\theta + \frac{2}{\omega} \xi_g k_\theta \quad (2.8b)$$

$\Theta$  indisi malzeme sönümünün olmadığı anlamına gelmektedir. Eğer yapının rijit ve temelin ötelenmediği ( $k_h = \infty$ ) kabul edilirse sallanma hareketi için doğal frekans denklem 2.9 belirtildiği gibi elde edilir.

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{mh^2}} \quad (2.9)$$

Yukarıda elde edilen denklemler problemin genel çözümüne karşı gelmektedir. Şekil 2.3'tekine benzer eşdeğer bir sistem üzerinden zemin ve yapı birlikte ele alınarak yukarıdaki parametrelerin elde edilmesi ile yapı-zemin etkileşimi sonuçlarının anlaşılması sağlanacaktır. Bu eşdeğer sisteme ait parametreler "e" indisi ile gösterilmektedir.  $U_b$  eşdeğer girdi hareketini olmak üzere harmonik hareket denklemi  $(-m\omega^2 + i\omega c_e + k_e)u = m\omega^2 U_b$  formülü ile ifade edilebilir. Her iki model için de (eşdeğer ve gerçek model) kütle aynı kabul edilmiştir.

$$k_e = m\omega_e^2 \quad (2.10a)$$

$$\xi_e = \frac{c_e \omega}{2k_e} \quad (2.10b)$$

Eşdeğer sistemin yay ve sönüm katsayıları denklem 2.10'da belirtildiği gibidir. Eşdeğer modelin doğal frekansı " $\omega_e$ ",  $\xi_e = 0$  durumu için eşdeğer sistemin tepkisinin sonsuza gittiği frekanstır. Bu durum aşağıdaki eşitlikler sağlandığında olur.

$$\frac{1}{\omega_e^2} = \frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\omega_h^2} + \frac{1}{\omega_r^2} \quad (2.11a)$$

$$\omega_e = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{k}{k_h} + \frac{kh^2}{k_r}}} \quad (2.11b)$$

Denklem 2.11 yapı-zemin etkileşiminin önemli bir etkisini göstermektedir. Eşdeğer sistemin doğal açısal frekansı daima rijit temelin sonsuz rijit zemine taşıtıldığı durumdaki (fixed base) frekans değerinden daha azdır.

İkinci derece sönüm terimleri ihmal edilirse, etkileşimin göz önüne alındığı sistemde histeretik sönüm oranı aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\xi_e = \frac{\omega_e^2}{\omega_0^2} \xi + \left(1 - \frac{\omega_e^2}{\omega_0^2}\right) \xi_g + \frac{\omega_e^2}{\omega_h^2} \xi_x + \frac{\omega_e^2}{\omega_r^2} \xi_\theta \quad (2.12)$$

Denklem 2.12 yapı-zemin etkileşiminin bir diğer önemli etkisini göstermektedir. Tipik zemin ve temeller için sönüm oranı rijit temelin sonsuz rijit zemine taşındığı durumdaki (fixed base) sönüm oranından fazladır.

Etkileşimin göze alındığı eşdeğer sistemde temeldeki ötelenme ve dönme hareketleri sırasıyla Denklem 2.13 ve Denklem 2.14'te verilmiştir.

$$u_0 = \frac{\omega_0^2}{\omega_h^2} (1 + 2\xi_i - 2\xi_x i - 2\xi_g i) u \quad (2.13)$$

$$\theta = \frac{1}{h} \frac{\omega_0^2}{\omega_r^2} (1 + 2\xi_i - 2\xi_\theta i - 2\xi_g i) u \quad (2.14)$$

Şekil 2.3'te gösterilen kütleli eşdeğer sistemdeki hareketi temelin hareketi ( $u_0$ ), temelin dönmesi sonucu oluşan hareket ( $h\theta$ ) ve yapısal deformasyon ( $u$ )'nun toplamına eşit olacaktır.

$$u + u_0 + h\theta = \omega_0^2 \left[ \frac{1}{\omega_e^2} + 2(\xi - \xi_g) i \left( \frac{1}{\omega_e^2} - \frac{1}{\omega_0^2} \right) - \frac{2\xi_x i}{\omega_h^2} - \frac{2\xi_\theta i}{\omega_r^2} \right] u \quad (2.15)$$

Yapı-zemin etkileşimi sonuçlarının anlaşılması için Wolf (1985) tarafından yapı ve zeminin çeşitli özelliklerine bağlı olarak belirlenen aşağıdaki 5 adet boyutsuz parametre önerilmiştir.

Bu parametreler Denklem 2.16'da anlatılan sırasıyla: yapının rijitliğinin zeminin rijitliğine oranı, narinlik oranı, zeminin poisson oranı ve zeminin histeretik (malzeme) sönüm oranıdır.

$$\bar{s} = \frac{\omega_0 h}{V_s} \quad (2.16a)$$

$$\bar{h} = \frac{h}{a} \quad (2.16b)$$

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho a^3} \quad (2.16c)$$

Burada:

$\bar{s}$  : Yapının rijitliğinin zeminin rijitliğine oranını (Zeminin azalan rijitliğine göre  $\bar{s}$  artacaktır. Yüksek binalarda  $\omega_0$ , h ile ters orantılıdır. Bu tarz yapılar için  $\omega_0 h$  değerinin sabit olduğu düşünülebilir)

$\bar{h}$  : Narinlik oranını (  $a$  : dairesel temelin yarıçapı gibi, temelin boyu ile ilgili parametre)

$\bar{m}$ : Kütle oranını göstermektedir. (  $\rho$ : zeminin yoğunluğu= $G/V_s^2$ )

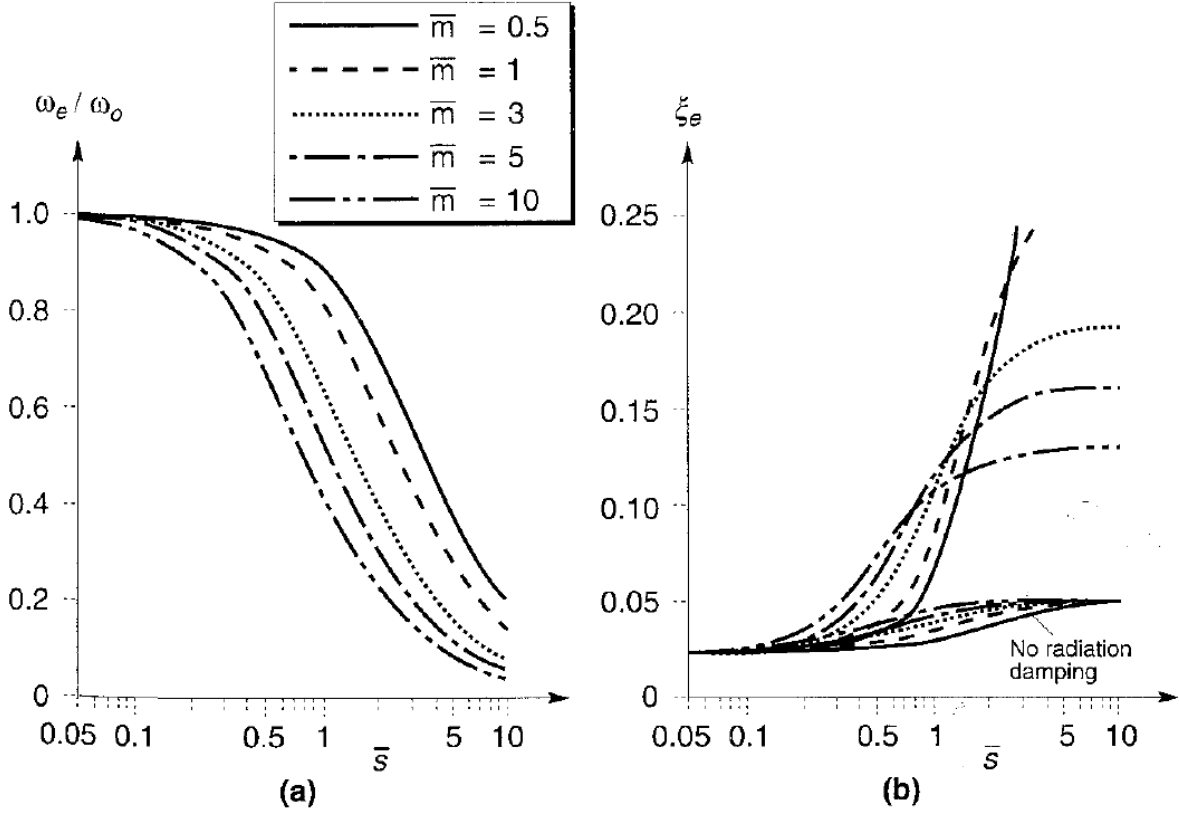
Wolf (1985) farklı  $\bar{m}$ ,  $\bar{s}$  ve  $\bar{h}$  oranlarına göre yaptığı parametrik çalışma ile Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilen grafikleri elde etmiştir.

Şekil 2.4a rijitlik oranının değişimine göre yapı-zemin sisteminin ( $\omega_e$ ) ve rijit temel-rijit zemin sisteminin ( $\omega_0$ ) doğal frekans oranlarının ve yapı-zemin sisteminin sönüm oranının ( $\xi_e$ ) değişimini göstermektedir. Artan rijitlik oranına paralel olarak yapı-zemin sisteminin doğal frekansı düşmektedir.  $\bar{s}=0$  durumu rijit temel-rijit zemin (fixed base) sistemini göstermektedir. Bu noktada her iki sistemin de doğal frekans değerleri aynıdır.

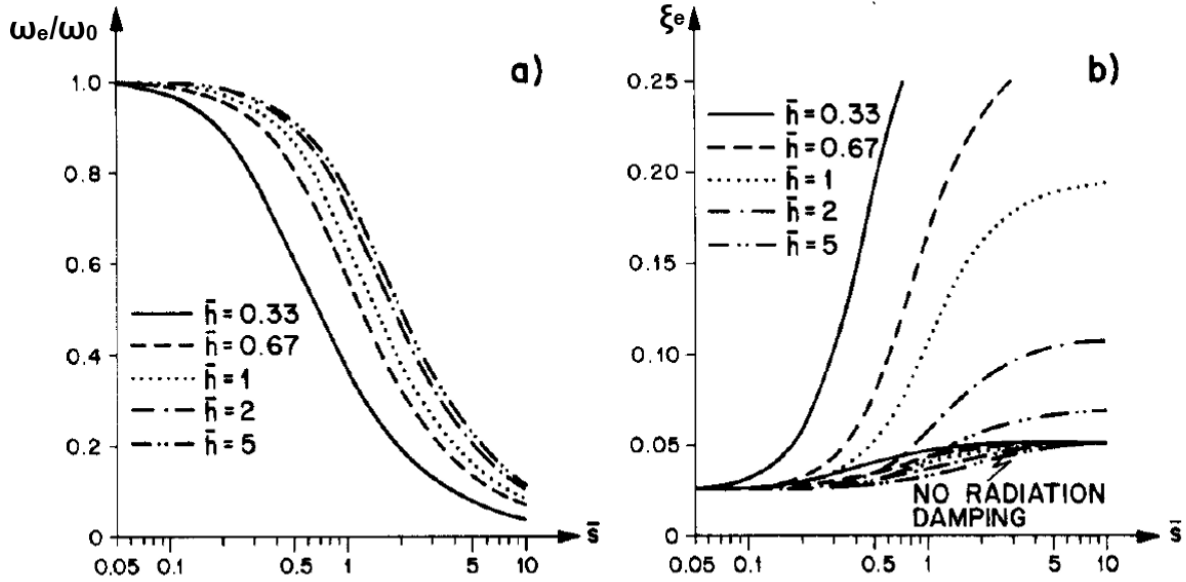
Şekil 2.4b'de ise sönüm oranının değişimi görülmektedir.  $\bar{s}=0$  (fixed base) durumunda sistemin sönümü yapının sönüm oranına (0.025) eşittir. Ancak rijitlik oranının artmasına paralel olarak radyasyon ve malzeme sönümünün etkisi daha görünür olmaktadır. Çok yüksek rijitlik oranlarında ise yapıda kaynaklı sönüm oranı toplam sönümün çok düşük bir yüzdesi haline dönüşmektedir.

Şekil 2.5 değişen rijitlik ve narinlik oranlarının doğal frekans ve sönüm oranlarına etkisini göstermektedir. Düşük  $\bar{h}$  değerlerinde sönüm oranının daha fazla olduğu,  $\bar{h}$  değerinin artmasına paralel sönüm oranının yapının sönüm oranı civarında şekillendiği görülmektedir ( 2.5b).

Doğal frekans oranları açısından ise  $\bar{h}$  değerlerinin etkisi şekil 2.5a'da görülmektedir. Düşük  $\bar{h}$  değerlerinde daha düşük frekans oranlarına rastlanılmaktadır. Artan narinlik oranına paralel frekans oranı artmakta aynı zamanda birbirine yakınsamaktadır. 0.33-0.67  $\bar{h}$  değerleri arasındaki fark 2-5  $\bar{h}$  değerlerinde görülenden daha fazla olmaktadır.



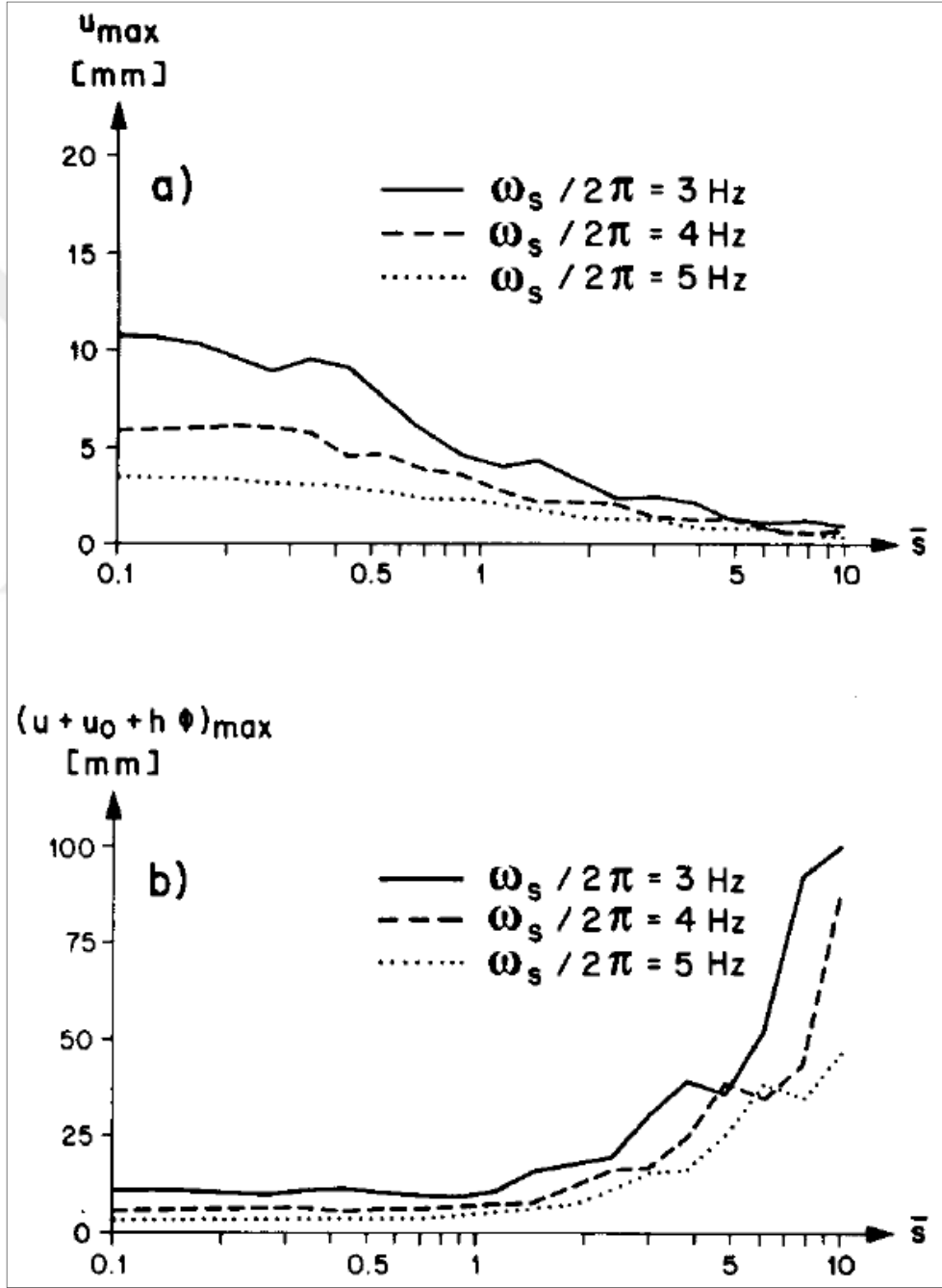
**Şekil 2.4 :** Rijitlik ve kütle oranının etkisi a) Doğal Frekans b) Yapı-zemin sisteminin sönüm oranı ( $\bar{h}=1$ ,  $\nu=0.33$ ,  $\xi=0.025$ ,  $\xi_g=0.05$ ) (Kramer, 1996).



**Şekil 2.5 :** Rijitlik ve narinlik oranının etkisi a) Doğal Frekans b) Yapı-zemin sisteminin sönüm oranı ( $\bar{m}=3$ ,  $\nu=0.33$ ,  $\xi=0.025$ ,  $\xi_g=0.05$ ) (Wolf, 1985).

Yapı-zemin etkileşiminin deplasmanlara etkisi ise Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Şekil 2.6a'da görüldüğü üzere artan rijitlik oranına bağlı olarak maksimum yapısal

deformasyonların azaldığı görülmektedir. Ancak zemine göre kütlelinin toplam deplasman değerinin ise artan rijitlik oranı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu durum yapı-zemin etkileşimi ile yapısal deformasyon talebinin azaldığı ancak temelin dönme ve ötelenmesine hareketleri nedeniyle toplam deplasman değerinin arttığı sonucunu ortaya koymaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin bu sonucu özellikle yüksek katlı, narın yapılar etrafında yakın mesafede başka yapılar bulunması durumunda kritiktir.



Şekil 2.6 : Yapay bir deprem hareketi altında maksimum deplasmanlar a) Yapısal deplasman b) Kütlelinin (m) zemine göre maksimum deplasmanı ( $\bar{h}=1$ ,  $\bar{m}=3$ ,  $\nu=0.33$ ,  $\xi=0.025$ ,  $\xi_g=0.05$ ) (Wolf, 1985).

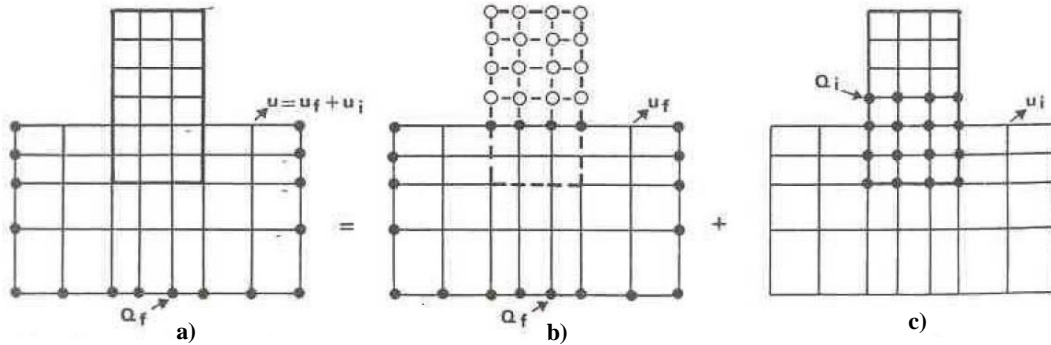
Yapı-zemin etkileşimi analizi yapı, temel ve zeminin bir deprem hareketi altındaki toplam tepkisini değerlendirir. Teorik olarak yapı-zemin etkileşimi sonuçları rijit zemine mesnetlenen rijit temel modeli için söz konusu değildir (NEHRP, 2012).

### 2.3 Yapı-Zemin Etkileşimi Analiz Yöntemleri

Bölüm 2.2’de tek dereceli titreşim sistemi üzerinde yapı-zemin etkileşiminin önemli sonuçları anlatılmıştır. Ancak gerçek bir problemin çözümü daha karmaşık çözüm metotları gerektirir. Yapı-zemin etkileşimi analizi için kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler “Direkt” yöntem (ortak sistem yöntemi) ve “Alt sistem” yöntemidir. Alt sistem yöntemi de kendi içinde “Kinematik etkileşim” ve “Eylemsizlik etkileşimi” olmak üzere iki aşamaya ayrılmaktadır.

#### 2.3.1 Yapı-zemin etkileşimi probleminin dinamik formülasyonu

Şekil 2.7’de yapı-zemin etkileşimi probleminin şematik gösterimi belirtilmektedir. Bu şekil üzerinden etkileşim probleminin genel formülasyonu sonlu elemanlar yöntemi bağlamında ele alınacaktır.



Şekil 2.7 : Yapı-Zemin etkileşimi probleminin şematik gösterimi (Pecker, 2007).

[M], [C], [K] ve  $Q_f$  sırasıyla kütle, sönüm, rijitlik matrisleri ve yük vektörünü göstermek üzere Şekil 2.7’deki sistem için dinamik denge denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{Q_f\} \quad (2.17)$$

Yapının bulunmadığı serbest yüzeyli yer hareketi durumunda hareket denklemi Denklem 2.17’nin f indisi ile ifade edilmiş hali olacaktır.



$$[M_f]\{\ddot{u}_f\} + [C_f]\{\dot{u}_f\} + [K_f]\{u_f\} = \{Q_f\} \quad (2.18)$$

Etkileşim deplasmanı  $\{u_i\}$  aşağıda gibi tanımlanır :

$$\{u\} = \{u_i\} + \{u_f\} \quad (2.19)$$

$$[M]\{\ddot{u}_i\} + [C]\{\dot{u}_i\} + [K]\{u_i\} = -\{Q_i\} \quad (2.20)$$

Serbest yüzeyle zemin deplasmanlarından elde edilen yük vektörü  $Q_i$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\{Q_i\} = [M] - [M_f] \{\ddot{u}_f\} + [C] - [C_f] \{\dot{u}_f\} + [K] - [K_f] \{u_f\} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21'den yapı ve zemin arasında kütle ve rijitlik açısından farklılık olduğunda etkileşimin olacağı anlaşılmaktadır.

Basitleştirmek adına denklem 2.21'deki sönüm terimi ihmal edilir ve problem yüzeysel temelli, yatay tabakalı zemin profili ve cisim dalgalarının düşeyde yayıldığı bir modele indirgenir ve temelin sonsuz rijit olduğu kabul edilirse (Denklem 2.21'deki rijitlik terimi çıkarılır) yük vektörü  $Q_i$  aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\{Q_i\} = [M] - [M_f] \{\ddot{u}_f\} \quad (2.22)$$

Yapının temelindeki  $Q_i$  yükleri (Şekil 2.7) üstyapıdaki eylemsizlik kuvvetlerine neden olur. Sonuç olarak etkileşimin sadece üstyapıdaki eylemsizlik kuvvetleri nedeniyle ortaya çıktığı bu duruma eylemsizlik etkileşimi denir.

Zemin seviyesinin üstündeki kısmın kütsüz olduğu ve zemin içinde kalan kısımda ise zemin ile arasında kütle farkı olmayan gömülü temel durumu göz önüne alınırsa (Denklem 2.21'deki kütle terimi çıkarılır) Denklem 2.1 aşağıdaki gibi yazılır.

$$\{Q_i\} = [K] - [K_f] \{u_f\} \quad (2.23)$$

Bu durumda  $Q_i$  yüklerinin sadece zemin ile gömülü yapı arasında bir rijitlik farkı olması durumunda ortaya çıkacağı anlaşılmaktadır. Kinematik etkileşim olarak adlandırılan bu durum temelin yüksek rijitliği nedeniyle zemindeki deplasmanları takip edememesinden kaynaklanmaktadır. Kinematik etkileşim yüzeysel temelli yapılarda ihmal edilebilecek seviyelerde olabilir , ancak rijit-gömülü temelli yapılarda ise çok önemli sonuçları olacaktır. (Pecker, 2007).

Yapı-zemin etkileşimi analizleri denklem 2.17'nin direk çözümüne dayanan Direkt yöntem (Şekil 2.7a) ve problemin eylemsizlik ve kinematik etkileşimi olarak ayrıştırıldığı alt sistem yöntemi ile (Şekil 2.7b- 2.7c) yapılabilir. Alt sistem yöntemi (Kausel vd., 1978) ve (Roesset vd., 1973) tarafından temelleri atılan süperpozisyon teoremine (Şekil 2.8) dayanmaktadır. Bu teoreme göre tabandan deprem hareketine ( $\ddot{u}_g$ ) maruz kalan Şekil 2.7a'daki sistemin tepkisi 2.24 denkleminin direkt çözümü veya iki aşamada ; rölatif deplasman vektörü  $\{u\}$ 'yu tanımlayarak ve 2.26-2.27 diferansiyel denklemlerini çözerek elde edilebilir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\{\ddot{u}_g\} \quad (2.24)$$

$$\{u\} = \{u_{kin}\} + \{u_{iner}\} \quad (2.25)$$

$$[M_{soil}]\{\ddot{u}_{kin}\} + [K]\{u_{kin}\} = -[M_{soil}]\{I\}\{\ddot{u}_g\} \quad (2.26)$$

$$[M_{soil}]\{\ddot{u}_{iner}\} + [K]\{u_{iner}\} = -[M_{st}][\{\ddot{u}_{kin}\} + \{I\}\{\ddot{u}_g\}] \quad (2.27)$$

$[M]$  ,  $[K]$  : Kütle ve Rijitlik Matrisleri

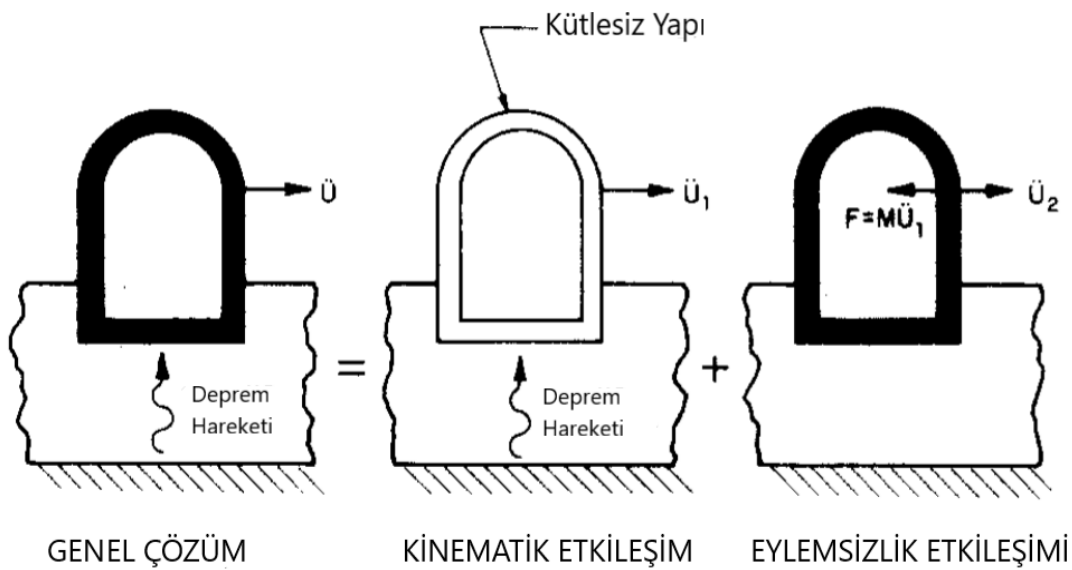
$[M_{soil}]$  ,  $[M_{str}]$  : Zemin altsisteminin ve yapının kütle matrisleri ,  $[M] = [M_{soil}] + [M_{str}]$  .

$\{u\}$ : Modelin tabanına göre rölatif deplasman vektörü

$\{u_{kin}\}$ : Kinematik etkileşim deplasmanı

$\{u_{iner}\}$ : Eylemsizlik etkileşimi deplasmanı

$\{I\}$ : Kuvvetin yönünü gösteren birim vektör



Şekil 2.8 : Süperpozisyon teoremi (Kausel, 1978) .

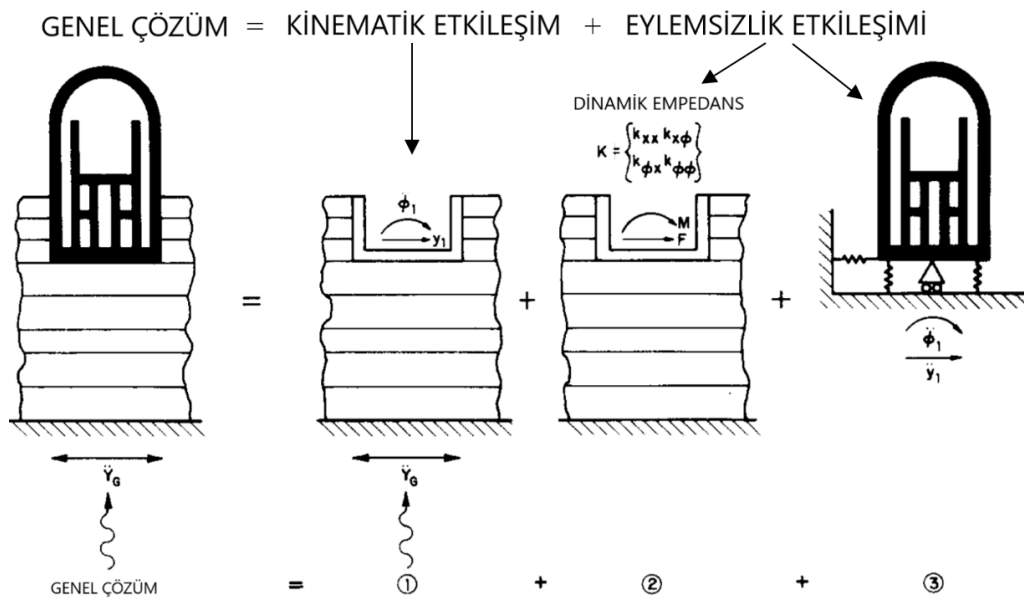
Denklem 2.26 kütlesiz bir yapının deprem hareketine ( $\ddot{u}_g$ ) verdiği tepkiyi göstermektedir. Bu denklemin çözümü denklem 2.27 için girdi hareketi olarak kullanılacak kinematik etkileşim hareketlerini verecektir.

Eylemsizlik etkileşimine denk gelen denklem 2.27'nin çözümünde zemin ortam sonlu elemanlar ile veya temel-zemin ara yüzündeki tüm serbestlik derecelerini içeren bir rijitlik matrisi ile tanımlanabilir. Zemin-temel sisteminin eşdeğer dinamik rijitliğini gösteren bu matrise empedans matrisi de denir. Empedans matrisi yapı-zemin ara yüzündeki frekans tabanlı rijitlik ve sönüm özelliklerini temsil eder. Rijit temeller için bu matris 3 boyutlu analiz durumunda 2 yatay eksen etrafında dönme-ötelenme bileşenleri ve dikey eksen etrafında ötelenme-burulma bileşenleri olmak üzere 6x6 mertebesinde olabilir.

Sonuç olarak rijit temel kabulü altında yapı-zemin etkileşimi genel çözümü üç aşamaya ayrılabilir :

- I. Taban hareketine maruz kalan kütlesiz rijit temelin hareketinin belirlenmesi (Kinematik etkileşim , denklem 2.26'nın çözümü)
- II. Yapı-zemin eşdeğer dinamik rijitliğinin belirlenmesi ( Empedans Matrisi)
- III. Kinematik etkileşim sonucunda elde edilen etkin temel hareketi ile üstyapı ve temelde oluşan eylemsizlik etkilerinin hesaplanması

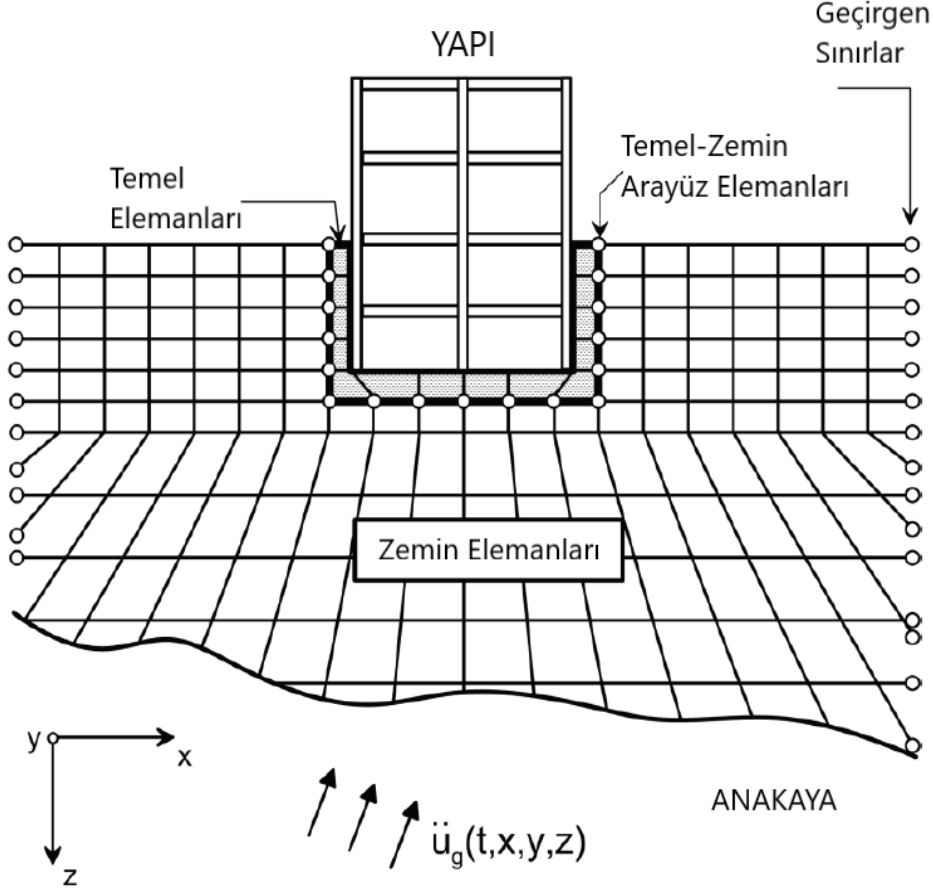
Bu üç aşama Kausel&Whitman (1978) tarafından etkileşim probleminin çözümüne dair geliştirilen 3 adım yöntemine denk gelmektedir ( Şekil 2.9)



Şekil 2.9 : Üç adım çözümü (Kausel&Whitman, 1978) .

### 2.3.2 Direkt yöntem (ortak sistem)

Bu yöntemde üstyapı-temel ve zeminin tek bir sonlu elemanlar modelinde zemin ve yapı elemanlarının bütün özellikleri birlikte tanımlanarak anakayadan verilen deprem hareketi altında analizi yapılır (Şekil 2.10) .



Şekil 2.10 : Direkt Analiz yönteminin şematik gösterimi (NEHRP, 2012).

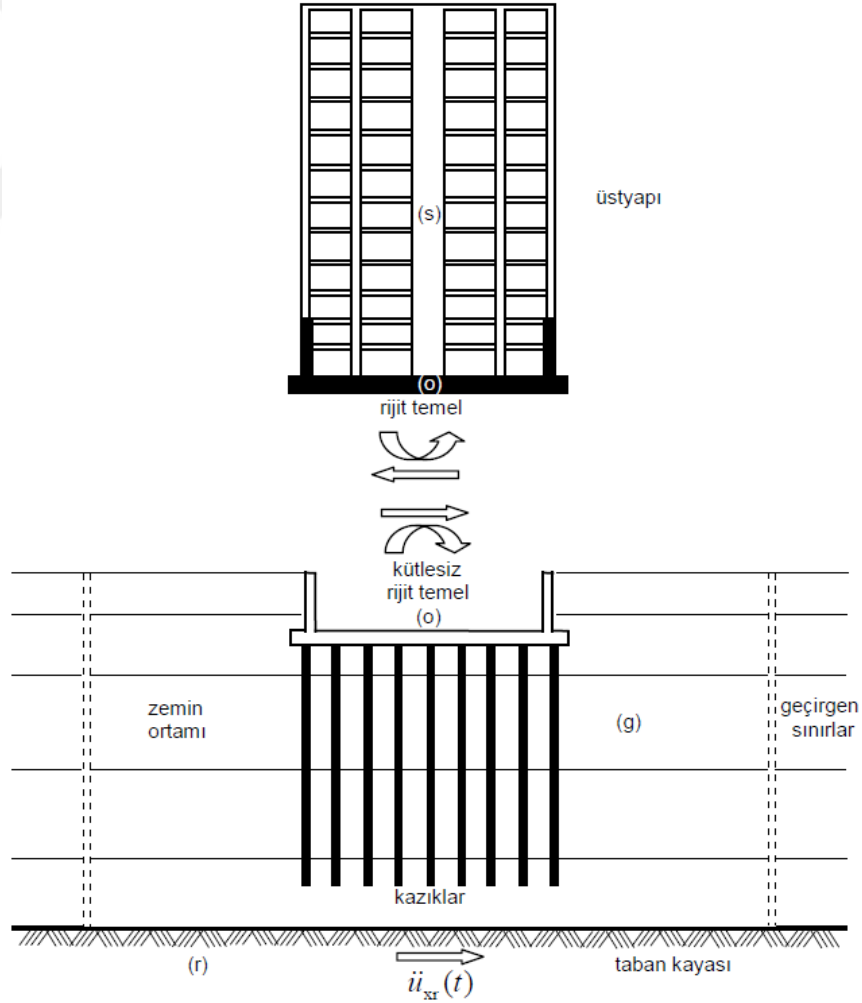
Kurulan sonlu elemanlar modelinde zemin ortam içerisinde yayılan dalgaların model sınırlarından tekrar içe doğru yansımalarını önlemek adına geçirgen sınır koşulları kullanılır. Bu yöntem yapı-zemin ortak sisteminin tek bir model ile analizi açısından pratik gözükse bile hem yapı hem de zeminin nonlinear davranışını göz önüne alabilecek çok güçlü bilgisayarlar ve yazılımlar gerektirmektedir. Ayrıca yapının ve zemin ortamının her türlü mekanik özellikleri ile birlikte modellenmesi farklı mühendislik disiplinlerinin birlikte yapabileceği bir işidir. Günümüzde köprü, bina vb. yapılar için kullanılan bu tarz yazılımlar mevcuttur. Ancak mühendislik pratiğinde henüz yaygınlaşmış değildir. Bu nedenlerle yapı-zemin etkileşimi analizleri için uygulamada genellikle altsistem yöntemi kullanılmaktadır.

### 2.3.3 Alt sistem yöntemi

Alt sistem yöntemi üstyapının ve zemin-kazık(varsa)-temel ortamının ayrı sistemler olarak modellendiği ve daha sonra her iki analizden elde edilen sonuçların süperpoze analiz yöntemidir (Şekil 2.11). Bu yöntem pratikte farklı disiplinlerce çalışılmasına olanak sağlaması açısından daha uygulanabiliridir.

Zemin-kazık-temel sisteminin modellenmesinde temel kütesiz, sonsuz rijit bir eleman olarak göz önüne alınır. Model sınırlarında geçirgen sınır koşulları kullanılır. Kazık ve zemin elemanlar nonlineer davranışlarını göz önüne alabilecek malzeme modelleri ile tanımlanırlar.

Altsistem yöntemi Kinematik ve Eylemsizlik etkileşimi olmak üzere iki ayrı aşamadan oluşmaktadır. Bu terimler 1975 yılında Robert Whitman tarafından kullanılmıştır (Kausel, 2010).

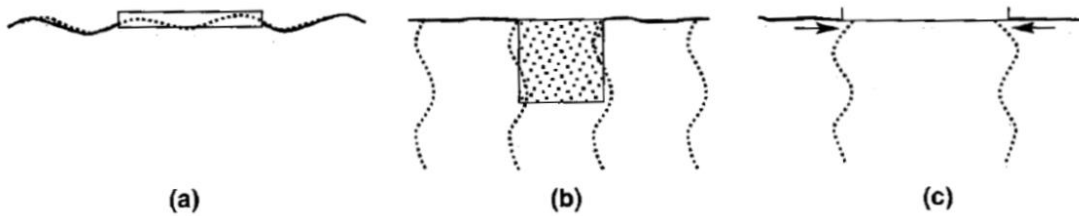


Şekil 2.11 : Kazıklı temel durumunda altsistem yönteminin şematik gösterimi (Aydınöglü, 2011).

### 2.3.3.1 Kinematik etkileşim

Kinematik etkileşim zemin içerisinde veya üzerinde rijit temel elemanlarının varlığı nedeniyle temel seviyesindeki deprem hareketinin serbest yüzeyli (free field ground motion) yer hareketinden farklı olmasından kaynaklanır. Serbest yüzeyli yer hareketi temel veya temel çevresinde dalga yayılmasından veya yapısal titreşimden etkilenmeyen yer hareketi olarak tanımlanmaktadır (Çelebi, 2005).

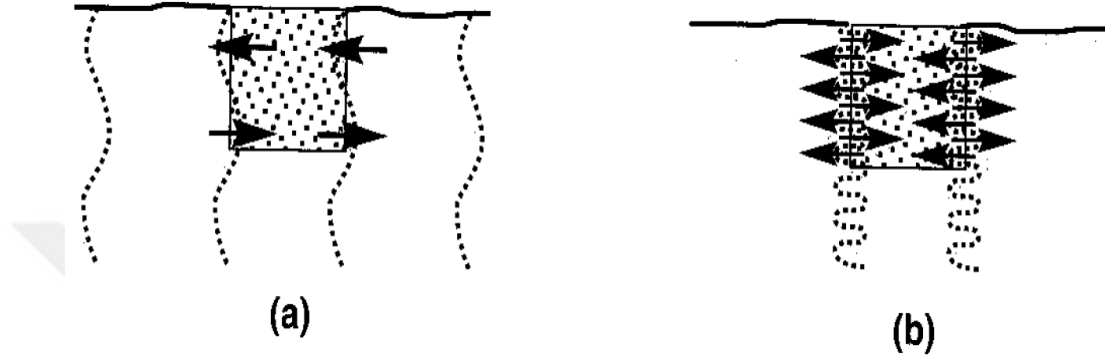
Serbest zemin davranışının gözlemlendiği koşullarda deprem hareketi zemin danelerinin yatay ve düşey yönde hareket etmesine neden olacaktır. Ancak zemin ortamında yüzeysel veya gömülü, kazıklı temel elemanlarının bulunması durumunda, bu elemanlar yüksek rijitlikleri nedeniyle zemin danelerinin deplasman şekillerini takip edemeyecekler ve bu elemanların hareketleri kinematik etkileşimden etkilenecektir. Örneğin Şekil 2.12a'da görüleceği gibi kütlesiz temelin eğilme rijitliği normalde temelin olduğu bölümde yatayda yayılan deprem dalgaları ( düşey parçacık hareketi) nedeniyle gerçekleşecek düşey deplasmanları (kesik çizgili) önleyecektir. Aynı şekilde 2.12b'deki gömülü temelin rijitliği kesik çizgi ile görülen düşeyde yayılan dalgaların (yatay parçacık hareketi) ortaya çıkardığı yatay deplasmanların engellenmesine neden olacaktır. Şekil 2.12c'de ise yüzeysel temelin aksel rijitliği o seviyedeki serbest zemin hareketini değiştirecektir.



**Şekil 2.12 :** Serbest yüzeyli yer hareketi ile kinematik etkileşim (kesik çizgiler serbest yüzeyli yer hareketi durumu) a) Yüzeysel temelin eğilme rijitliği nedeniyle serbest yüzeyli durumdaki düşey deplasman bileşeninin engellenmesi b) Gömülü temel rijitliği nedeniyle serbest yüzeyli durumdaki yatay deplasman bileşeninin engellenmesi c) Yüzeysel temelin aksel rijitliği nedeniyle temelin hemen altındaki zeminin bağımsız hareketinin engellenmesi (Kramer, 1996) .

Kinematik etkileşim bazı durumlarda söz konusu olmayabilir. Örneğin Şekil 2.12a'daki yüzeysel temel 2.12b deki gibi düşey yönde yayılan S dalgalarına ,yani yatay yönde parçacık hareketine, maruz kalması durumunda zemin hareketi rijit temel elemanları nedeniyle kısıtlanmayacaktır dolayısıyla kinematik etkileşim oluşmayacaktır.

Kinematik etkileşim yapıda farklı titreşim modlarına neden olacaktır. Örneğin Şekil 2.13'deki gömülü temel gömme derinliğine eşit bir dalga boyundaki düşey doğrultuda yayılan S dalgasına maruz kaldığında temelde devrilme momenti ve buna bağlı olarak sallanma ve ötelenme hareketleri oluşacaktır. Farklı frekanslarda ise bu döndürme hareketi ortaya çıkmayacak, daha küçük dalga boyu hareket temelde burulma titreşimlerine neden olacaktır ( Şekil 2.13b)



**Şekil 2.13** : Düşeyde yayılan S dalgaları altında sallanma hareketi a) Devrilme momenti etkisi ile sallanma b) Burulma (Kramer, 1996).

### **Kinematik etkileşimde modelleme**

TBDY (2018)'de kazıklı temeller için yapı-zemin-kazık etkileşimi analiz yöntemleri için göz önüne alınması gereken modelleme esasları belirtilen her bir çözüm yöntemi için detaylıca anlatılmaktadır. Bölüm 3 içerisinde bu çözüm yöntemi ve modelleme esaslarına değinilmiştir. Bu bölümde ise kazıklı temel durumunda göz önüne alınması gereken genel modellenme şartlarından bahsedilecektir.

Kinematik etkileşim analizi özellikle kazıklı temellerde kazık davranışının incelenmesi açısından kritik bir işleve sahiptir. Zemine göre çok daha rijit olan kazıklar deprem esnasında zemindeki deplasmanları takip edemeyecek ve zeminin kazıklara abanması sonucu özellikle temeğe bağlantı noktasında büyük kesit tesiri değerleri ortaya çıkacaktır (Aydınöğlü, 2011).

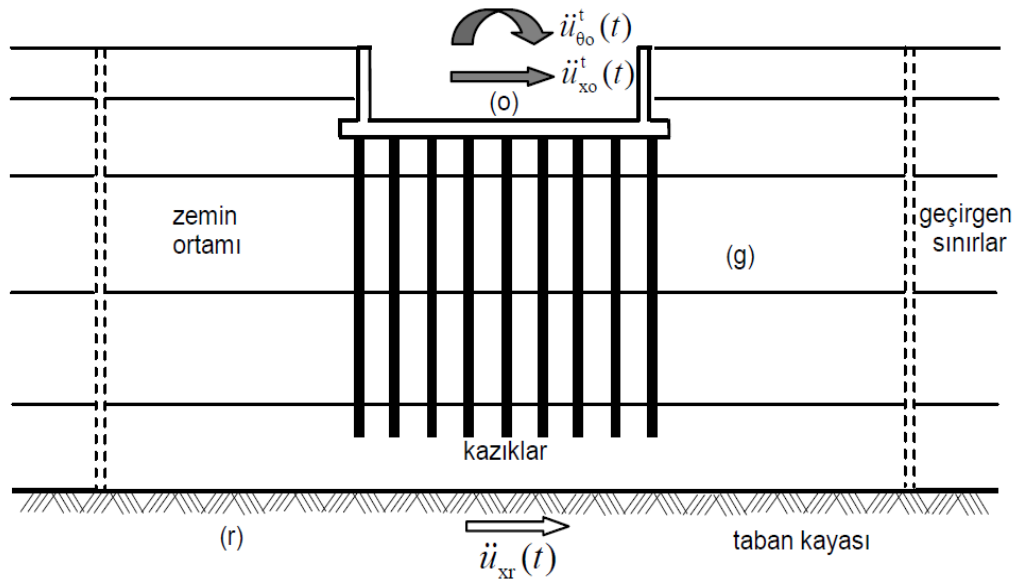
Yapı-zemin-kazık altsisteminden oluşan kinematik etkileşim modelinin taşınması gereken genel şartlar aşağıdaki gibi özetlenebilir :

- Şekil 2.14'te gösterildiği gibi model sınırlarında deprem dalgalarının tekrar model içine yansımaları engelleyecek veya minimuma indirecek geçirgen sınır koşulları kullanılmalıdır.
- Taban kayası ve model sınırları temelden yeteri kadar uzakta tanımlanmalıdır.

- Zemin ortamının deprem etkisi altında nonlinear davranışını göz önüne alabilecek malzeme modelleri kullanılmalıdır.
- Zemin ve kazıklar(varsa) kütleleri ve rijitlikleri ile birlikte tanımlanmalı, temel ise kütleli sonsuz rijit olarak tanımlanmalıdır.
- Taban kayasından yönetmeliklerde belirtilen sayıda deprem kaydı takımının tanımlanması ile (TBDY 2018’de 11 çift olarak belirtilmektedir) analiz edilmelidir.

### Kinematik etkileşimde analiz çıktıları

Kinematik etkileşim analizi sonucunda sonsuz rijit temel seviyesinde etkin temel hareketlerinin dönme ve ötelenme bileşenleri (temel seviyesi deprem kayıtları) ve kazıklı temellerde kazıklardaki kesit tesirleri ve deplasmanlar elde edilir. Üstyapı kinematik etkileşimde göz önüne alınmadığı için üstyapıda herhangi bir etki ortaya çıkmaz.

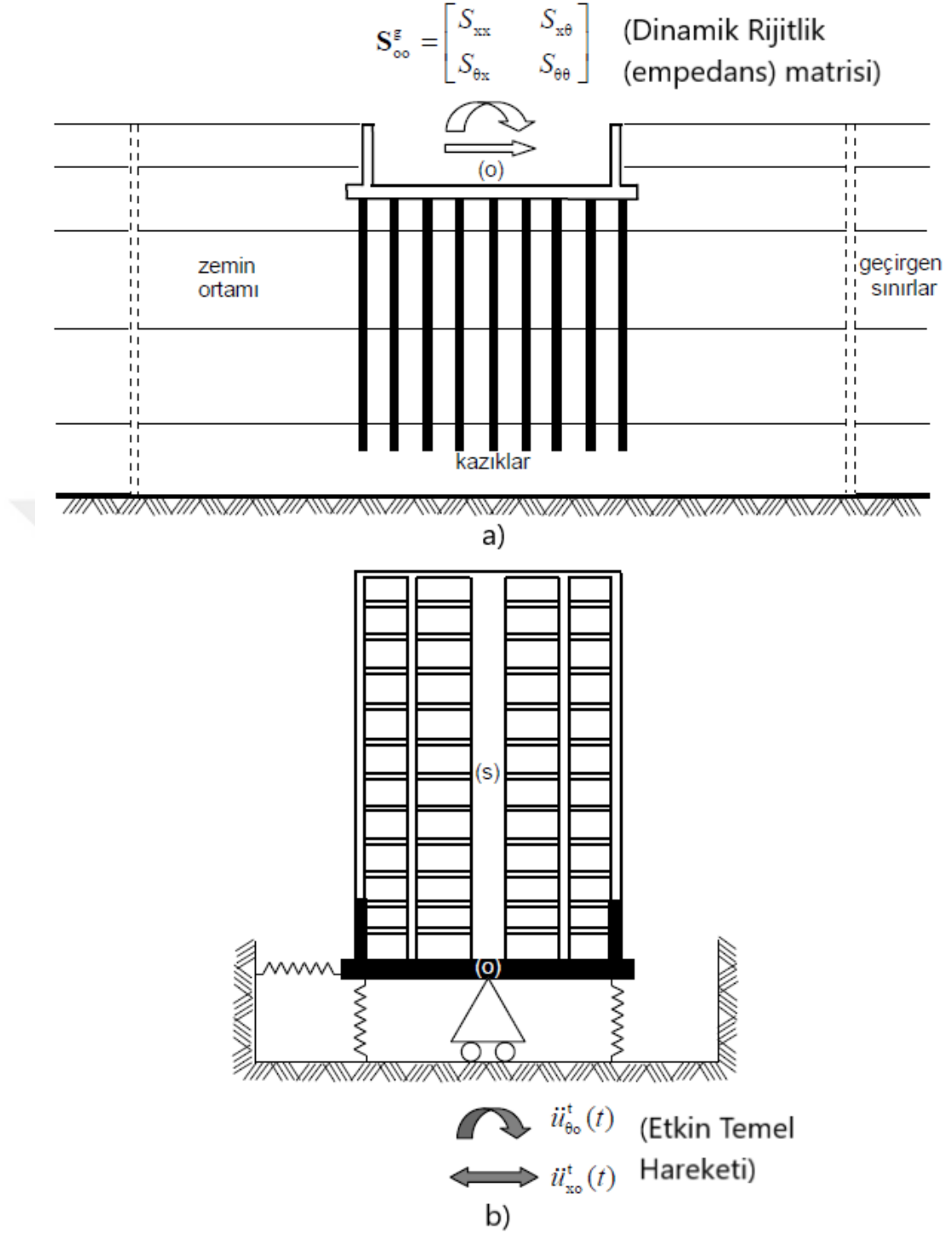


Şekil 2.14 : Yapı-Zemin-Kazık Kinematik Etkileşim Modeli (Aydinoğlu, 2011).

### 2.3.3.2 Eylemsizlik etkileşimi

Üç adım yöntemine göre kinematik etkileşimden sonraki adımlar eylemsizlik etkileşimi kapsamında değerlendirilmektedir. Eylemsizlik etkileşimi en genel anlamıyla kinematik etkileşim analizinin çıktısı olarak elde edilen etkin temel hareketlerinin, temel tabanından tanımlanan etkileşim yayları üzerinden etki ettirilmesi ile yapılan üstyapı dinamik analizidir (Şekil 2.15).





**Şekil 2.15 :** Yapı-Zemin-Kazık Eylemsizlik Etkileşimi, a) Zemin-kazık altsisteminin eşdeğer dinamik rijitliği, b) Üstyapı-temel altsisteminin eylemsizlik etkileşimi analizi (Aydınoğlu, 2011).

### Zemin-Kazık Alt sisteminin dinamik rijitliği

Üç boyutlu bir analiz kapsamında zemin-kazık altsistemi modelinde empedans matrisinin elde edilmesi için yatay iki eksen yönünde ve bu eksenler etrafında (özel durumlarda düşey eksen doğrultusunda dönme ve ötelenme de ilave edilir) birim

harmonik yükler ve birim harmonik momentler etkililerek hesaplanan ötelenme ve dönme bileşenlerinden oluşan 4x4 mertebeli dinamik fleksibite matrisinin tersi alınarak aynı mertebede (4x4) eşdeğer dinamik rijitlik matrisi elde edilir (Aydınöglü, 2011). Düşey eksen etrafındaki ötelenme ve dönme bileşenlerinin göz önüne alınması durumunda 6x6 'lık bir matrise ulaşılır. İki boyutlu analiz durumunda ise yatay yönde etki ettirilen birim harmonin yüklemeler neticesinde 2x2'lik bir dinamik rijitlik matrisi elde edilir (Şekil 2.15a)

### **Eylemsizlik etkileşiminde modelleme**

Eylemsizlik etkileşimi analizinde modelleme esasları genel hatları ile aşağıdaki gibi olacaktır :

- Bina üstyapısı temel ve varsa bodrum katlar ile birlikte kütleleri de göz önüne alınarak modellenir.
- Üstyapı elemanları yönetmeliklerde belirtilen şekilde (nonlineer, lineer vs.) olarak modellenir.
- Kinematik etkileşim analizi sonucunda elde edilen etkin temel hareketleri, temel tabanında tanımlanmış olan etkileşim yayları üzerinden üstyapı-temel sistemine etki ettirilir.
- Üstyapıya dair analiz olan Eylemsizlik etkileşimi analizi konusunda uzman yapısal tasarım mühendisi tarafından yapılır.

### **Eylemsizlik analizinin çıktıları**

Etkin temel hareketlerinin üstyapı-temel sistemine etki ettirilmesi ile üstyapıda eylemsizlik kuvvetleri oluşur. Bu eylemsizlik kuvvetleri tabanda kesme, moment ve burulma etkilerine dolayısıyla temelin serbest zemine göre ötelenme ve dönme hareketi yapmasına yol açar. Bu bağlamda eylemsizlik etkileşimi analizi sonucunda :

- Üstyapı ve temelde kesit tesirleri ve deplasman-şekil değiştirme değerleri elde edilir.
- Temel tabanında tanımlanmış olan yaylarda oluşan yer değiştirme ve kuvvet değerleri elde edilir. Bu değerlerden yararlanılarak kazıklarda oluşan kuvvet ve şekil değiştirme değerleri hesaplanır.

Eylemsizlik etkileşiminin üstyapıdaki sonuçları açısından yeni deprem yönetmeliğinde (TBDY, 2018) önemli bir vurgu yapılmaktadır. Bu vurgu eylemsizlik

etkileşimi sonucunda elde edilen değerlerin etkileşim etkilerinin göz önüne alınmadığı (sonsuz rijit zemin) durumdaki analiz ile hesaplanan değerlerden daha küçük olması durumunda üstyapıda etkileşim etkilerinin göz ardı edilmesidir. Kazıkların tasarımı açısından ise kinematik etkileşim kritik bir rol oynamaktadır. Deprem yönetmeliğinde belirtildiği üzere kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşimi analizleri ile kazıklarda elde edilen şekil değiştirme ve iç kuvvet değerleri analiz sonuçlarının mutlak değerlerinin toplamı olarak birleştirilecek ve böylece tasarıma esas değerler hesaplanacaktır.





### 3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİNE GÖRE YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ ESASLARI

Bölüm 2’de yapı-zemin etkileşimine dair genel teorik bilgiler ve çözüm yaklaşımlarından bahsedilmiştir. Bu bölümde ise 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye bina deprem yönetmeliğinin Ek16C bölümünde verilen yapı-kazık-zemin dinamik etkileşimine dair hesap esasları ve bu hesaplarda gerekli olan bilgiler detaylıca anlatılmıştır.

#### 3.1 TBDY Genel Bilgiler

Bina deprem yönetmeliğinde yer alan ve etkileşim analizleri açısından bilinmesi gereken genel konular bu bölüm altında anlatılmaktadır.

##### 3.1.1 Deprem yer hareketi düzeyleri ve tasarım spektrumları

Bina deprem yönetmeliğinde dört farklı deprem yer hareketi düzeyi tanımlanmıştır. Bu deprem düzeyleri sırasıyla aşağıdaki gibidir :

- **DD-1: Göz önüne alınan en büyük deprem hareketi** olarak adlandırılan çok seyrek deprem yer hareketidir.
- **DD-2: Standard tasarım deprem yer hareketi** olarak adlandırılır. Seyrek deprem yer hareketine karşı gelmektedir.
- **DD-3: Sık deprem yer hareketlerine** karşı gelir.
- **DD-4: Servis deprem yer hareketi** olarak tanımlanır ve çok sık deprem yer hareketlerini kapsar.

Bahsedilen deprem yer hareketlerinin 50 yılda aşılma olasılıkları ve tekrarlanma periyotları aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

**Çizelge 3.1** : Deprem yer hareketi düzeyleri (TBDY, 2019).

Yer Hareketi Düzeyi	50 yılda Aşılma Olasılığı	Tekrarlanma Periyodu
DD-1	2%	2475 Yıl
DD-2	10%	475 Yıl
DD-3	50%	72 Yıl
DD-4	68%	43 Yıl

Tanımlanan farklı deprem seviyeleri için deprem verilerine [//tdth.afad.gov.tr/](http://tdth.afad.gov.tr/) web adresi üzerinden istenilen noktanın koordinatları girilerek ulaşılabilir. Bu veriler 2018 Ocak ayında yürürlüğe giren “ Deprem Tehlike Haritaları” içerisinde anlatılmıştır.

Deprem yer hareketi düzeyleri için %5 sönüm oranına göre deprem yer hareketi spektrumları tanımlanmaktadır. Bu spektrumların tanımlanmasında harita spektral ivme katsayıları  $S_S - S_1$  ve yerel zemin etki katsayıları  $F_S - F_1$  kullanılmaktadır.

Harita spektral ivme katsayıları 1 saniye periyot için  $S_1$  ve kısa periyot değerleri için  $S_S$  olarak belirtilmiştir. Bu katsayılar x-y yatay doğrultularındaki deprem hareketlerinin geometrik ortalamasına karşı gelmekte ve  $(V_S)_{30} = 760\text{m/s}$  değerine karşı gelen zemin sınıfına göre %5 sönüm oranı için harita spektral ivmelerinin yerçekimi ivmesine bölünmesi ile elde edilmektedir (TBDY, 2018).

Yukarıda belirtildiği üzere referans zemin koşuluna  $((V_S)_{30} = 760\text{m/s})$  göre tanımlanan harita spektral ivme katsayıları üzerinde istenilen lokasyonun yerel zemin sınıfına göre elde edilen  $F_S - F_1$  katsayıları ile çarpılarak tasarım spektral ivme katsayılarına ( $S_{DS} - S_{D1}$ ) dönüştürülür.

Denklem 3.28 ile yatay – düşey elastik tasarım spektrumları elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} S_{DS} &= S_S F_S \\ S_{D1} &= S_1 F_1 \end{aligned} \quad (3.28)$$

$F_S - F_1$  katsayıları sırasıyla aşağıda belirtilen tablolardan veya [//tdth.afad.gov.tr/](http://tdth.afad.gov.tr/) web adresi üzerinden istenilen bölgenin koordinatları, deprem düzeyi ve yerel zemin sınıfı girilerek elde edilebilir. Ara değerler için interpolasyona başvurulur.

**Çizelge 3.2 :** Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı FS (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için <i>Yerel Zemin Etki Katsayısı</i>					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1	1
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	<i>Sahaya özel zemin davranış analizi ile belirlenir</i>					

**Çizelge 3.3 :** 1.0 sn. periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı F1 (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için <i>Yerel Zemin Etki Katsayısı</i>					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2
ZF	<i>Sahaya özel zemin davranış analizi ile belirlenir</i>					

Yerel zemin sınıfının ZF olması durumunda ise elastik tasarım spektrumları sahaya özel zemin davranış analizi ile tespit edilecektir.

Yönetmelikte yatay elastik tasarım spektrumu göz önüne alınan deprem düzeyi için yerçekimi ivmesi ( $g$ ) cinsinden aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (TBDY, 2018).

$$\begin{aligned} S_{ae}(T) &= \left( 0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A} \right) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_A) \\ S_{ae}(T) &= S_{DS} & (T_A \leq T \leq T_B) \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & (T_L \leq T) \end{aligned} \quad (3.29)$$

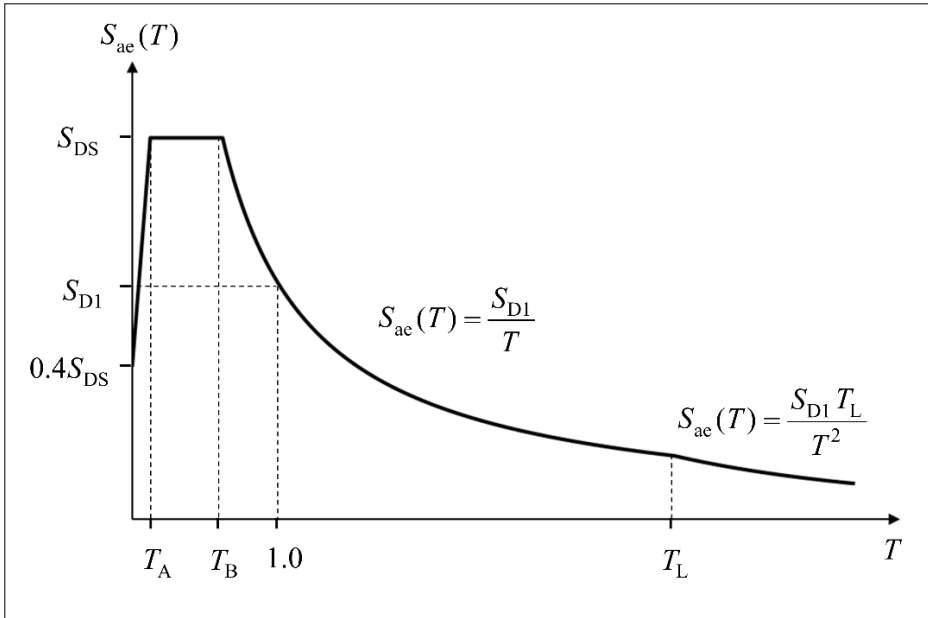
$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$S_{DS}$  -  $S_{D1}$  değerleri tasarım spektral ivme katsayılarını ,  $T$  doğal titreşim periyodunu ,  $T_A$  ve  $T_B$  ise spektrum köşe periyotlarını göstermektedir.  $T_L$  ise sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodudur ve 6 s olarak alınmalıdır.

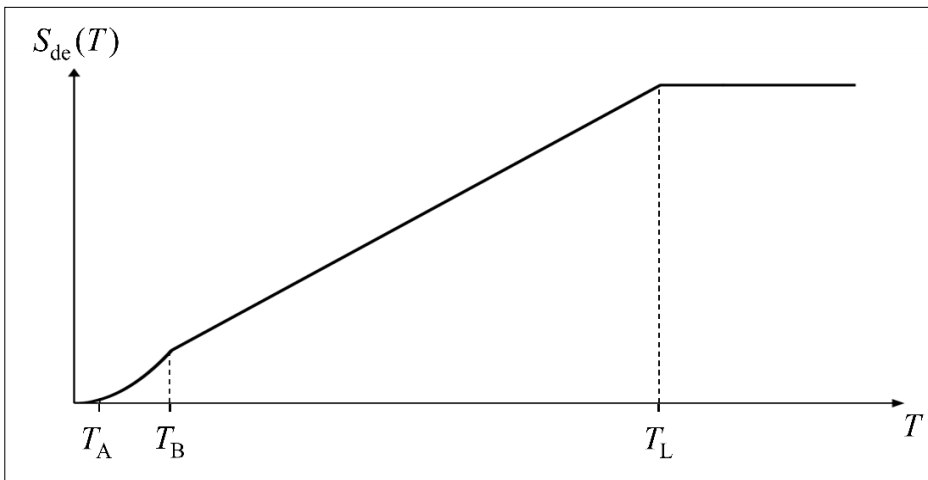
Yönetmelikte ayrıca yatay elastik tasarım spektral yer değiştirme spektrumu da tanımlanmıştır ve aşağıdaki formül ile ifade edilmiştir.

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} g S_{ae}(T) \quad (3.30)$$

Bu formüllere göre Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülen  $S_{ae}(T) - T$  ve  $S_{de}(T) - T$  grafikleri yerçekimi ivmesi “g” cinsinden oluşturulmaktadır.



Şekil 3.1: Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018) .



Şekil 3.2 : Yatay elastik tasarım yerdeğiştirme spektrumu (TBDY, 2018) .

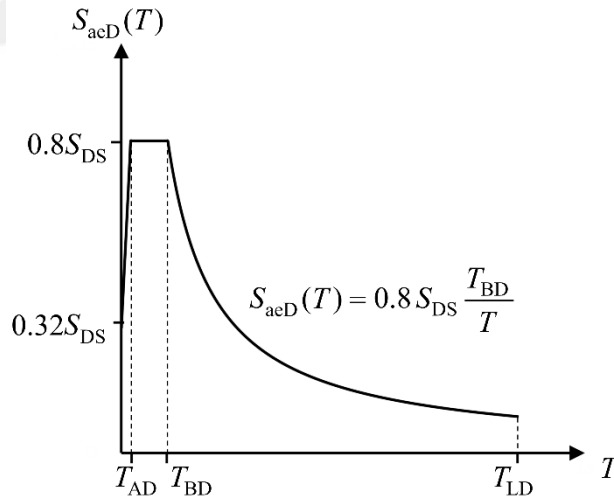


Düşey elastik tasarım spektrumu ise TBDY (2018) içerisinde aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Burada  $T_{AD}$  ve  $T_{BD}$  düşey spektrum köşe periyotlarını,  $T_{LD}$  ise sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodunu göstermektedir (Şekil 3.3).  $S_{aeD}(T)$  ise düşey elastik tasarım spektral ivme katsayısıdır.

Gerek yatay gerek düşey tasarım spektrumları istenilen bölgenin koordinatları ve deprem düzeyi, yerel zemin sınıfı girilerek yukarıda belirtilen web adresi üzerinden hesaplatılabilmekte ve rapor halinde çıktısı alınabilmektedir. Daha düzenli bir yöntem olması açısından web sitesi üzerinden rapor çıktısı vasıtasıyla bu bilgilerin temin edilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

$$\begin{aligned}
 S_{aeD}(T) &= \left( 0.32 + 0.48 \frac{T}{T_{AD}} \right) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_{AD}) \\
 S_{aeD}(T) &= 0.8 S_{DS} & (T_{AD} \leq T \leq T_{BD}) \\
 S_{aeD}(T) &= 0.8 S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} & (T_{BD} \leq T \leq T_{LD})
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

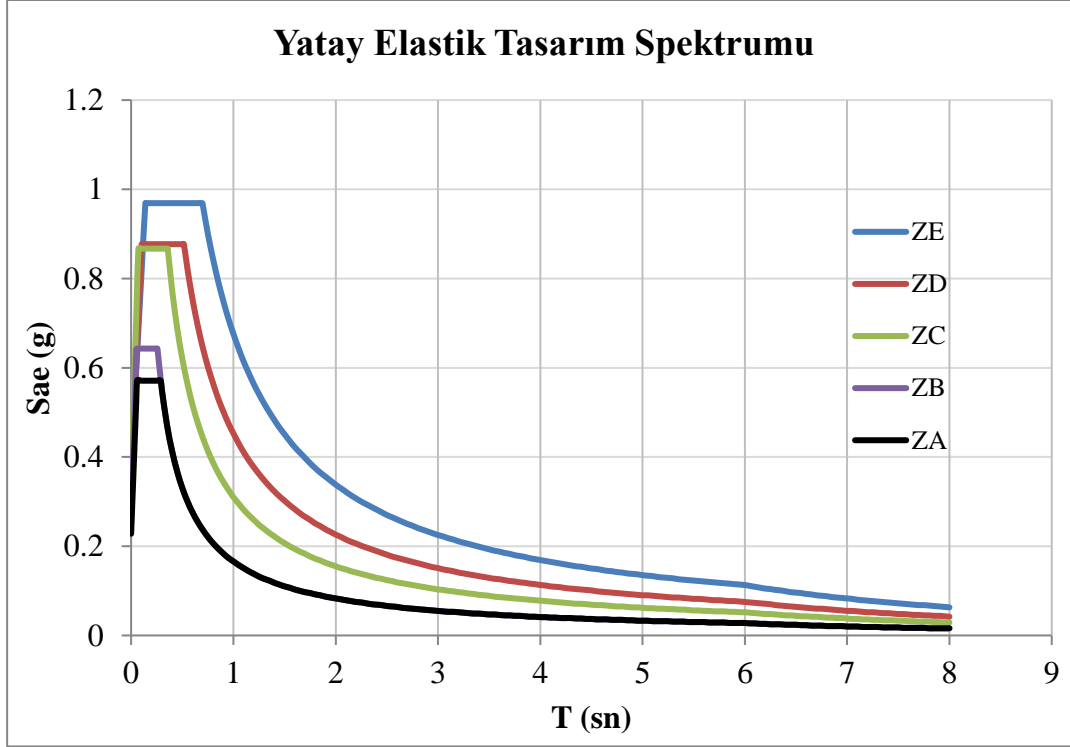
$$T_{AD} = \frac{T_A}{3} \quad ; \quad T_{BD} = \frac{T_B}{3} \quad ; \quad T_{LD} = \frac{T_L}{2}$$



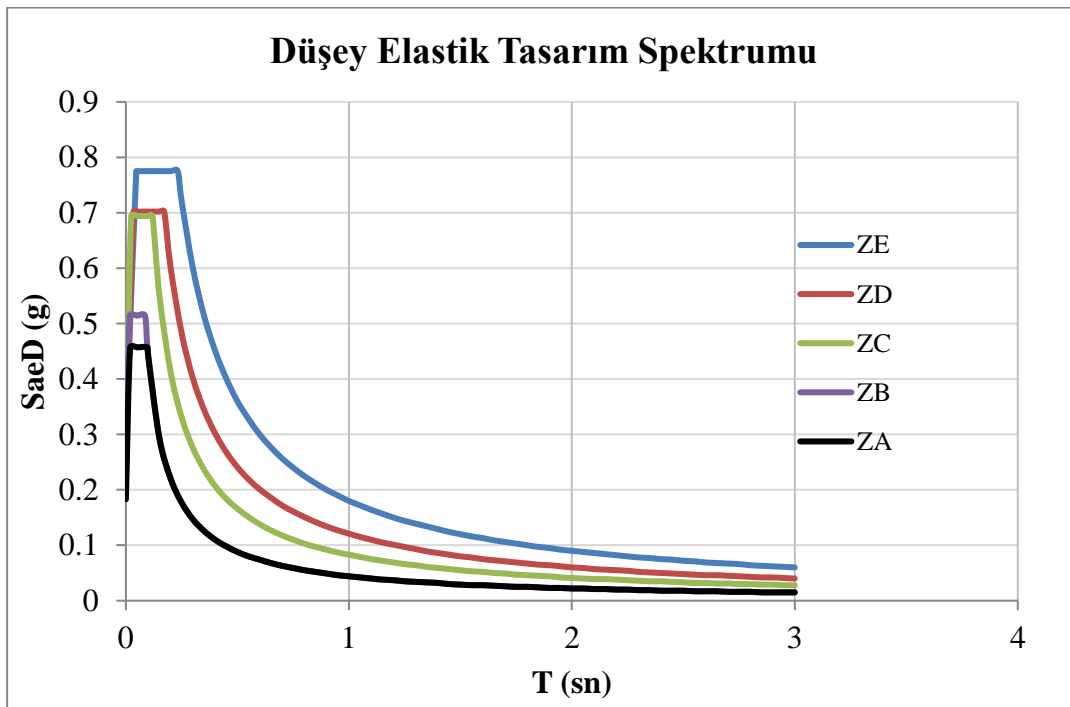
**Şekil 3.3 :** Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018) .

Gerek yatay gerek düşey tasarım spektrumları istenilen bölgenin koordinatları ve deprem düzeyi, yerel zemin sınıfı girilerek yukarıda belirtilen web adresi üzerinden hesaplatılabilmekte ve rapor halinde çıktısı alınabilmektedir. Daha düzenli bir yöntem olması açısından web sitesi üzerinden rapor çıktısı vasıtasıyla bu bilgilerin temin edilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

İTÜ maslak kampüsü içerisinde rastgele seçilen  $41.105295^\circ$  (enlem) ve  $29.021684^\circ$  (boylam) koordinatlarındaki bölge için farklı yerel zemin sınıflarına göre yatay-düşey tasarım spektrumlarının değişimi <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH> web adresi üzerinden temin edilerek aşağıda Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Yatay elastik tasarım spektrumu ve zemin sınıfları .



Şekil 3.5 : Düşey elastik tasarım spektrumu ve zemin sınıfları .

### 3.1.2 Deprem yer hareketlerinin seçilmesi ve ölçeklenmesi

#### 3.1.2.1 Deprem yer hareketlerinin seçilmesi

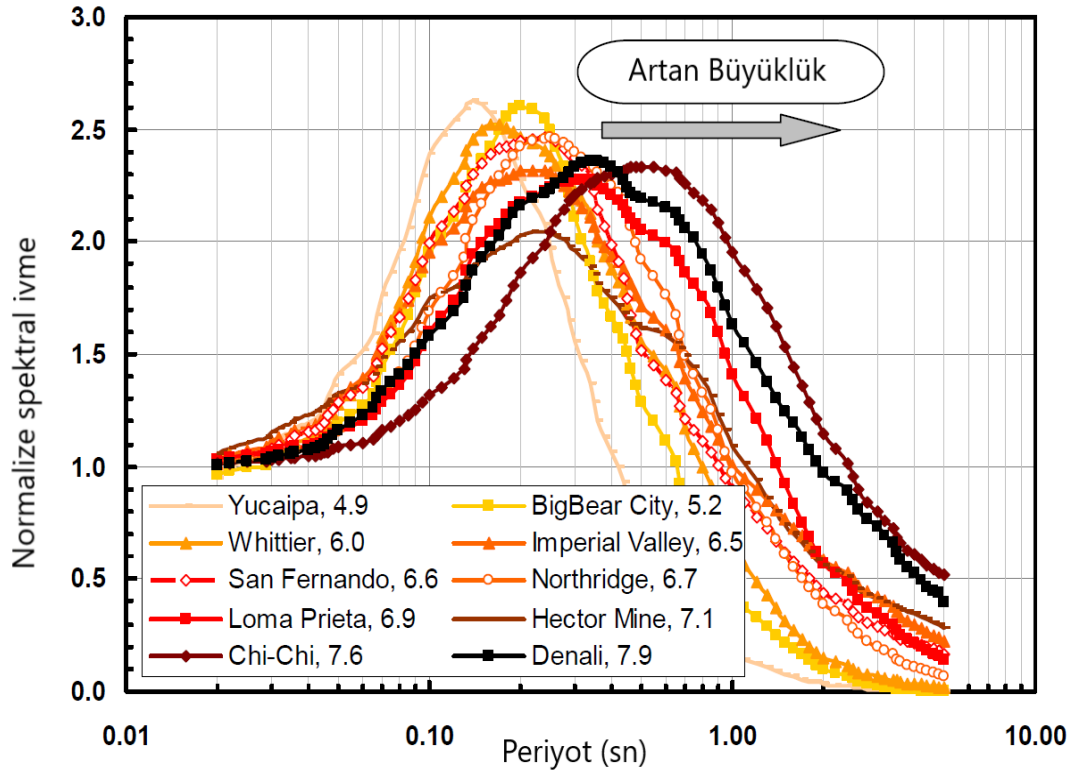
Yönetmelikte yapı-kazık-zemin etkileşim analizlerinde en az 11 çift deprem kaydının kullanılması şart koşulmuştur. Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklenmesi başarılı bir depreme dayalı analiz yapılabilmesi açısından eşit derecede önemli süreçlerdir (Kalkan & Chopra, 2010).

Deprem kayıtları yapay yollar kullanılarak, kaynak ve yayılım özellikleri benzeştirilerek ve gerçek deprem kayıtları üzerinden elde edilebilmektedir. Yönetmeliklerde öncelikle gerçek depremlerden elde edilen kayıtların kullanılması, yeterli sayıda kaydın temin edilememesi durumunda diğer seçeneklere geçilmesi belirtilmektedir.

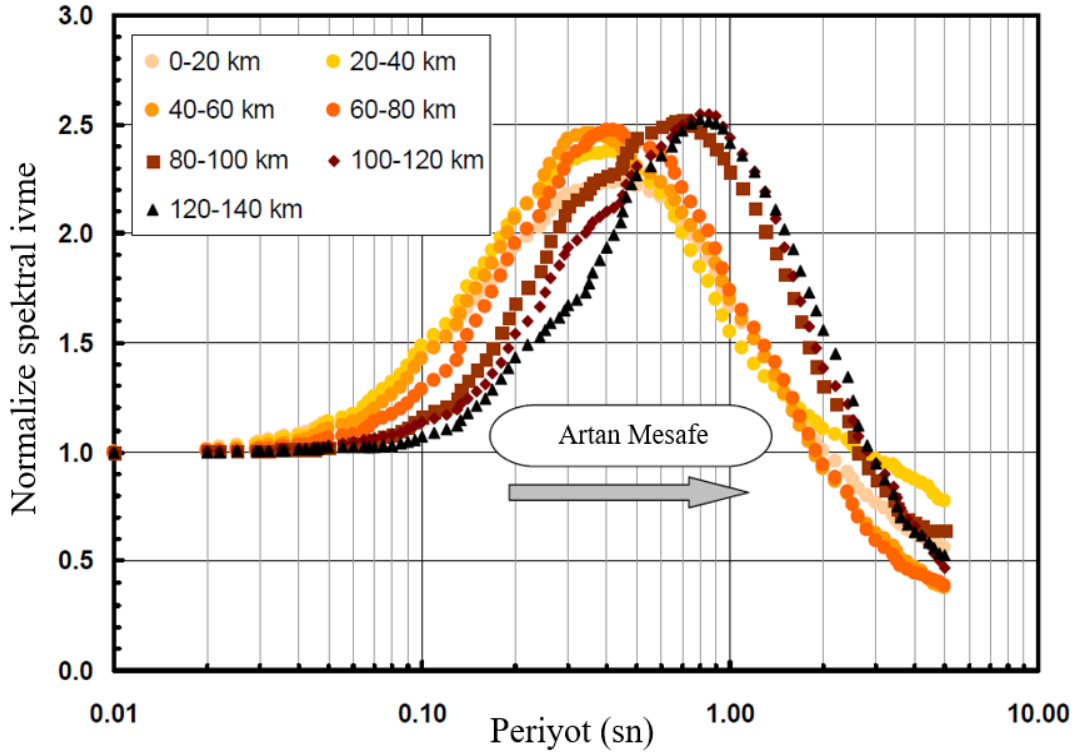
Deprem yer hareketlerinin seçiminde en önemli parametreler jeolojik ve sismolojik şartlar olan depremin büyüklüğü, faylanma tipi, çalışma alanının faya olan mesafesi, yırtılma yönü, yerel zemin koşulları ve kaydın spektral içeriğidir (Fahjan, 2008). Bu parametrelerden deprem büyüklüğü, faya olan mesafe ve yerel zemin koşullarının deprem kayıtlarına etkisi aşağıdaki paragraflar ile açıklanmıştır.

Genel olarak daha büyük depremlerden daha geniş tepki spektrumları elde edilmektedir. Aşağıda Şekil 3.6'da Graizer & Kalkan (2009) büyüklüğü 4.9 – 7.9 arasında değişen 10 adet deprem için  $p_{ga}$ 'e göre normalize edilmiş spektral ivme-periyot grafiğini oluşturmuşlardır. Bu grafikten anlaşılacağı üzere maksimum genlik değerine karşı gelen periyot değeri olarak tanımlanan hakim periyotun deprem büyüklüğüne paralel olarak arttığı görülmektedir. Spektral ivmenin pik yaptığı periyot değerleri küçük ve büyük depremler arasında yaklaşık 0.35 sn. mertebelerinde değişmektedir.

Faya olan mesafenin spektral ivme-periyot dağılımına etkisi Şekil 3.7 üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3.7'de 7.6 büyüklüğündeki Chi-Chi 1999 depreminden 0-140 km mesafede için 20 km aralıklarla elde edilen faya olan uzaklık normalize spektral ivme grafiği bulunmaktadır. Bu grafik incelendiğinde faya olan uzaklık arttıkça hakim periyot değerinin arttığı anlaşılmaktadır. 0 - 80 km arasında yaklaşık 0.4 sn mertebelerinde olan hakim periyot değeri 80-140 km arasında artarak 0.7-0.9 sn değerlerine çıkmaktadır.

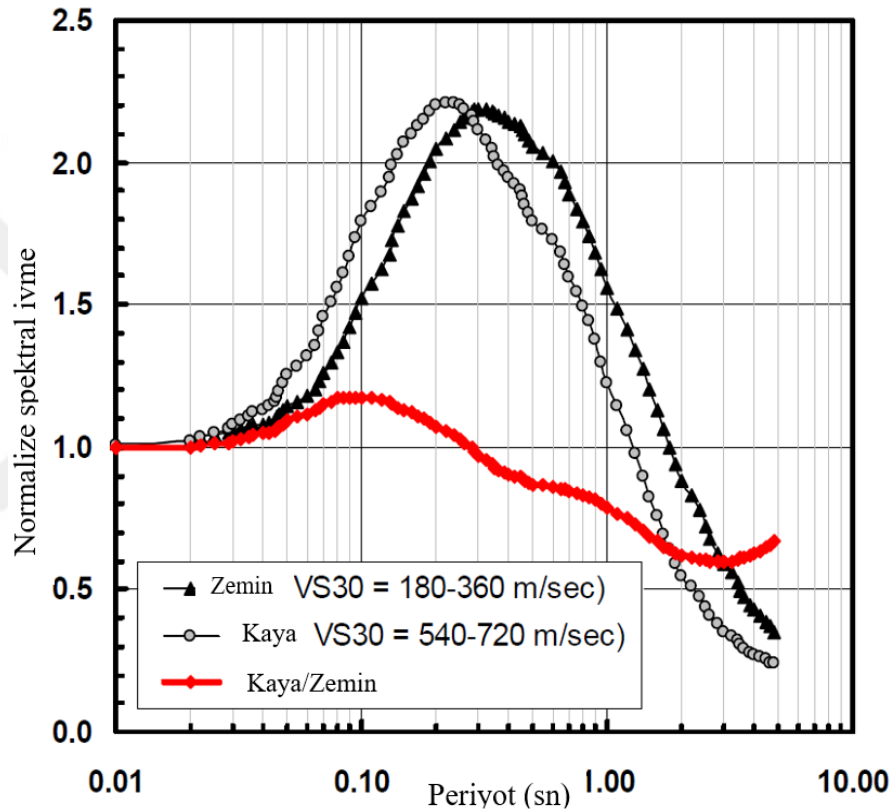


Şekil 3.6 : Deprem büyüklüğü hakim periyot ilişkisi (Graizer & Kalkan, 2009) .



Şekil 3.7 : Faya olan uzaklığın hakim periyot üzerine etkisi (Graizer & Kalkan, 2009) .

Faya olan uzaklık ve deprem büyüklüğü yanında yerel zemin koşulları da deprem kaydı üzerinde oldukça etkilidir. Genellikle kaya ortamlarda deprem hareketinin hakim periyodu zemin ortamlara göre daha düşüktür. Bu değişim aşağıda şekil 3.8 üzerinde gösterilmektedir. Yaklaşık olarak 0,3 sn periyot değerinin altında kaya ortamda daha büyük spektral ivme değeri elde edilmektedir. 0,3 sn periyot değerinin üstünde ise zemin ortamdaki spektral değerler kaya ortama göre daha yukarıda kalmaktadır. Hakim periyodun zemin ortamda daha fazla olmasına karşın pik spektral ivme değerleri her iki ortam için de hemen hemen aynı gözükmektedir.



**Şekil 3.8 :** Kaya ve zemin ortamların spektral ivme-periyot grafiği üzerine etkisi (Graizer & Kalkan, 2009).

Türkiye’de deprem yer hareketlerinin seçimi ve ölçeklenmesi hakkında bilgiler veren mevcut yönetmelik ve çalışmalar aşağıdaki gibidir :

- TBDY (2018)
- DBYBHY (2007)
- İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği (2008 Son Taslak)
- Kıyı ve liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği (2008)

- Yeni Kent Merkezinde (Bayraklı Salhane/Turan bölgesi-Alsancak Liman arkası kesimi ve Salhane bölgesi) yapılacak yüksek binalar için zemin geoteknik ve yapı/deprem mühendisliği proje ve raporlarında uyulması gereken teknik önermeler

İzmir bölgesinde yapılacak yüksek katlı binaların depremleri için gerekli teknik önermelerin verildiği çalışmada birkaç ilave bilgi ile birlikte genel olarak deprem hareketlerinin seçimi ve ölçeklenmesi açısından DLH'nin deprem teknik yönetmeliğine referans verilmiştir.

Bu yönetmeliklerde gerekli deprem kayıt takımlarının sayısı, kaynak mekanizması, moment büyüklüğü, zemin sınıfı ve fay uzaklığı açısından belirtilen özel hususlar ve deprem kaydından elde edilen tepki spektrumu ve ilgili bölge için yönetmeliklerde tanımlanan tasarım spektrumu arasındaki uyumu düzenleyen ölçekleme prosedür ve şartlarından bahsedilmektedir.

Moment büyüklüğü, zemin sınıfı vb. özellikler “ İYBDY 2008 ” ve “ Yeni Kent Merkezinde (İzmir Bayraklı Salhane/Turan bölgesi-Alsancak Liman arkası kesimi ve Salhane bölgesi) yapılacak yüksek binalar için teknik önermeler ” gibi şehir özelinde uyulması gereken şartları belirten çalışmalarda daha net olarak belirtilmiştir.

TBDY (2018) 'de deprem kaydının süresine ilişkin herhangi bir bilgi olmamasına karşın ölçekleme prosedüründe verilen kurallar ışığında en az  $1,5T_p$  süresi kadar uzun bir kayıt gerekli olmaktadır. DBYBHY (2007) ve İYBDY (2008) ve DLH deprem teknik yönetmeliğinde ise deprem kaydının süresine ilişkin daha net ifadeler yer almaktadır.

Deprem kaydının kuvvetli yer hareketi kısmının binanın birinci titreşim periyodunun 5 katından veya 15 sn den daha kısa olmaması DBYBHY (2007) ve ivme genliğinin  $\pm 0.05 g$ 'yi ilk ve son aşığı noktalar arasında kalan sürenin birinci titreşim periyodunun 5 katından veya 15 sn den daha kısa olmaması İYBDY (2008) ve DLH Deprem Teknik Yönetmeliğinde belirtilen ifadeler arasındadır.

Türkiye'deki mevcut yönetmeliklerin deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesine dair belirttiği şartlar aşağıda Çizelge 3.4 'te belirtilmiştir. Yeni deprem yönetmeliği ile birlikte analizler için gerekli olan deprem hareketi sayısının 11 'e çıkarıldığı görülmektedir.

**Çizelge 3.4 : Türkiye’de çeşitli yönetmeliklerde deprem hareketlerinin seçilmesi ve ölçeklenmesine dair kurallar.**

AÇIKLAMA	TBDY 2018	DBYBHY 2007	İYBDY 2008	Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği
Gerekli deprem hareketi takımı sayısı (Yatay doğrultuda birbirine dik iki yatay bileşen)	≥ 11	≥ 3 veya ≥ 7	≥ 7	≥ 3 veya ≥ 7
Deprem Kayıtları Seçimi	i)Gerçek Deprem Kayıtları ii)Benzeştirilmiş deprem kayıtları	i)Gerçek Deprem Kayıtları ii)Benzeştirilmiş deprem kayıtları iii)Yapay deprem Kayıtları	i)Gerçek Deprem Kayıtları ii)Benzeştirilmiş deprem kayıtları iii)Yapay deprem Kayıtları	i)Gerçek Deprem Kayıtları ii)Benzeştirilmiş deprem kayıtları iii)Yapay deprem Kayıtları
Kaynak Mekanizması	Tasarıma esas deprem düzeyi ile uyumlu, fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak seçim yapılacaktır ibaresi bulunmakta.	Kaydedilmiş depremler veya benzeştirilmiş yer hareketleri kullanılabilir. Bu tür yer hareketleri üretilirken yerel zemin koşulları da uygun biçimde gözönüne alınmalıdır ifadesi belirtilmiştir.	Yanal atımlı 7.0 < M <sub>w</sub> < 7.5 B veya C Bina-ana marmara fay hattı arasındaki en kısa uzaklık	Deprem kayıtları deprem büyüklüğü, fay mesafesi ve kaynak mekanizması bakımından göz önüne alınan en büyük depremi kontrol eden parametrelerle uyum içinde olmalıdır.
Moment Büyüklüğü				
Zemin Sınıfı				
Fay uzaklığı				
Diğer şartlar / Deprem Kayıtlarının Ölçeklenmesi	<b>Basit Ölçekleme :</b> -Bir veya iki boyutlu hesap için seçilen tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının 0.2T <sub>p</sub> ve 1.5T <sub>p</sub> periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. - Üç boyutlu hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilecektir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının 0.2T <sub>p</sub> ve 1.5T <sub>p</sub> periyotları arasındaki genliklerinin tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. Bu periyot aralığı yalıtımlı binalar için değişebilir. -Her iki yatay bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılacaktır.  <b>Spektral Uyuşum Sağlanacak Şekilde Ölçekleme :</b> 16.5.2'ye veya 16.10'a göre yapılacak zemin davranış analizlerinde veya zaman tanım alanında yapılacak diğer hesaplarda kullanılmak üzere deprem yer hareketleri, seçilen deprem kayıtlarının 2.3.4 veya 2.4.1'e göre tanımlanan tasarım spektrumuna spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmesi ile elde edilebilir. -Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu	-Deprem kaydının kuvvetli yer hareketi kısmının süresi, binanın birinci doğal titreşim periyodunun 5 katından ve 15 saniyeden daha kısa olmayacaktır. -Sıfır periyoda karşı gelen kullanılacak deprem yer hareketi spektral ivme değerlerinin ortalaması A <sub>og</sub> 'den daha küçük olmayacaktır. -Seçilen kayıt üzerinden %5 sönüm oranı için yeniden hesaplanan spektral ivme değerlerinin ortalaması, gözönüne alınan deprem doğrultusundaki birinci (hakim) periyod T <sub>1</sub> 'e göre 0.2T <sub>1</sub> ile 2T <sub>1</sub> arasındaki periyotlar için tanımlanan S <sub>ae</sub> (T) elastik spektral ivmelerinin %90'ndan daha az olmayacaktır.  Ölçekleme ile ilgili net bir ifade geçmemektedir.Ancak yukarıda verilen şartların sağlanması açısından deprem kaydının ölçeklenmesi kaçınılmazdır. -Üç yer hareketi kullanılması durumunda sonuçların maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise sonuçların ortalaması tasarım için esas alınacaktır.	-Her bir deprem kaydı ivme genliğinin ±0.05g 'yi ilk ve son olarak aştığı iki nokta arasında kalan süre, bina periyodunun 5 katından veya 15 sn den daha kısa olmayacaktır. -Her bir deprem yer hareketi için hesaplanan %5 sönüm oranı , 0 periyoduna karşı gelen spektral genliklerin ortalaması tasarım spektrumunun 0 saniye periyodundaki spektral genliğinden daha düşük olmayacaktır. -Her bir deprem yer hareketi takımının iki bileşenine ait %5 sönüm oranlı spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke spektrum elde edilecektir.  Bütün kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının 0.2T ve 1.2T (T = Binanın hakim doğal titreşim periyodu) periyotları arasındaki genliklerinin, tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerinin 1.3 katından daha az olmaması kuralına göre, deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilecektir. Her iki bileşenin ölçeklendirilmesi aynı oranlarda yapılacaktır.	-Yer hareketleri dizisi, %5 sönümlü davranış spektrumlarının 0.2T ile 1.5T arasındaki değerlerinin ortalaması yapı için tanımlanan tasarım spektrumundan daha düşük olmayacak şekilde ölçeklendirilecektir. (T) yapının incelenen doğrultudaki birinci doğal periyodudur) -Yapay (simüle edilmiş) ivme kaydı dizisi ağırlıklı kurallara uygun olmalıdır: (a) Her bir ivme kaydından hesaplanan 0 saniye periyodundaki spektral tepkilerin ortalaması referans ivmeden düşük olmamalıdır (b) Tüm ivme kayıtları kullanılarak hesaplanan %5 sönümlü elastik davranış spektrumlarının her bir periyoddaki ortalama değeri, hedeflenen %5 sönümlü elastik davranış spektrumunun o periyottaki değerinin %90'ndan daha düşük olmamalıdır. (c) Bir deprem kaydının genliğinin +- 0.05g'yi ilk ve son olarak aştığı iki nokta arasında kalan süre, yapının birinci doğal titreşim periyodunun 5 katından ve 15 saniyeden daha kısa olmamalıdır. -Üç yer hareketi kullanılması durumunda sonuçların maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise sonuçların ortalaması tasarım için esas alınacaktır.

### 3.1.2.2 Deprem yer hareketlerinin ölçeklenmesi

Seçilen deprem kayıtlarının yönetmeliklerde belirtilen tasarım spektrumlarına uygun hale getirilmesi için ölçekleme yapılır. Ölçekleme prosedürü TBDY (2018)'de basit ölçekleme ve spektral uyuşum sağlanacak şekilde ölçekleme olarak iki başlık altında açıklanmıştır.

#### Basit ölçekleme

Basit ölçekleme doğrusal olmayan serbest zemin davranış analizi ve yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri dışındaki hesaplarda kullanılacak deprem hareketlerinin ölçeklenmesinde kullanılabilir. Bu yaklaşım tüm kayıtlardan elde edilen tepki spektrumlarının ortalamasının bina periyodunun  $0.2T_p$  -  $1.5T_p$  katlarına denk gelen aralıkta tasarım spektrumunun genliklerinden küçük olmaması esasına dayanmaktadır. Bu amaçla deprem kayıtları hesaplanacak bir katsayı ile çarpılarak ölçeklenmelidir.

Yapı-kazık-zemin etkileşimi Yöntem-I kapsamında olduğu gibi 3 boyutlu hesaplarda kullanılacak deprem kayıtları için iki yatay bileşenlerinden elde edilen spektrumların kareleri toplamının karekökü üzerinden elde edilecek bileşke yatay spektrum değerinin tüm kayıtlar için ortalaması:

- $0.2T_p$  -  $1.5T_p$  aralında tasarım spektrumunda yer alan değerlerin 1.3 katı veya daha fazlası olacak şekilde deprem kayıtları ölçeklenecektir.

#### Spektral uyuşum sağlayacak şekilde ölçekleme

Türkiye bina deprem yönetmeliğine göre serbest zemin davranış analizi veya yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri kapsamında kullanılacak deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna “spektral uyuşum” sağlanacak şekilde dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu durumda :

- Dönüştürülen deprem kayıtlarının spektrum değerlerinin ortalaması tüm periyotlar için tasarım spektrumundaki genliklerden küçük olmayacaktır.

Deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna ölçeklenmesi frekans tanım alanında veya zaman tanım alanında yapılabilir. Bu konuda Fahjan (2008) ve Nikolaou (1998) tarafından önerilen prosedürler aşağıda açıklanmaktadır. Bunların dışında PEER NGA web sitesi üzerinden istenilen kriterleri sağlayan kayıtların seçilebilmesi ve hedef tasarım spektrumunun sisteme yüklenmesi ile seçilen kayıtların ölçeklenmesi de sağlanabilmektedir.



### Zaman tanım alanında ölçekleme

Zaman tanım alanında ölçekleme genel anlamda pik yer ivmesi( $p_g$ ) ile eşleşecek şekilde ve belirli bir periyot değeri, aralığı için yönetmelikte verilen şartları sağlayacak şekilde yapılır. Zaman tanım alanında yapılan ölçeklemede gerçek deprem kaydının doğal içeriği korunur, sadece ivme genlikleri artırılır veya azaltılır. Zaman tanım alanında yapılacak ölçekleme ile ilgili genel prosedür TBDY (2018) kuralları da göz önüne alınarak aşağıdaki gibi (Fahjan, 2008) , (Nikolaou, 1998) özetlenebilir :

- Deprem kaydı sabit bir katsayı ile çarpılarak yukarı veya aşağı yönde ölçeklenir.
- İstenilen periyot aralığında tasarım spektrumuna eşleştirme yapılır ( $0.2T_p - 1.5T_p$  aralında tasarım spektrumunda yer alan değerlerin 1.3 katı veya fazla olması veya  $0.2T_p - 1.5T_p$  katlarına denk gelen aralıkta tasarım spektrumunun genliklerinden küçük olmaması şartları sağlanacak şekilde).
- Deprem kaydının frekans içeriği aynı kalır sadece genlikler artırılmış olur.
- Her bir kayıt için veya birden fazla kayıt için ölçekleme yapılabilir.
- En küçük kareler tekniği kullanılarak ölçeklenen kayıt ve tasarım spektrumu arasındaki fark minimize edilir.
- Tasarım spektrumu ve ölçeklenen kayıttan elde edilen spektrum genliklerinin her bir periyot değeri için farklarının farklarının karesinin entegrasyonu aşağıdaki fark fonksiyonu ile tanımlanır (Fahjan, 2008), (Nikolaou, 1998) :

$$|\text{Fark}| = \int_{T_A}^{T_B} [\alpha S_{\alpha}^{\text{Gerçek}}(T) - S_{\alpha}^{\text{Hedef}}(T)]^2 dT \quad (3.32)$$

$S_{\alpha}^{\text{Hedef}}$  : Hedef ivme davranış spektrumu

$S_{\alpha}^{\text{Gerçek}}$  : Kullanılan deprem kaydının ivme spektrumu

$\alpha$  : Doğrusal ölçekleme katsayısı

T : Periyot

$T_A$  : Ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının alt sınırı

$T_B$  : Ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının üst sınırı

3.5 denkleminin  $\alpha$ 'ya göre türevi alınarak 0'a eşitlenir ( fark miktarının küçülmesi için bu türev değeri sıfır olmalıdır). 3.5 denklemi TA dan TB'ye kadar  $\Delta T$  artırımlarla devam eden toplam fonksiyonuna dönüştürülerek denklem 3.6 elde edilir.

$$\alpha = \frac{\sum_{T=T_A}^{T_B} (S_{\alpha}^{gerçek}(T)S_{\alpha}^{hedef}(T))}{\sum_{T=T_A}^{T_B} (S_{\alpha}^{gerçek}(T))^2} \quad (3.33)$$

Tek bir deprem kaydının ölçeklenmesi için Fahjan (2008) tarafından önerilen yöntem TBDY (2018) bağlamında aşağıdaki gibi uygulanabilir:

- i. Seçilen depremlerin her iki yatay bileşenleri için tek serbestlik dereceli %5 sönüme sahip bir sistem için tepki spektrumları hesaplanır
- ii. İlgili bölgenin yerel zemin sınıfı ve deprem düzeyine göre tasarım spektrumu belirlenir.
- iii. Kayıtların tasarım spektrumu ile yönetmelikte verilen şartları sağlayacak şekilde ölçeklenmesi için  $\alpha$  ölçekleme katsayısı hesaplanır.
  - (1D ve 2D analizler için)  $0.2T_p - 1.5T_p$  periyot aralı için, seçilen tüm kayıtların ivme spektrum değerlerinin ortalamasının tasarım spektrumunun genliklerinden büyük olması şartları sağlanacak şekilde
  - (3D analizler için) seçilen tüm kayıtlara ait bileşke yatay spektrumların (bir deprem kayıt takımının iki yatay bileşeni için hesaplanan spektrumların kareleri toplamının karekökü) ortalamasının  $0.2T_p - 1.5T_p$  aralığında tasarım spektrumunda yer alan değerlerin 1.3 katı veya fazla olacak şekilde
  - Belirtilen periyot aralığı ( $0.2T_p - 1.5T_p$ ) deprem yalıtımlı binalar için değiştirilebilir.
- iv. Ölçekleme katsayısı üst limiti olarak doğrusal elastik analizlerde 4, doğrusal elastik olmayan analizlerde 0,5-2 arası ölçekleme katsayısı önerilir. Sıvılaşıma için kayıt seçimi ve ölçeklemesi söz konusu ise 2'den büyük ölçekleme katsayısının kullanılmaması tavsiye edilir (Vanmarcke, 1979). Ancak TBDY (2018) kapsamında herhangi bir kısıtlamadan bahsedilmemiştir.
- v. Ölçekleme katsayısı  $\alpha$  değerlerinden yukarıdaki şartları sağlamayanlar elenir.

- vi. Ölçeklenen kayıtlardan yönetmelikte belirtilen genlik, süre vb. Şartları sağlamayan kayıtlar elenir.
- vii. Her deprem kaydı için ölçeklenmiş kayıt- hedef spektrum genlikleri arasındaki farklar  $T_A=0,01$  sn ve  $T_B=5$  sn periyot aralığında aşağıda tanımlanan toplam göreceli hata formülü ile hesaplanır ve daha sonra yüzde olarak bulunur

$$|\text{Toplam Göreceli Hata}| = \sum_{T_A}^{T_B} \left| \frac{\alpha S_{\alpha}^{\text{Gerçek}}(T) - S_{\alpha}^{\text{Hedef}}(T)}{S_{\alpha}^{\text{Hedef}}(T)} \right| \quad (3.34)$$

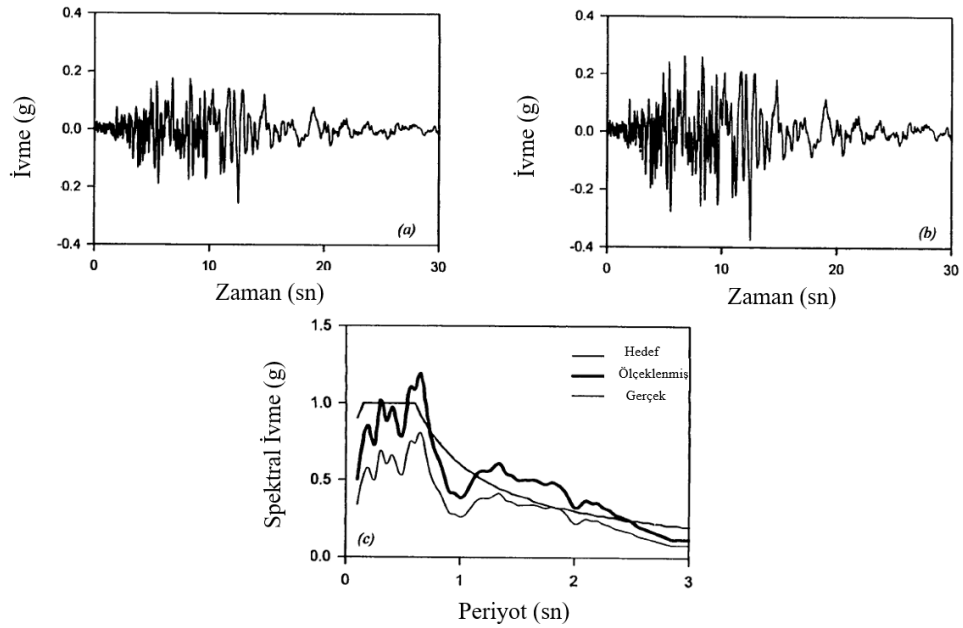
$$|\text{Oransal Göreceli Hata(\%)}| = \frac{1}{k} |\text{Toplam Göreceli Hata}| \times 100 \quad (3.35)$$

$$k = (T_B - T_A) / \Delta T \quad (3.36)$$

k : kaydın periyot adım sayısıdır

- viii. Kayıtlar içerisinde ölçekleme katsayıları ve oransal göreceli hataları en küçük olan kayıtlar alınır.

Yukarıda bahsedilen denklem ve prosedürler ışığında örnek bir ölçekleme aşağıda Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



**Şekil 3.9 :** Zaman tanım alanında ölçekleme : (a) San Fernando 1971 depremi kaydı, (b) 1,47 ölçekleme katsayısı ile ölçeklenmiş kayıt (c)NEHRP C -D zeminler için tasarım spektrumu ve ölçeklenmiş, orijinal kayıt spektrumları (Nikolaou, 1998).

Birden fazla kayıt üzerinden ölçekleme için de aşağıdaki prosedür önerilmektedir (Fahjan, 2008), (Nikolaou, 1998) :

- i. Bütün kayıtlar için tek bir ölçekleme katsayısı kullanılır .
- ii. Elde edilen ortalama spektrum hedef spektrum ile iyi eşleşir ancak tüm kayıtlar aynı katsayı ile artırılmış olur.
- iii. Tek bir kayıt için kullanılan yöntem ile seçilen kayıtlar için ölçekleme katsayıları tespit edilerek ölçekleme yapılır ve ölçeklenmiş kayıtların ortalaması bulunur.
- iv. N adet seçilmiş kaydın ortalama spektrumu tasarım spektrumuna eşleştirilmeye çalışılır. Bu amaçla fark fonksiyonunun N adet türevi alınarak N adet denklem elde edilir. Bu denklemlerin çözümünden N adet ölçekleme (optimum) katsayısı elde edilir .

#### **Frekans tanım alanında ölçekleme**

Zaman tanım alanında ölçeklemeye göre tasarım spektrumu ile daha iyi bir eşleşme sağlanmasına sağlayan bu yöntemde gerçek deprem kayıtları üzerinden yeni hareketler üretilir. Ancak frekans tanım alanında yapılan ölçekleme ile elde edilen kayıtlar yer değiştirmeye hassas bölgede eşit yerdeğiştirme kuralını sağlamaz dolayısıyla yapıların doğrusal olmayan davranışlarının analiz edildiği deprem hesaplarında kullanılması uygun değildir (Özdemir & Fahjan, 2007). Bunun dışında frekans tanım alanında yapılan ölçeklemede gerçek deprem kaydının frekans içeriği değiştirilir.

Özdemir ve Fahjan (2007) frekans tanım alanında ölçekleme için aşağıdaki prosedürü önermiştir :

- i. Deprem kaydı seçilir ve tasarım (hedef) spektrumu ile aynı sönüm oranında olacak şekilde tepki spektrumu elde edilir
- ii. Ölçekleme yapılacak periyot aralığında aşağıdaki formül ile spektrumlar arasındaki oran hesaplanır .

$$SPR(T) = \frac{S_{\alpha}^{Hedef}(T)}{S_{\alpha}^{Gerçek}(T)}, \quad T_A \leq T \leq T_B \quad (3.37)$$

$$FILT(\omega) = SPR(\omega), \quad \omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max} \quad (3.38)$$

Burada  $SPR(\omega)$  zamana bağlı oran fonksiyonu,  $\omega_{min}$  ve  $\omega_{max}$  ise maksimum ve minimum ölçekleme açısal frekanslarıdır.

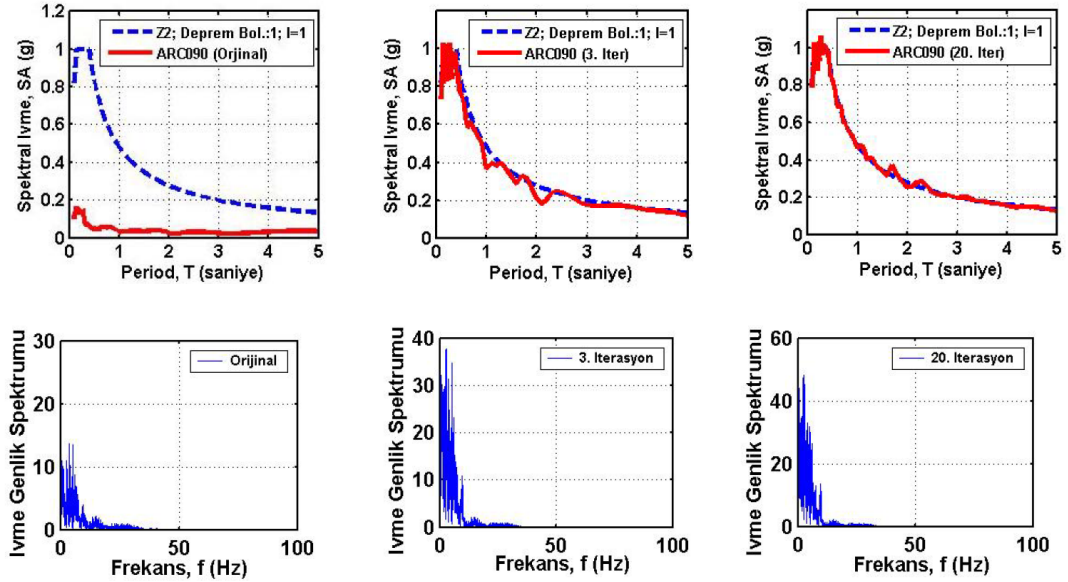
- iii. Gerçek deprem kaydının Fourier spektrum genliği  $F^{gercek}(\omega)$  ve Fourier spektrum fazı  $\theta^{gercek}(\omega)$  hesaplanır ve hesaplanan spektrum genliği  $FILT(\omega)$  fonksiyonu ile çarpılarak  $F^{filtrelenmis}(\omega)$  fonksiyonu elde edilir :

$$F^{filtrelenmis}(\omega) = FILT(\omega) \cdot F^{gercek}(\omega), \quad (3.39)$$

- iv. Filtrelenmiş Fourier spektrum genliği fonksiyonu  $F^{filtrelenmis}(\omega)$  ve orijinal kaydın  $\theta^{gercek}(\omega)$  değerinden ters Fourier algoritması ile yeni bir kayıt oluşturulur.

- v. Hedef spektrumla istenilen örtüşme sağlanıncaya kadar ii'den iv'e kadar olan adımlar tekrar edilir.

Bahsedilen prosedürler takip edilerek yapılan frekans tanım alanında ölçekleme işleminin sonuçları aşağıda Şekil 3.10 'da gösterilmiştir. Bu şekil üzerinden iterasyon sayısının artmasına paralel olarak ölçeklenen kaydın tasarım spektrumu ile iyi derecede örtüştüğü ancak aynı şekilde kaydın frekans içeriğinin de değiştirildiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 3.10 :** Kocaeli depremi (1999) ARC090 kaydının frekans tanım alanında Z2 yerel zemin koşulu ve 1. Derece deprem bölgesi için yapılan ölçeklemesi (Özdemir & Fahjan, 2007) .

### 3.1.3 Yerel zemin sınıfı, bina kullanım sınıfı, bina yükseklik sınıfı ve deprem tasarım sınıfı kavramları

Yeni Türkiye bina deprem yönetmeliği ile birlikte birçok yeni tanımlama ve gruplandırma kavramları da tanımlanmıştır. Örneğin eski deprem yönetmeliğinde (DBYBHY, 2007) 4 adet olan yerel zemin sınıfları yeni yönetmelikte 6 adet olarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde deprem tasarım sınıfı ve bina yükseklik sınıfları ise eski yönetmelikte olmayan yeni yönetmelikle birlikte kullanıma giren sınıflandırmalardır. Bu bölümde yapı-kazık-zemin etkileşim analizlerinde atıfta bulunulan bu sınıflandırmaların kapsamaları genel hatları ile anlatılmaktadır.

Yeni yönetmelikte yerel zemin sınıfları ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF olmak üzere altı gruba ayrılmıştır (Çizelge 3.5). Burada ZF grubu zeminler sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminleri kapsamaktadır ve aşağıdaki özelliklerden herhangi birine sahip zeminler bu gruba girmektedir (TBDY, 2018) :

- Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.)
- Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killler,
- Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ( $PI > 50$ ) killler,
- Çok kalın ( $> 35$  m) yumuşak veya orta katı killler.

**Çizelge 3.5 :** Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018, Bölüm 16) .

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	$> 1500$	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	$> 50$	$> 250$
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ( $c_u < 25$ kPa) içeren profiller	$< 180$	$< 15$	$< 70$
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler			

(VS)<sub>30</sub> , (N<sub>60</sub>)<sub>30</sub> (Cu)<sub>30</sub> terimleri sırasıyla üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı, ortalama standart penetrasyon değeri ve ortalama drenajsız kayma dayanımını ifade etmektedir.

Bu 30 m'lik tabaka kalınlığının hangi seviyeden itibaren başlatılacağı son derece önemli olmaktadır . Örneğin 3 bodrumlu bir bina göz önüne alınırsa temel alt kotu yaklaşık 10 m derinde yer alacaktır. Dolayısıyla zemin yüzeyinden itibaren 30 m'lik tabakaya ait parametreler hesaplandığında temel seviyesine kadar olan 10 m'lik kısım anlamsız yere hesaplara katılmış olacaktır. Yönetmelikte temel veya kazık başlığı alt kotundan itibaren aşağıya doğru 30 m'lik tabakanın göz önüne alınması gerektiği belirgin bir şekilde ifade edilmiştir.

Yerel zemin sınıfı yukarıda anlatıldığı gibi verilen zemin parametreleri, zemin profilinin temel veya kazık başlığı alt kotundan itibaren aşağıya doğru en üst 30 m kalınlığındaki kısmı için belirlenecektir.

Ayrıca yönetmelikte yüzeysel temelli yapılar için, temel alt kotu ile kaya ortama girilen kot arası mesafe 3 m'den fazla ise ZA ve ZB yerel zemin sınıfı tanımlamalarının yapılmayacağı belirtilmiştir.

DBYBHY (2007) 'de dört grup halinde belirtilen bina önem katsayıları TBDY (2018) kapsamında üç gruba düşürülmüş ve ayrıca bina kullanım sınıfı tanımlaması yapılmıştır (Çizelge 3.6). Bina kullanım sınıflarının tespiti ile bina önem katsayısına ulaşılmakta ve deprem tasarım sınıfı belirlenmektedir.

Bina yüksekliği ( $H_N$ ) bina tabanından itibaren ölçülen çatı döşemesine kadar olan yükseklik olarak tanımlanır. Çatı döşemesinin üzerinde yer alan asansör makine dairesi ve benzeri küçük kütleli uzantılar dikkate alınmayabilir.

Bina tabanı ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (TBDY, 2018) :

- (a) Rijit bodrum perdelerinin binayı her taraftan veya en az üç taraftan çevrelemesi durumu
- (b) Birbirine dik bina eksenlerinin her birinin doğrultusundaki hakim titreşim modunda, bodrum katlar dahil binanın tümü için hesaplanan doğal titreşim periyodunun, aynı taşıyıcı sistemde zemin kat döşemesi dahil tüm bodrum kütleleri hesaba katılmaksızın aynı doğrultuda hesaplanan doğal titreşim periyoduna oranının 1.1'den küçük olması.  $T_{p,tüm} \leq 1,1 T_{p,üst}$  olması durumu

(a) ve (b) açıklamalarında verilen koşulların her ikisini de sağlayan bodrumlu binalar'da bina tabanı, bodrum perdelerinin üst kotundaki kat döşemesi seviyesinde tanımlanacaktır. Belirtilen koşulları sağlamayan bodrumlu ,bodrumsuz binalarda ise bina tabanı temel üst kotunda tanımlanacaktır.

**Çizelge 3.6 :** Bina kullanım sınıfları ve bina önem katsayıları (TBDY, 2018, Bölüm 3) .

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. c) Müzeler d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	Diğer binalar BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

$H_N$  bina yükseklik sınıflarında verilen sayısal değerler 3,5 in katıdır. Dolayısıyla verilen yüksekliklerin 3,5'e bölümü ile yaklaşık kat sayısına ulaşılabilir.

Bina yükseklik sınıfı sadece bina yüksekliğine bağlı bir değer değildir aynı zamanda deprem tasarım sınıfına göre de belirlenmektedir (Çizelge 3.7). Örneğin deprem tehlikesi açısından farklı riskler taşıyan iki bölgede yükseklikleri aynı olan iki bina farklı BYS değerine sahip olabilmektedir.



BYS=1 olarak belirtilen binalar yönetmelikte yüksek binalar olarak tanımlanmaktadır. Yüksek binalar olarak tanımlanan yapıların yükseklik değerleri deprem riskine paralel olarak azalmaktadır. Daha az riskli bölgelerde daha yüksek binalar bu sınıfa dahil edilirken daha fazla deprem riski taşıyan bölgelerde ise görece yüksekliği daha az binalar bu şekilde tanımlanmaktadır.

**Çizelge 3.7 : Bina yükseklik sınıfları (TBDY, 2018, Bölüm 3) .**

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları (m)		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS = 2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS = 3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS = 4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS = 5	$17.5 < H_N \leq 28$	$28 < H_N \leq 42$	
BYS = 6	$10.5 < H_N \leq 17.5$	$17.5 < H_N \leq 28$	
BYS = 7	$7 < H_N \leq 10.5$	$10.5 < H_N \leq 17.5$	
BYS = 8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10.5$	

Deprem tasarım sınıfı (DTS) TBDY (2018) ile birlikte yeni tanımlanan bir kavramdır ve yönetmeliğin çizdiği tasarım yaklaşımının belirlenmesindeki en önemli parametreler arasındadır (Çizelge 3.8).

Deprem tasarım sınıfı (DTS), bina kullanım sınıfı(BKS) ve yapının inşa edileceği bölgenin DD-2 deprem düzeyi (standart tasarım depremi) için tanımlanan  $S_{DS}$  (kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı) değerine bağlı olarak Çizelge 3.8’de gösterildiği gibi belirlenmektedir. Çizelge 3.8’de görüleceği üzere 8 adet deprem tasarım sınıfı bulunmaktadır. DTS değerlerindeki a indisi ile “deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar,

değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar (Hastane, Okul, Müze vb.) ” kastedilmektedir.

**Çizelge 3.8** : Deprem tasarım sınıfları (TBDY, 2018, Bölüm 3).

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı ( $S_{DS}$ )	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 \leq S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

### 3.1.4 Sahaya özel serbest zemin davranış analizi

Türkiye bina deprem yönetmeliğinin 16.5 bölümünde anlatılan sahaya özel zemin davranış analizi zemin ortam içerisinde tabakalar arasında deprem hareketinin değişimini ve zemin yüzeyindeki veya istenilen bir noktadaki deprem hareketinin ulaştığı formu tespit etmek için yapılır.

Yönetmelik kapsamında “sahaya özel zemin davranış analizleri” :

- ZF zemin grubundaki ortamların yüzeyindeki deprem hareketini, sahaya özel deprem spektrumu belirlemek
- Yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri kapsamında Yöntem-II ve Yöntem-III ‘ün kinematik etkileşim analizlerinde deprem kaydı olarak kullanmak

amacıyla yapılacaktır.

Bu bağlamda sahaya özel serbest zemin analizlerinde uyulması gereken esaslar aşağıdaki gibi olmaktadır (TBDY, 2018) :

- i. Yapının bulunduğu bölgenin zemin ortamı yaklaşık olarak yatay ise tek boyutlu zemin modeli, zemin ortam yapılan sondajlar, arazi çalışmaları sonucunda yatay tabakalı olarak tanımlanamayacak ise iki veya 3 boyutlu zemin modelleri kullanılacaktır.
- ii. Serbest zemin modeli :
  - a. Taban kayası yerel zemin sınıfı ZA, ZB olan ( $V_s \geq 760$  m/s) zemin tabakası olarak tanımlanacak ve deprem hareketi zemin ortama taban kayasından etki ettirilecek, bu durumda tasarım spektrumunu oluşturan

spektral büyüklükler ZA, ZB zemin sınıfına göre ( $F_S$ ,  $F_1$  katsayıları) küçültülecektir.

- b. Taban kayası-bina temeli mesafe bina geniş 3 katından ( $3B$ ) ve en uzun kazık boyundan ( $L_{max}$ )daha uzun olacak
- c. Taban kayası belirtilen alt sınırdan çok daha derinde olması durumunda yerel zemin sınıfı ZC veya ZD olan zemin tabakası ile sonlandırılabilir ve deprem etkisi bu tabakalar üzerinden tanımlanabilir. Bu durumda tasarım spektrumunu oluşturan spektral büyüklükler ZC, ZD zemin sınıfına göre ( $F_S$ ,  $F_1$  katsayıları) küçültülecektir. Bu tabaka ve altındaki zemin ortam tek boyutlu zemin modelinde geçirgen sınır koşulları kullanılarak tanımlanacaktır.
- d. Analizin hassasiyeti bakımından zemin tabakaları ince alt tabakalara ayrılacaktır. Hashash ve diğ. (2016) Deepsoil yazılımının kullanım kılavuzunda zemin tabakalarının analiz sırasında nümerik hatalarla karşılaşmamak adına  $F_{max}$  değeri minimum 30 Hz. olacak şekilde ince tabakalara ayrılmaları gerektiğini belirtmiştir. Maksimum frekans değeri  $F_{max}$  tabakaların yayabileceği maksimum frekans değerini ifade etmektedir ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$F_{max} = V_s/4H \quad (3.40)$$

$V_s$  kayma dalgası hızını,  $H$  ise tabaka kalınlığını ifade etmektedir. Ayrıca zemin profili boyunca şart olmamakla birlikte  $F_{max}$  değerinin aynı seçilmesi tavsiye edilir.

- iii. Yatay tabakalı zemin modeli çerçevesinde zeminler için doğrusal olmayan dinamik parametreler (birim kayma deformasyonu ve sönüm oranı), dinamik kayma modülü değişim grafikleri arazi ve laboratuvar deneylerine ve literatürde benzer zemin koşulları için yapılan çalışmalara istinaden tanımlanacaktır.
- iv. Oluşturulan tek boyutlu, yatay tabakalı serbest zemin modelinin tabanından tanımlanmak üzere en az 11 deprem kaydı seçilecek ve yönetmelikte belirtilen tasarım spektrumu ile spektral uyum sağlayacak şekilde ölçekleneceklerdir.

- v. Yatay tabakalı zemin modeli çerçevesinde taban kayasında tanımlanan deprem hareketi altında doğrusal olmayan dinamik zemin parametrelerine göre
- Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz
  - Kayma birim deformasyonunun %1'i aşmaması koşulu ile, frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal yaklaşımla doğrusal olmayan analiz (sıvılaşma potansiyeli olan zeminler hariç)

Yöntemlerinden birine göre analiz yapılacaktır.

- vi. Sahaya özel deprem spektrumunun tespit edilmesi çalışmalarında ise aşağıdaki prosedür ve kurallar uygulanacaktır (TBDY, 2018).
- Her kayıt için zemin yüzeyindeki spektral ivme değerlerinin (her bir periyot değeri için) taban kayasında tanımlanan hareketin spektral ivme değerlerine oranı hesaplanacak ve daha sonra en az 11 kayıt için bu oranların ortalaması alınarak yerel zemin etki katsayısı hesaplanacaktır.

$$F(i) = \frac{S_{ae}(Ti)_{N(1)} + S_{ae}(Ti)_{N(2)} + \dots + S_{ae}(Ti)_{N(N)}}{S_{ae}(Ti)_K \cdot N} \quad (3.42)$$

$$\text{Yerel zemin etki katsayısı} = \sum_i^N F(i) / N$$

$S_{ae}(Ti)_{N(1)}$  :1. Kayıt için i periyodundaki spektral ivme

$N$ : Toplam kayıt sayısı

$S_{ae}(Ti)_K$  :Taban kayasında tanımlanan hareketin i periyodundaki spektral ivme değeri

$F(i)$  : i periyodu için N adet kayıt / taban kayasındaki spektral ivme oranının ortalaması

- Hesaplanan yerel zemin etki katsayısı yönetmelikte tanımlanan taban kayası spektrumu ile çarpılarak sahaya özel deprem spektrumu (zemin yüzeyindeki) belirlenecektir.
- Yerel zemin sınıfının ZF olduğu bölgelerde sahaya özel tasarım spektrumu yukarıda belirtildiği şekilde oluşturulacaktır. ZF dışındaki yerel zemin koşullarında ise zemin yüzeyinde belirlenecek olan sahaya özel spektrumun ordinatları yerel zemin sınıfına göre yönetmelik takip

edilerek oluşturulan spektrumun ordinatlarından daha küçük alınmayacaktır.

### 3.2 Yapı-Zemin-Kazık Etkileşim Analiz Yöntemlerinin Kapsamı

Deprem yönetmeliğinde yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri deprem tasarım sınıfı, bina yükseklik sınıfı ve yerel zemin sınıfı göz önüne alınarak üç yöntem ile tarif edilmektedir. Bu yöntemler ve kapsamaları aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 3.9).

**Çizelge 3.9** : Analiz yöntemleri ve kapsamaları (TBDY, 2018, Bölüm 16.10).

Analiz Yöntemi	Deprem Tasarım Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfı	Yerel Zemin Sınıfı
Yöntem I	DTS = 1, 1a, 2, 2a	BYS = 1	ZD, ZE, ZF
Yöntem II	DTS = 1a, 2a	BYS = 2, 3	ZD, ZE, ZF
	DTS = 3, 3a, 4, 4a	BYS = 1	
Yöntem III	DTS = 1a, 2a	BYS ≥ 4	ZD, ZE, ZF
	DTS = 1, 2, 3, 3a	BYS ≥ 2	

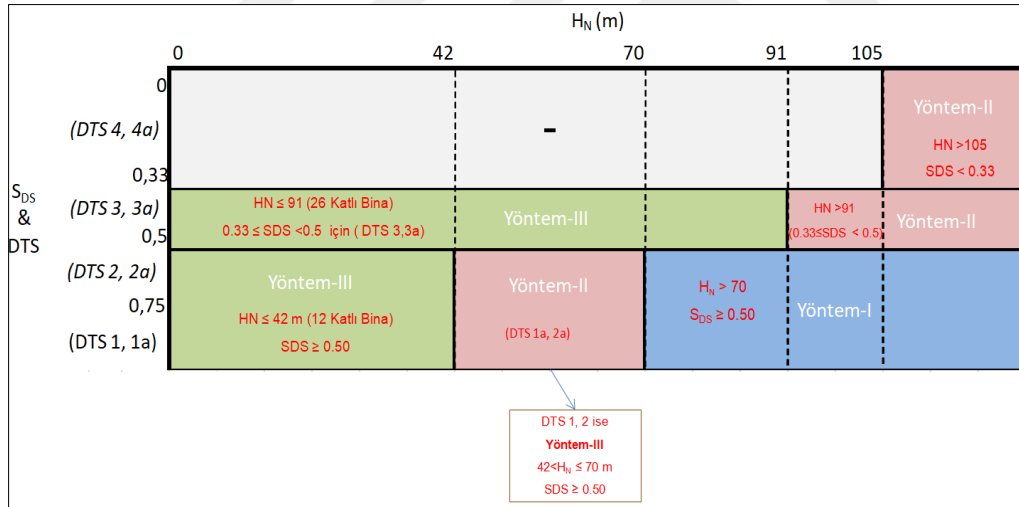
Yukarıdaki çizelge incelendiğinde her üç yöntem için de yerel zemin sınıfı kapsamının ZD, ZE ve ZF olduğu görülmektedir. Bu bağlamda yerel zemin sınıfının ZC, ZB ve ZA olması durumlarında dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi yönetmeliğe göre zorunlu değildir.

Sırasıyla sağlam, sert kayalar ve az ayrılmış, orta sağlam kayaları temsil eden ZA ve ZB zemin sınıflarında kazıklı temel ihtiyacının ortaya çıkmayacağı kuvvetle muhtemeldir. Ancak çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakalarını temsil eden ZC grubu için bina ağırlığına bağlı olarak kazıklı temel ihtiyacı doğabilir ve söz konusu yapı önemli bir deprem bölgesinde veya mevcut bir faya yakın mesafede olabilir.

Bu durumda yönetmelik kapsamında etkileşim analizleri gerekli olmasa bile gerek zemin araştırmalarının güvenilirliği gerek yapının önemi ve bulunduğu bölgenin potansiyel riskleri göz önüne alınarak özellikle kazıkların tasarımı açısından önemli veriler ortaya koyan etkileşim analizleri göz önüne alınmalıdır.

Yönetmelikte belirtilen analiz yöntemleri deprem tasarım sınıfı (DTS) ve bina yükseklik sınıfı (BYS) değerlerine göre belirtildiğinde yöntemler için aşağıdaki kapsamlar ortaya çıkmaktadır:

- **Yöntem –I :**
  - $H_N > 70$  m (>20 Katlı Bina)  $S_{DS} \geq 0.50$  olduğunda
- **Yöntem- II :**
  - (i) :  $42 < H_N \leq 70$  m (12~20 Katlı Bina)  $S_{DS} \geq 0.50$  (DTS 1a,2a: Hastane, Okul vs.)
  - (ii) :  $H_N > 91$  (>26 Katlı Bina),  $(0.33 \leq S_{DS} < 0.5)$ ,  $H_N > 105$  (>30 Katlı Bina),  $S_{DS} < 0.33$
- **Yöntem- III:**
  - (i) :  $H_N \leq 42$  m (12 Katlı Bina),  $S_{DS} \geq 0.50$  ( DTS 1a,2a: Hastane,Okul vs.)
  - (ii) :  $H_N \leq 91$  ( $\leq 26$  Katlı Bina),  $0.33 \leq SDS < 0.5$  için ( DTS 3,3a),  $H_N \leq 70$  ( $\leq 20$  Katlı Bina),  $S_{DS} \geq 0.50$  için ( DTS 1,2: Konut, işyeri otel vb.)



**Şekil 3.11 : Yöntem kapsamlarının gösterimi .**

Şekil 3.11 incelendiğinde  $S_{DS}$  0,33 değerinin kritik bir eşik olduğu anlaşılmaktadır. Yönetmelik 0,33  $S_{DS}$  değerinin altında 105 m yüksekliğe kadar olan kazıklı binalarda etkileşim analizini gerekli görmemiştir. Yönetmeliğin 13. bölümünde DTS 4, 4a için 105 m'nin üstündeki binalar yüksek binalar kapsamına alınmıştır. Dolayısıyla bu deprem tasarım sınıfında 105 m'nin altındaki binalar yüksek bina olarak tanımlanmamakta ve herhangi bir yöntem önerilmemektedir.

$S_{DS}$  değerinin 0,33 değerine eşit veya daha büyük olduğu durumlarda ise bina yüksekliğinden bağımsız olarak etkileşim analizleri gerekli olmaktadır.

Yönetmelikte yzeyssel temelli ve bodrumlu binalar açısından zemin-yapı etkileşiminin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Bu husus yzeyssel temelli yapılarda yapı-zemin etkileşim analizinin üstyapıya olumlu etkisi ve yzeyssel temelin varlığının depremin frekans ve genlik içeriği üzerinde serbest zemine göre önemli bir etkisi olmayacağı göz önüne alındığında güvenli tarafta kalmak adına tercih edilebilir görünmektedir. Ancak gömülü yzeyssel temel durumunda yani bodrum katlı bir yapı olması durumunda 1 boyutlu serbest zemin büyütme analizinden elde edilen tasarım ivme spektrumu geçerli değildir. (Aydınoğlu, 2011). Dolayısıyla bodrumlu binalar için yönetmelikte etkileşim analizinin ihmal edilebileceği belirtilse de birkaç analiz ile yapıya olan olumlu etkinin tespit edilmesi ve daha sonra göz ardı edilmesi bir yöntem olarak tercih edilmelidir. Aksi taktirde genel olarak literatürde (nalp & Sert, 2016)  $D_f \leq B$  ve (Budhu, 2011)  $D_f/B \leq 2.5$  olarak tanımlanan yzeyssel temellerin 10 m'den daha derin gömme derinliklerinde bile etkileşim analizlerinin göz önüne alınmaması gibi bir sonuç ortaya çıkacaktır.

### **3.3 Yöntem I İle Etkileşim Hesabı**

Yöntem-I DTS = 1, 1a, 2, 2a ve BYS = 1 sınıfına giren yapılarda gerekli olmaktadır. DTS ve BYS sınıfları değerlendirildiğinde Yöntem-I'in  $H_N > 70m$  ve  $S_{DS} \geq 0.5$  olan yapıları kapsadığı görülmektedir. Yöntem-I etkileşim analizi DD-1 deprem düzeyinde, zaman tanım alanında hem yapısal elemanların hem de zeminin doğrusal olmayan davranışlarını hesaplayabilecek yöntemle yapılacaktır.

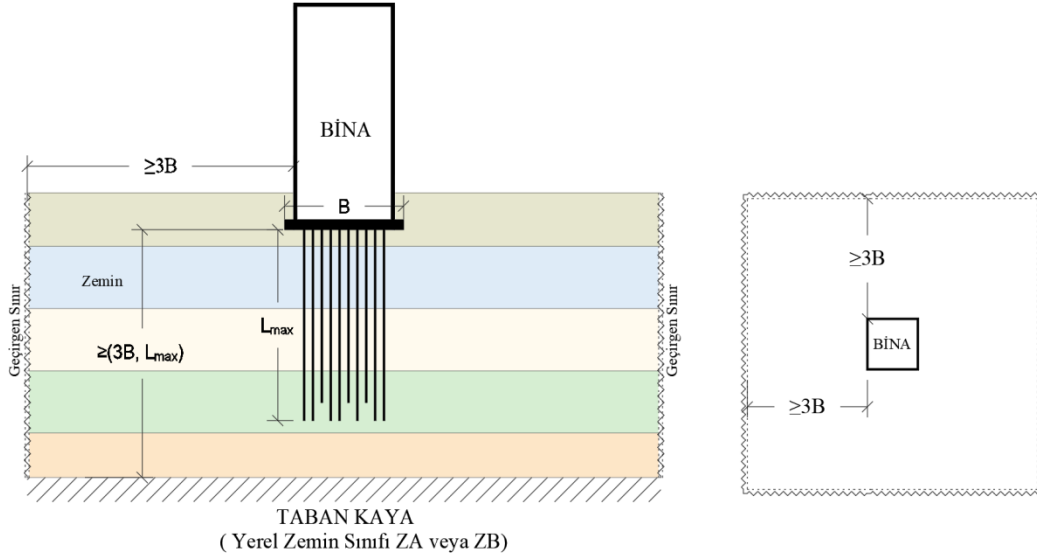
Yöntem-I ortak sistem ve altsistem yaklaşımları ile çözülebilecektir. Alt sistem yaklaşımı söz konusu yöntem açısından daha uygulanabilirdir.

Üstyapı-temel-kazık-zemin sisteminin  $11 \times 2 = 22$  deprem kaydının her birinde her t anı için doğrusal olmayan davranışının hesabı pratikte çok güçlü bilgisayarlar ve doğruluğu alternatif programlarla kontrol edilmiş yazılımlar gerektirmektedir. Genel uygulama altsistem yaklaşımının kullanılması yönündedir. Bu sayede üstyapı tasarımı ve temel-kazık-zemin sistemi modellenme aşamaları farklı mühendislik disiplinlerince yapılabilir.

### 3.3.1 Yöntem I kinematik etkileşim hesabı

Yöntem-I Kinematik etkileşim modelinde temel-kazık-zemin ortam 3 boyutlu, ayırık yöntemler ile modellenerek analiz edilir (Şekil 3.12). Model ile ilgili esaslar aşağıda belirtildiği gibidir :

- Bina temeli-taban kaya mesafesi bina genişliğinin 3 katından ve en uzun kazık boyundan daha uzun olacaktır  $\geq (3B, L_{max})$
- Geçirgen model sınırları kullanılarak zemin ortam içerisinde yayılan deprem dalgalarının model sınırından geri yansımaları önlenecektir. Geçirgen sınır-temel sınırı arası mesafe minimum  $3B$  genişliğinde olacak



Şekil 3.12 : Yöntem-I'de model gereksinimleri.

Kazıkların Modellenmesine ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir (TBDY, 2018).

- TBDY 5.3.1'de tanımlandığı şekilde (yığılı plastik davranış modeli) plastik mafsalların uygun aralıklarla yerleştirildiği çubuk elemanlar olarak doğrusal olmayan davranış modeli kurulacaktır.
- Kazık-zemin etkileşimi için ara yüz elemanları tanımlanacaktır.
- Deprem hesabından önce, düşey yüklerden kazıklarda oluşan aksel kuvvetler doğrusal olmayan statik kuvvetle belirlenecektir

Bina Temeli ise :

- Bodrum kat çevre perdeleri ile birlikte (zemin kat seviyesine kadar) kütleli sonsuz rijit olarak modellenecektir.



Deprem kayıtları :

- En az 11 çift deprem kaydı TBDY 2.5.1' e göre seçilecek ve 2.5.3'e göre gerekmesi durumunda ölçeklendirilerek tasarım spektrumuna uyumlu hale getirilecektir.

Yukarıda belirtilen esaslar dahilinde kurulan 3 boyutlu temel-kazık-zemin modelinde depremler kayıtları 2x11 analiz şeklinde (deprem kayıtlarının iki yatay bileşeninden 1 tanesi X yönünde diğeri Y yönünde etki ettirilecek , daha sonra X ve Y yönünde etki ettirilen bileşenler yer değiştirerek tekrar sisteme etki ettirilecek) taban kayasından sisteme etki ettirilecek ve kazıklar ve zeminin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak analiz edilecektir.

Kinematik etkileşim analizi sonucunda elde edilecek çıktılar aşağıdaki gibidir :

- Kazıklarda oluşan iç kuvvet ve şekil değiştirmeler 2x11 analizin her biri için elde edilecek ve bu değerlerin en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak iç kuvvet ve şekil değiştirme talepleri tespit edilecektir.
- 2x11 analiz için rijit temel tabanında x-y eksenleri doğrultusunda ötelenme ve bu eksenler etrafında dönme hareketlerinin (etkin temel hareketleri) zamana göre değişimleri (temel seviyesi deprem kayıtları) elde edilecek ve bu veriler eylemsizlik etkileşimi hesabında kullanılacaktır.
- Kinematik etkileşimde üstyapı göz önüne alınmadığı ve temel kütleli sonsuz rijit olarak modellendiğinden üst yapıda herhangi bir iç kuvvet meydana gelmeyecektir.

### **3.3.2 Yöntem I eylemsizlik etkileşimi hesabı**

Eylemsizlik etkileşimi hesapları üstyapı-temel altsisteminin, kinematik etkileşim sonucu elde edilen temel tabanındaki etkin temel hareketlerine göre yapılan analizidir. Bu bağlamda eylemsizlik etkileşimi analizi yapısal tasarım mühendisi tarafından yapılacaktır. Üstyapı ve temelin modellendiği yapısal tasarım yazılımında temel seviyesinde elde edilen 11x2 deprem kayıtlarına göre analiz gerçekleştirilecektir.

Eylemsizlik etkileşimi hesap esasları TBDY (2018)'e göre aşağıdaki şekilde olacaktır:

- Öncelikle temel-kazık-zemin sistemini temsil eden etkileşim yaylarına ait doğrusal olmayan davranışlarının iskelet eğrileri elde edilecektir. Bu amaçla

statik kuvvetler kinematik etkileşim çıktılarının tanımlanacağı dönme ve ötelenme serbestlik derecelerine ayrı ayrı artımsal olarak etki ettirilerek her bir serbestlik derecesi için doğrusal olmayan hesap yapılacaktır.

- Üstyapı taşıyıcı sistemi, bina temeli ve varsa bodrum katlar kütleleri de göz önüne alınarak modellenecektir. Taşıyıcı sistem modelleme detayları TBDY Bölüm 13.6.2 de belirtilmiştir.
- Tanımlanan etkileşim yayları bina temel tabanına yerleştirilerek histeretik davranış modeli uyarlanacaktır.
- Oluşturulan üstyapı-temel sistemi kinematik etkileşimden elde edilen ivme kayıtlarına göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap ile analiz edilecektir.

Eylemsizlik etkileşimi analizi sonucunda :

- Üstyapıda ve temelde kuvvet, yerdeğiştirme ve şekil değiştirmelerin zamana göre değişimleri
- Temel tabanında tanımlanan etkileşim yaylarında da oluşan yerdeğiştirme ve kuvvetlerin zamana bağlı değişimleri elde edilir. Bu sonuçlardan ve artımsal statik hesap sonuçlarından yararlanılarak, eylemsizlik etkileşiminde kazıklarda oluşan iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler hesaplanır.

Kazıklarda tasarıma esas iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler kinematik etkileşimden elde edilenlerle mutlak değerlerinin toplamı olarak birleştirilerek hesaplanacaktır (TBDY, 2018,Bölüm 16C.5).

Ayrıca yönetmelikte eylemsizlik etkileşim sonuçları açısından önemli bir vurgu yapılmaktadır. Etkileşim analizi sonucunda üstyapı taşıyıcı sisteminde analizin dikkate alınmadığı duruma göre daha elverişli sonuçlar elde edilirse, etkileşim analizinin sonuçları üstyapı taşıyıcı sisteminin tasarımı açısından göz ardı edilecektir.

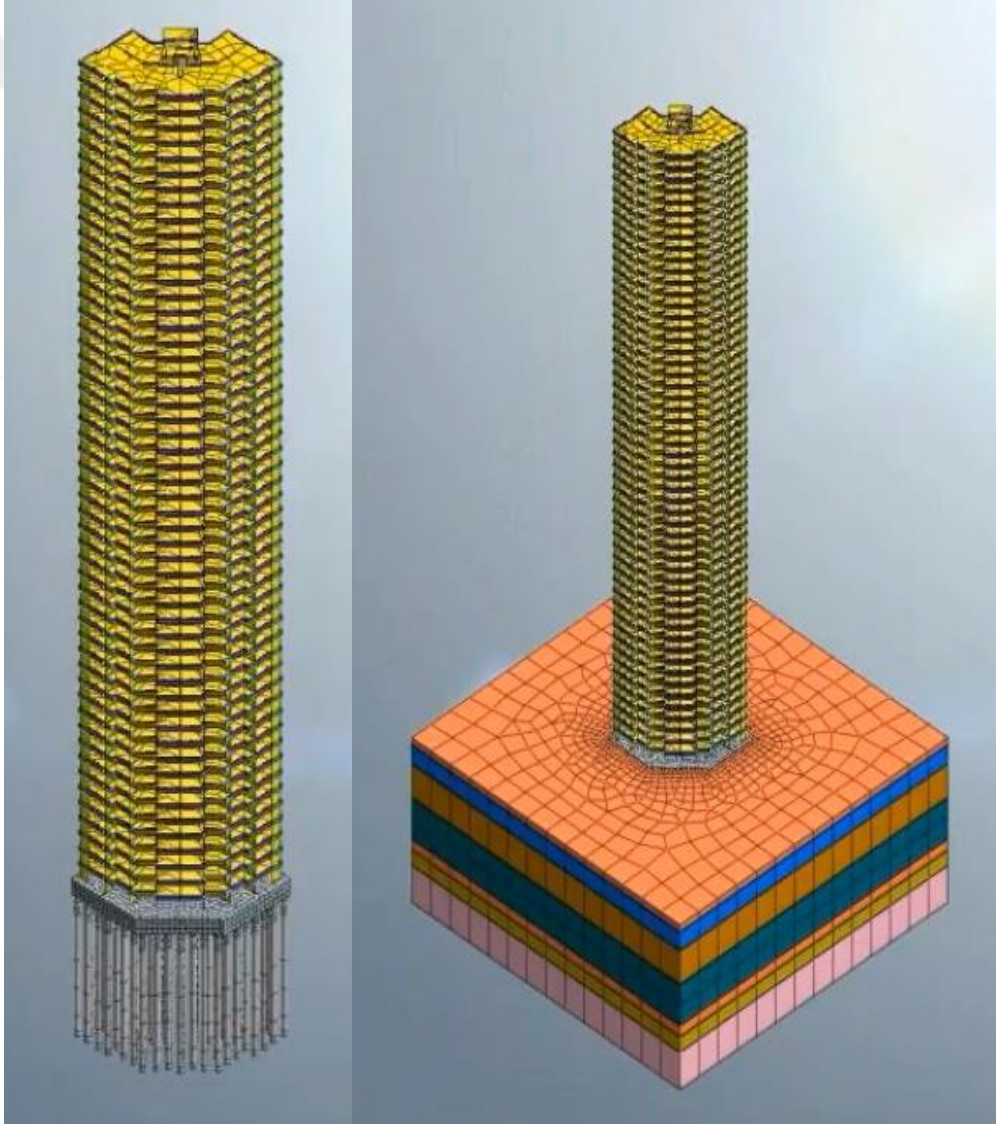
### **3.3.3 Ortak sistem yaklaşımı**

Ortak sistem yaklaşımı üstyapı, temel, zemin ve kazık sisteminin bir arada modellendiği ve doğrusal olmayan davranış esasına göre zaman tanım alanında taban kayasından etki ettirilen depremin kayıtları için bir arada çözüldüğü duruma denk gelmektedir. Yönetmelikte yazılım ve donanım olanaklarına bağlı olarak ortak sistem

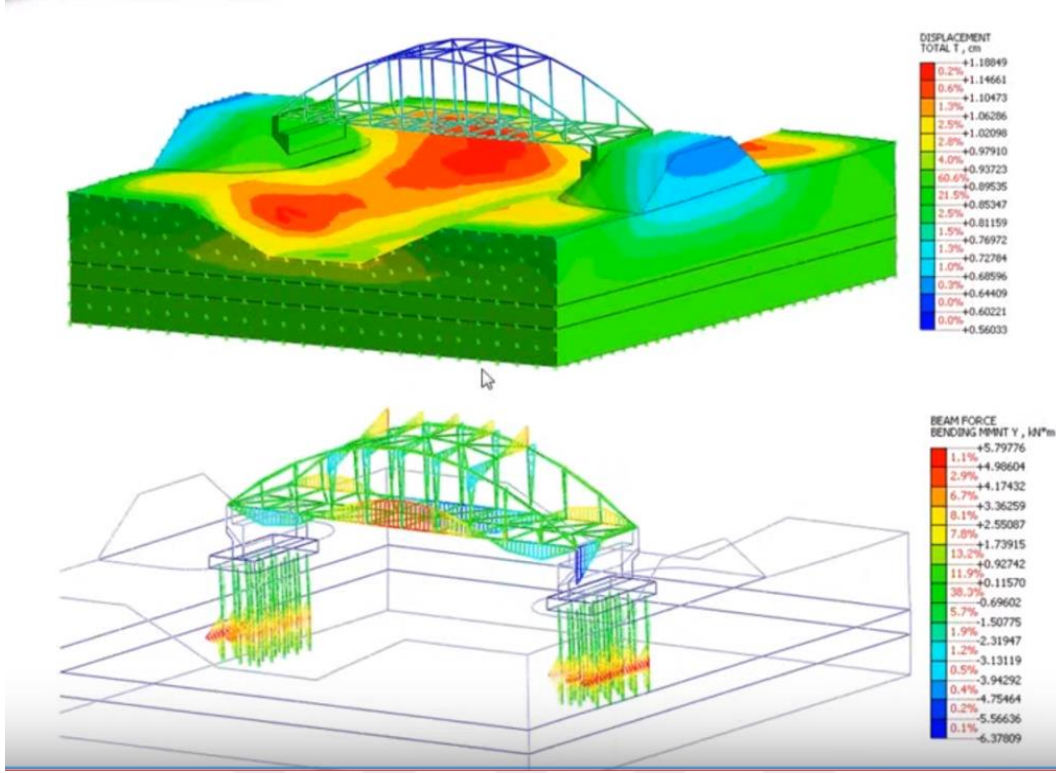
yaklaşımının tercih edilebileceği belirtilmiş ancak herhangi bir açıklama ile bu tarz analizlere dair özel durumlar belirtilmemiş sadece altsistem yaklaşımında belirtilen esasların geçerli olacağına değinilmiştir.

Günümüzde ortak sistem yaklaşımı ile üstyapı-zemin sisteminin çözülebildiği programlar mevcuttur. Ancak bu programların yönetmelik özelinde hem üstyapı hem zemin açısından belirtilen özel şartları sağlayıp sağlayamadığı kontrol edilmelidir.

Aşağıda Şekil 3.13 ve 3.14’de sırasıyla yüksek katlı bir yapı ve bir köprü modelinin üç boyutlu analiz ortamında ortak sistem yaklaşımı ile çözümüne dair görseller bulunmaktadır. Söz konusu şekillerden görüleceği üzere üstyapı ve temel-kazık-zemin sistemi aynı ortamda modellenmiştir.

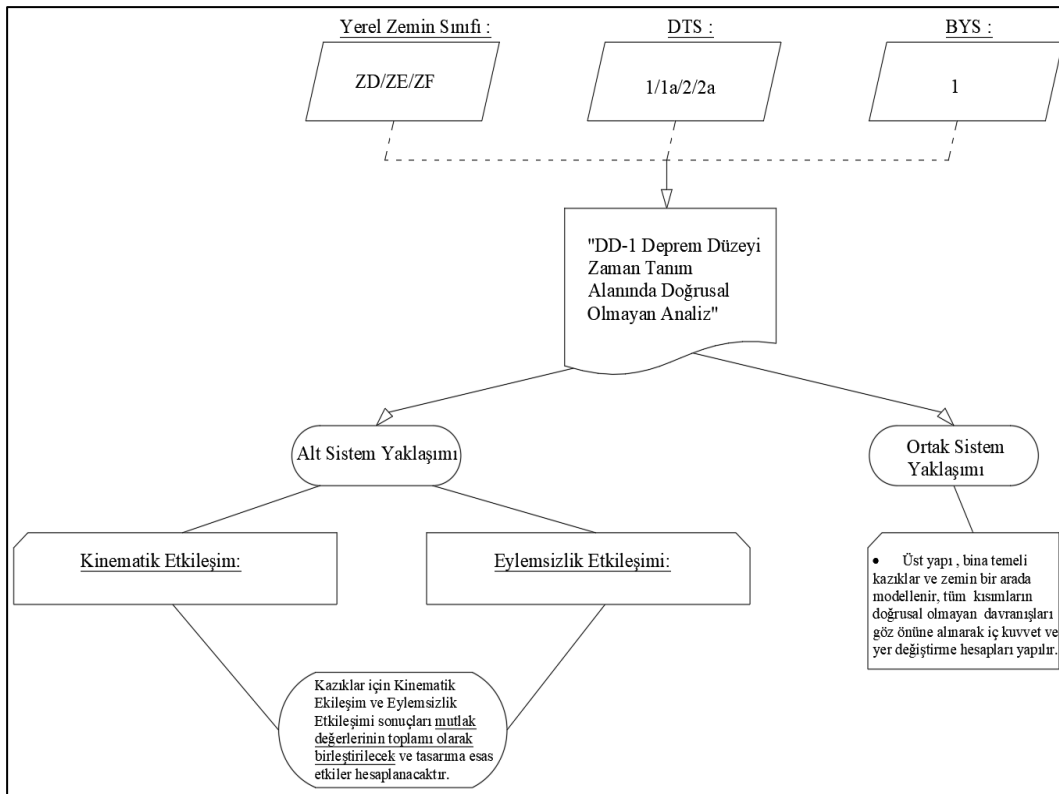


**Şekil 3.13** : Yöntem-I’de ortak sistem yaklaşımı (Midas GTS NX, 2015).



Şekil 3.14 : Yöntem-I' de ortak sistem yaklaşımı-Köprü (Midas GTS NX, 2015).

Yöntem-I'e ait kapsam ve hesap adımları genel anlamıyla aşağıda gösterildiği gibidir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Yöntem-I kapsam ve hesap adımları .

### 3.4 Yöntem II İle Etkileşim Hesabı

Yöntem-II yerel zemin sınıfının ZD, ZE ve ZF olduğu durumlarda  $S_{DS}$  ve  $H_N$  değerlerinin aşağıda belirtilen aralıklarda olduğu durumlarda yapılacak olan zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan etkileşim analizlerinde kullanılacaktır.

- (i) :  $42 < H_N \leq 70$  m (12~20 Katlı Bina)  $S_{DS} \geq 0.50$  (DTS 1a,2a: Hastane, Okul vs.)
- (ii) :  $H_N > 91$  (>26 Katlı Bina),  $(0.33 \leq S_{DS} < 0.5)$ ,  $H_N > 105$  (>30 Katlı Bina),  $S_{DS} < 0.33$

Yöntem-II kapsamında yapı-kazık-zemin etkileşim hesapları DD-1 deprem yer hareketi düzeyi etkisi altında yapılacaktır.

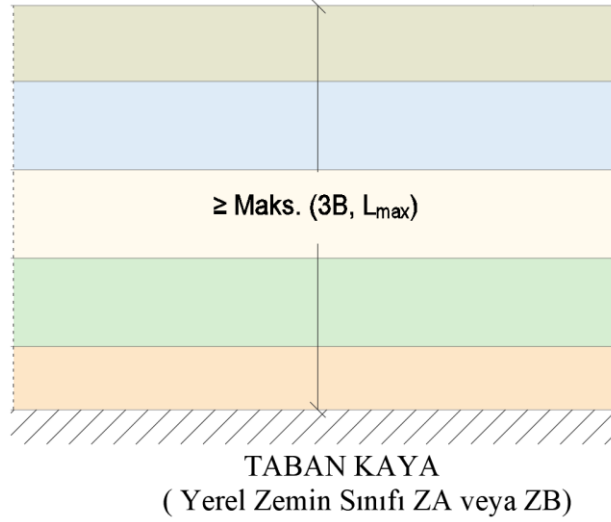
#### 3.4.1 Yöntem II kinematik etkileşim hesabı

Yöntem-II kinematik etkileşim hesabında temel-kazık-zemin ortamı bir arada modellenmez. Zemin ortamında TBDY bölüm 16.5.2 de anlatıldığı gibi tek boyutlu, yatay tabakalı serbest zemin davranış analizi yapılır bu analizden istenilen derinliklerde tespit edilen deprem hareketi bileşenleri kazık ve kütlesiz rijit temelin modellendiği başka bir analiz çerçevesinde değerlendirilerek temel seviyesi ivme kayıtları ve kazıklarda oluşan iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerleri hesaplanır.

TBDY (2018) 'de Yöntem-II kapsamında yapılacak kinematik etkileşim hesaplarına ilişkin esaslar aşağıda belirtildiği gibidir :

Model ile ilgili esaslar :

- Zemin ortam için herhangi bir modelleme yapılmaz (Temel-Kazık-Zemin modeli oluşturulmaz) .
- Sahaya özel serbest zemin davranış analizi yapılır (TBDY Bölüm 16.5.2).
- DD-1 deprem seviyesine göre analiz yapılır.
- Bina temeli-taban kaya mesafesi bina genişliğinin 3 katından ve en uzun kazık boyundan daha uzun olacaktır  $\geq (3B, L_{max})$  (Şekil 3.16)
- En az 11 çift deprem kaydı kullanılır.



**Şekil 3.16 :** Yöntem-II’de model gereksinimleri.

Kazıkların Modellenmesine ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir (TBDY, 2018) :

- TBDY 5.3.1’de tanımlandığı şekilde (yığılı plastik davranış modeli) doğrusal olmayan davranış modeli olarak plastik mafsalların uygun aralıklarla yerleştirildiği çubuk elemanlar olarak
- Kazık-zemin ortam arasındaki göreceli kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi her bir kazık düğüm noktasında doğrusal olmayan p-y, t-z ve Q-Z yayları ile modellenir.
- p-y yayları her bir düğüm noktasında sadece basınç yayı olarak her iki (x , y) doğrultuda tanımlanabilir.
- Deprem hesabından önce, düşey yüklerden kazıklarda oluşan aksel kuvvetler t-z ve Q-Z yayları kullanılarak hesaplanacaktır.
- Kazıklarda grup etkisi aşağıdaki denklem üzerinden hesaplanan azaltma katsayısı ( $\beta_G$ ) p-y yayları için tanımlanan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin kuvvet eksenine (p) uygulanacaktır :

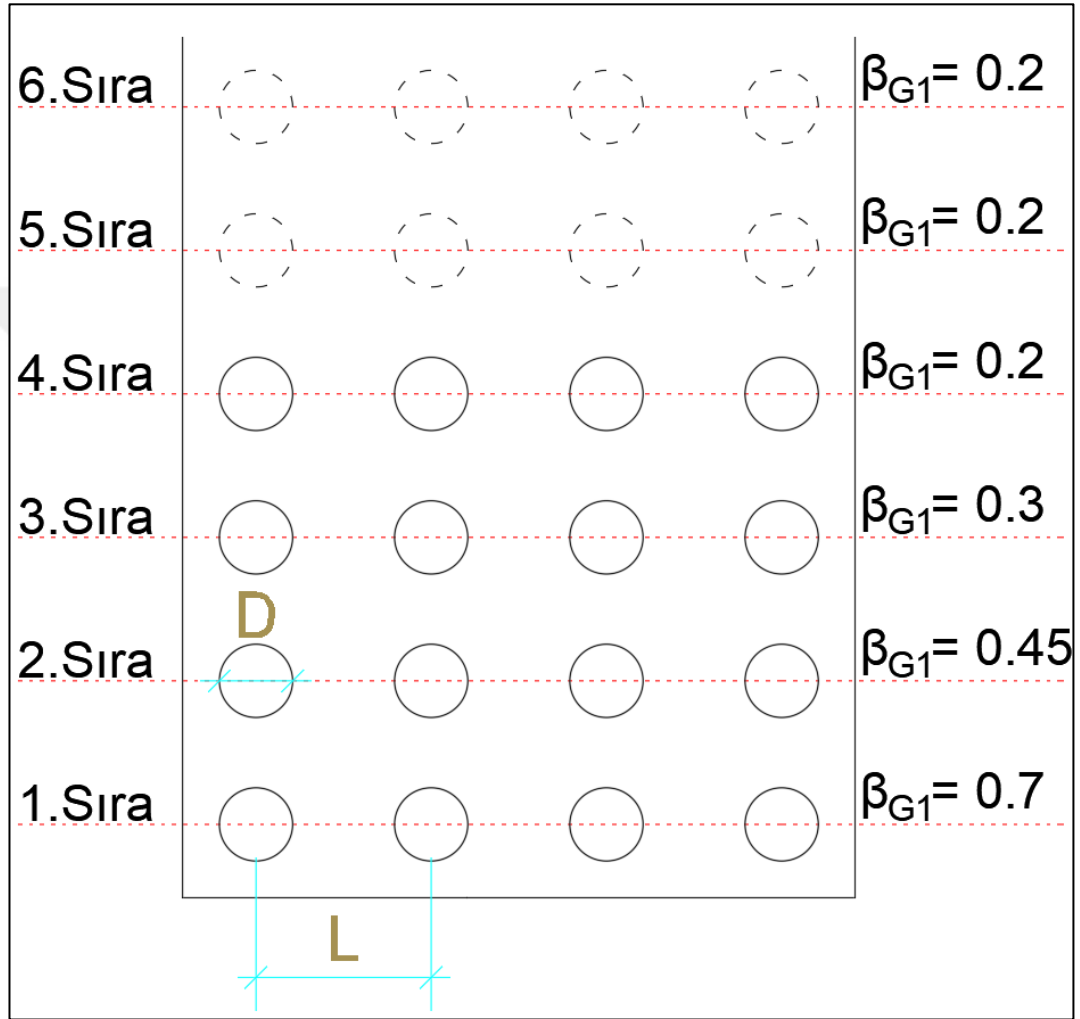
$$\beta_G = 0.2[(1 - B_{G1})s - (1 - 6B_{G1})] \quad (3.43)$$

s=göz önüne alınan doğrultuda L/D oranı (  $s \leq 6$  )

$\beta_{G1}$  = sadece basınç yaylarına uygulanmak amacıyla her bir kazık sırası için farklı uygulanacak bir katsayı ( En öndeki kazık için 0.7 , ikinci sıra kazık için 0.45 , üçüncü sıra kazık için 0.3 , dördüncü ve daha gerideki sıralar için 0.2)

temsil etmektedir. Ters yöndeki yer değiştirmeler için bu değerler kazıklara ters sıra ile uygulanacaktır.

$s > 6$  olan durumlarda ise  $\beta_{G1}$  azaltma katsayısı 1 alınacaktır. Demek oluyor ki  $L/D$  oranı 6'dan büyük olan temel altı kazıklarda grup etkisi göz önüne alınmayacaktır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Kazıklarda grup etkisi hesaplaması.

Bina Temeli ise :

- Bodrum kat çevre perdeleri ile birlikte (zemin kat seviyesine kadar) kütsüz sonsuz rijit olarak modellenecektir.
- Bodrum perdeleri-zemin arasındaki kuvvet yer değiştirme hesaplarında kullanılmak üzere düğüm noktalarında, perdeye dik doğrultuda p-y benzeri doğrusal olmayan basınç yayları tanımlanacaktır.

Deprem kayıtları (TBDY, 2018) :

- En az 11 çift deprem kaydı için yapılan serbest zemin davranış analizlerinden zemin profili boyunca p-y yaylarının tanımlandığı hizalarda elde edilen toplam yer değiştirmelerin (taban kayası yer değiştirmesi + zeminde meydana gelen rölatif yerdeğiştirme) zamana göre değişimleri kullanılacaktır.
- Deprem kaydının her bir t anı için toplam yer değiştirmeler her iki yatay doğrultuda eş zamanlı olarak p-y yaylarına basınç yönünde uygulanarak dinamik yer değiştirme yüklemesi yapılacaktır. Bodrumlu binalarda bodrum perdeleri düğüm noktalarına tanımlanmış olan yaylar için de aynı dinamik yer değiştirme yüklemesi yapılarak analiz gerçekleştirilecektir.

Yukarıda belirtilen esaslar dahilinde kurulan (sonsuz rijit, kütesiz) temel+bodrum kat çevre perdeleri – kazık (kütlesi tanımlanmış)-zemin yayları modelinde 2x11 serbest zemin davranış analizinden (deprem kayıtlarının iki yatay bileşeninden 1 tanesi X yönünde diğeri Y yönünde etki ettirilecek , daha sonra X ve Y yönünde etki ettirilen bileşenler yer değiştirerek tekrar sisteme etki ettirilecek) yay düğüm noktaları hizalarında elde edilen toplam yer değiştirmeler p-y yaylarına basınç yönünde etki ettirilerek ve kazıklar doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak analiz edilecektir.

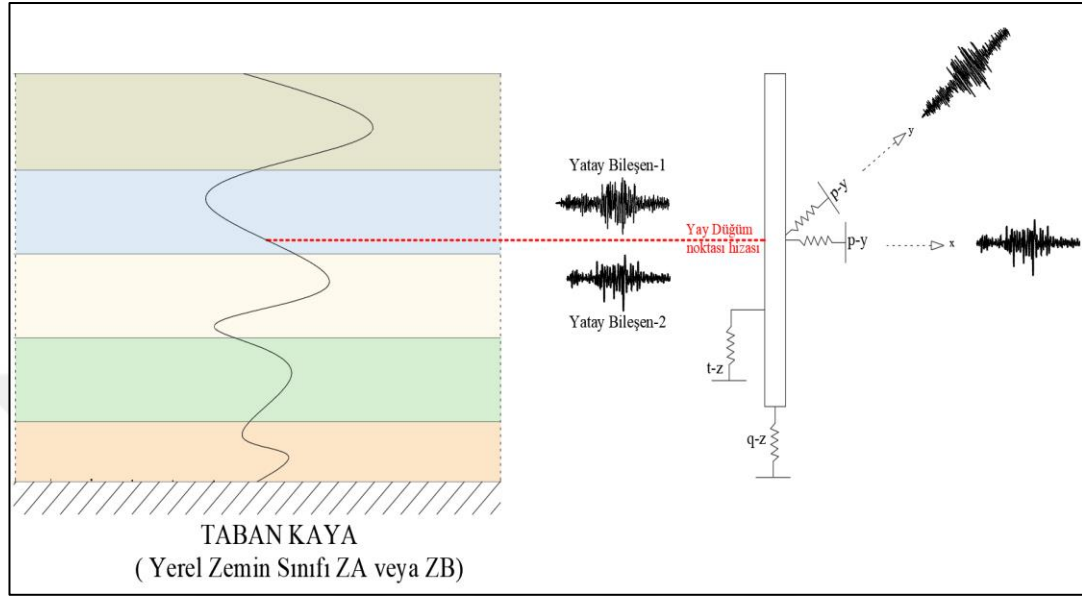
Kinematik etkileşim analizi sonucunda elde edilecek çıktılar aşağıdaki gibidir :

- Kazıklarda oluşan iç kuvvet ve şekil değiştirmeler 2x11 analizin her biri için elde edilecek ve bu değerlerin en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak iç kuvvet ve şekil değiştirme talepleri tespit edilecektir.
- 2x11 analiz için rijit temel tabanında x-y eksenleri doğrultusunda ötelenme ve bu eksenler etrafında dönme hareketlerinin toplam yer değiştirme değerlerinin zamana göre değişimleri (temel tabanı deprem kayıtları) elde edilecek ve bu veriler eylemsizlik etkileşimi hesabında kullanılacaktır.
- Kinematik etkileşimde üstyapı göz önüne alınmadığı ve temel kütesiz sonsuz rijit olarak modellendiğinden üstyapıda herhangi bir iç kuvvet meydana gelmeyecektir.

Burada zeminin kazıklara etkisi dolaylı olarak yay hizalarındaki toplam yerdeğiştirme değerlerinin p-y yaylarına basınç yönünde uygulanması ile sağlanacaktır. Yöntem-I de



olduğu gibi zemin ve kazıkların aynı ortamda modellenmesi söz konusu değildir. Zemin ortam ayrı , “temel-kazık-zemin yayları” ayrı modellenecektir ve temel altı deprem kayıtları kazık düğüm noktalarına etki edilen toplam yer değiştirme değerlerine göre “temel-kazık-zemin yayları” üzerinden elde edilecektir(Şekil 3.18)



**Şekil 3.18 :** Yöntem-II Kinematik etkileşim sistemi .

### 3.4.2 Yöntem II eylemsizlik etkileşimi hesabı

Eylemsizlik etkileşimi hesapları üstyapı-temel altsisteminin, kinematik etkileşim sonucu temel tabanı seviyesinde elde edilen etkin temel hareketlerine göre yapılan analizdir. Bu bağlamda eylemsizlik etkileşimi analizinde kullanılacak verileri geoteknik mühendisi sağlamakta ancak analizin yapılacağı üstyapı-temel modelinin kurulması ve analizi kısmen geoteknik uzmanlık sınırlarının dışındadır. Yapısal tasarım yazılımında kurulan temel-üstyapı modelinde temel seviyesinde elde edilen 11x2 deprem kayıtlarına göre analiz gerçekleştirilecektir.

Eylemsizlik etkileşimi hesap esasları TBDY (2018)'e göre aşağıdaki şekilde olacaktır :

- Öncelikle temel-kazık-zemin yayları sistemini temsil eden etkileşim yaylarına ait doğrusal olmayan davranışlarının iskelet eğrileri elde edilecektir. Bu amaçla statik kuvvetler kinematik etkileşim çıktılarının tanımlanacağı dönme ve ötelenme serbestlik derecelerine ayrı ayrı artımsal olarak etki ettirilerek her bir serbestlik derecesi için doğrusal olmayan hesap yapılacaktır.

- Üstyapı taşıyıcı sistemi, bina temeli ve varsa bodrum katlar kütleleri de göz önüne alınarak modellenecektir. Taşıyıcı sistem modelleme detayları TBDY Bölüm 13.6.2 de belirtilmiştir.
- Tanımlanan etkileşim yayları bina temel tabanına yerleştirilerek histeretik davranış modeli uyarlanacaktır.
- Oluşturulan üstyapı-temel sistemi kinematik etkileşimden elde edilen ivme kayıtlarına göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap ile analiz edilecektir.

Eylemsizlik etkileşimi analizi sonucunda :

- Üstyapıda ve temelde kuvvet, yerdeğiştirme ve şekil değiştirmelerin zamana göre değişimleri
- Temel tabanında tanımlanan etkileşim yaylarında da oluşan yerdeğiştirme ve kuvvetlerin zamana bağlı değişimleri elde edilir. Bu sonuçlardan ve artımsal statik hesap sonuçlarından yararlanılarak, eylemsizlik etkileşiminde kazıklarda oluşan iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler hesaplanır.

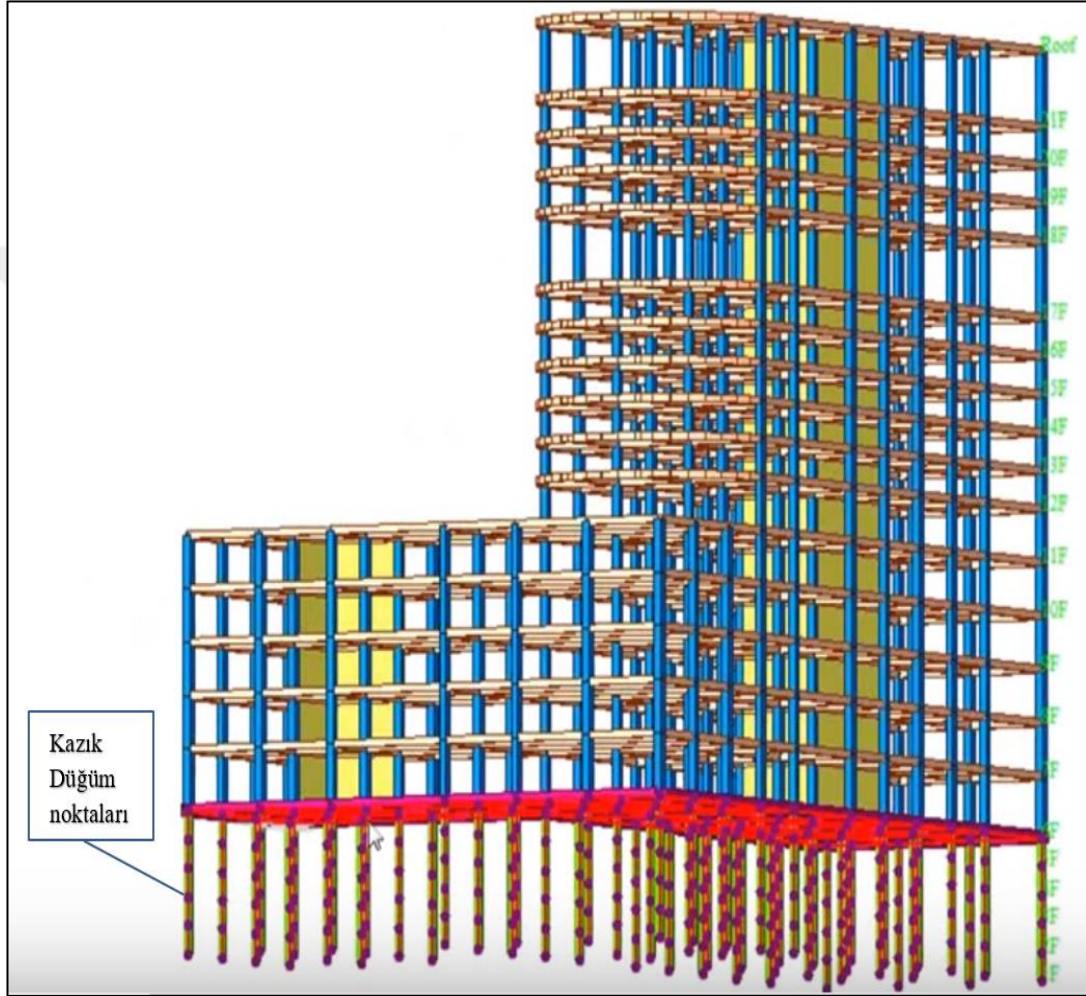
Kazıklarda tasarıma esas iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler kinematik etkileşimden elde edilenlerle mutlak değerlerinin toplamı olarak birleştirilerek hesaplanacaktır (TBDY, 2018,Bölüm 16C.5).

Ayrıca yönetmelikte eylemsizlik etkileşim sonuçları açısından önemli bir vurgu yapılmaktadır. Etkileşim analizi sonucunda üstyapı taşıyıcı sisteminde analizin dikkate alınmadığı duruma göre daha elverişli sonuçlar elde edilirse, etkileşim analizinin sonuçları üstyapı taşıyıcı sisteminin tasarımı açısından göz ardı edilecektir (TBDY, 2018) .

### **3.4.3 Ortak sistem yaklaşımı**

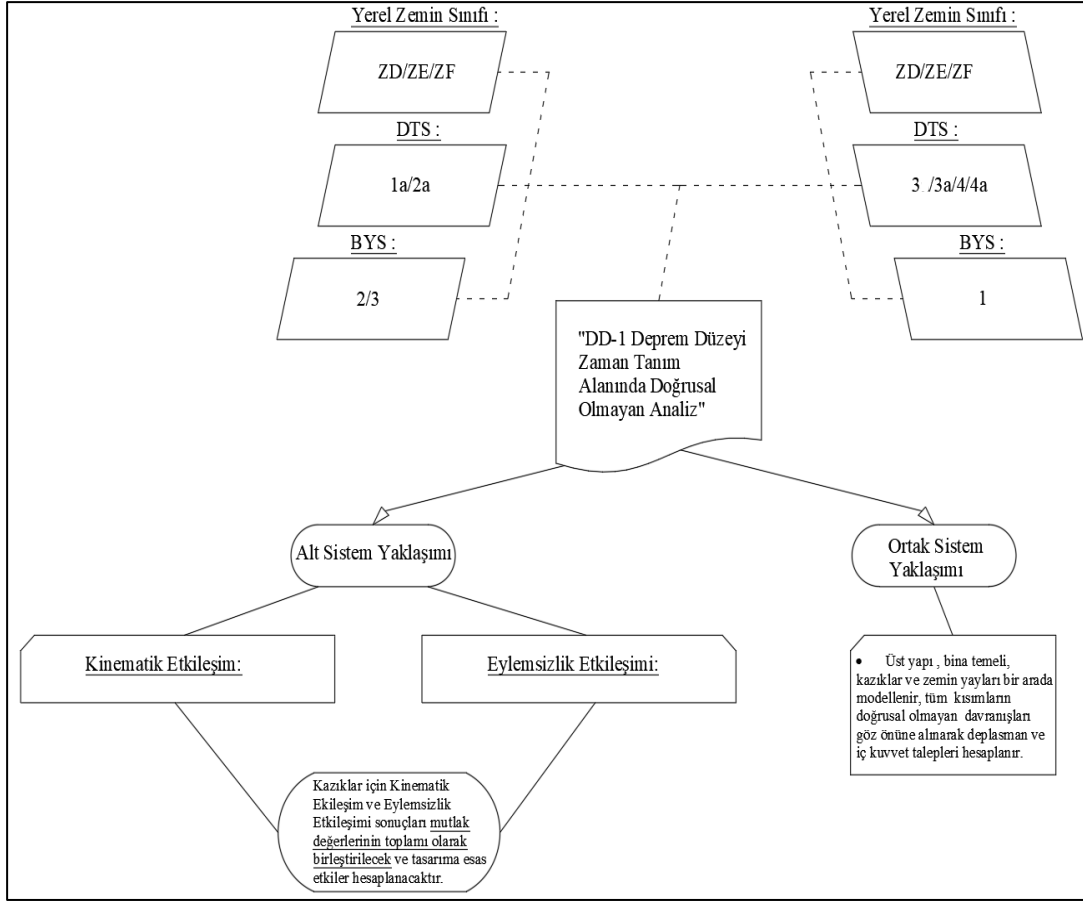
Yöntem-II de ortak sistem yaklaşımı pratik bir tercih olacaktır. Bu bağlamda bir yapısal tasarım programında kütle ve rijitliklerinin göz önüne alındığı “üstyapı-temel-kazık-zemin yayları” modelinde yay düğüm noktalarına her iki doğrultuda aynı anda serbest zemin analizinden elde edilen toplam yer değiştirme değerleri basınç yönünde etki ettirilerek zaman tanım alanında ortak sistem analizi gerçekleştirilebilir.

Aşağıda Şekil 3.19’da Yöntem-II ile yapılabilecek bir ortak sistem analizi örneği gösterilmektedir. Burada kazıklarda görünen düğüm noktalarına serbest zemin davranış analizinden aynı hizada elde edilen toplam yerdeğiştirme değerleri basınç yönünde etki ettirilerek kolayca üst yapı ve kazıklardaki toplam etkiler hesaplanabilir. Bu haliyle tek aşamada hem üst yapı hem kazıktaki deplasman ve iç kuvvet talepleri kolaylıkla hesaplanabilecektir.



**Şekil 3.19** : Yöntem-II ortak sistem çözümü (Midas GEN, 2015) .

Yöntem - II için genel hesap adımları ve kapsam bilgisi aşağıda Şekil 3.20 üzerinde gösterilmektedir. Söz konusu şekil üzerinden anlaşılacağı üzere deprem tehlikesinin görece daha fazla olduğu durumda bina yüksekliğinin daha az olduğu (BYS 2 ,3) bu yöntem kapsamında ele alınmaktadır. Daha yüksek binalar için ise deprem tehlikesinin kısmen daha az olduğu durumda (DTS 3/3a/4/4a) Yöntem-II'nin kullanılması zorunlu tutulmuştur.



Şekil 3.20 : Yöntem-II kapsam ve hesap adımları .

### 3.5 Yöntem III İle Etkileşim Hesabı

Yöntem-III yerel zemin sınıfının ZD, ZE ve ZF olduğu,  $S_{DS}$  ve  $H_N$  değerlerinin aşağıda belirtilen aralıklara denk geldiği durumlarda yapılacak olan zaman tanım alanındaki doğrusal etkileşim analizlerinde kullanılacaktır.

- i) :  $H_N \leq 42$  m (12 Katlı Bina),  $S_{DS} \geq 0.50$   
(DTS 1a,2a: Hastane, Okul, Müze vs.)
- (ii) :  $H_N \leq 91$  ( $\leq 26$  Katlı Bina),  $0.33 \leq SDS < 0.5$  için  
(DTS 3,3a),  
 $H_N \leq 70$  ( $\leq 20$  Katlı Bina),  $SDS \geq 0.50$  için  
(DTS 1,2: Konut, işyeri otel vs.)

Yöntem-III kapsamında yapı-kazık-zemin etkileşim hesapları DD-2 deprem yer hareketi düzeyi etkisi altında yapılacaktır.

### 3.5.1 Yöntem III kinematik etkileşim hesabı

Yöntem-III kinematik etkileşim hesabı Yöntem-II için önerilen hesap yönteminin bir miktar basitleştirilmiş halidir. Bu yöntemde de temel-kazık-zemin ortamı bir arada modellenmez. Zemin ortamda TBDY bölüm 16.5.2 de anlatıldığı gibi tek boyutlu, yatay tabakalı serbest zemin davranış analizi yapılır bu analizden istenilen derinliklerde tespit edilen deprem hareketi bileşenleri kazık ve kütlesiz rijit temelin modellendiği başka bir analiz çerçevesinde değerlendirilerek temel seviyesi ivme kayıtları ve kazıklarda oluşan iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerleri hesaplanır.

TBDY (2018) 'de yöntem-II kapsamında yapılacak kinematik etkileşim hesaplarına ilişkin esaslar aşağıda belirtildiği gibidir :

Model ile ilgili esaslar :

- Zemin ortam için herhangi bir modelleme yapılmaz (Temel-Kazık-Zemin modeli oluşturulmaz)
- Sahaya özel serbest zemin davranış analizi yapılır (TBDY Bölüm 16.5.2).
- Taban Kayası Bina Temelinden minimum  $(3B, L_{max})$  mesafede olacak şekilde tanımlanır.
- DD-2 deprem seviyesine göre analiz yapılır.
- Bina temeli-taban kaya mesafesi bina genişliğinin 3 katından ve en uzun kazık boyundan daha uzun olacaktır  $\geq (3B , L_{max})$

Kazıkların modellenmesine ilişkin esaslar aşağıda belirtilmiştir (TBDY, 2018) :

- TBDY 4.5.2'de tanımlandığı doğrusal davranış esas alınarak, çubuk elemanlar olarak tanımlanır.
- Kazık-zemin ortam arasındaki görelî kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi her bir kazık düğüm noktasında doğrusal olmayan p-y, t-z ve Q-Z yayları ile modellenir.
- p-y yayları her bir düğüm noktasında sadece basınç yayı olarak her iki (x , y) doğrultuda tanımlanabilir.
- Deprem hesabından önce, düşey yüklerden kazıklarda oluşan eksenel kuvvetler t-z ve Q-Z yayları kullanılarak hesaplanacaktır.

- Kazıklarda grup etkisi Yöntem-II altında anlatılan azaltma katsayısı ( $\beta_G$ ) hesabı ile bulunacak ve p-y yayları için tanımlanan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin kuvvet eksenine (p) uygulanacaktır.

Bina temeli (TBDY, 2018) :

- Bodrum kat çevre perdeleri ile birlikte (zemin kat seviyesine kadar) kütsüz sonsuz rijit olarak modellenecektir.
- Bodrum perdeleri-zemin arasındaki kuvvet yer değiştirme hesaplarında kullanılmak üzere düğüm noktalarında, perdeye dik doğrultuda p-y benzeri doğrusal olmayan basınç yayları tanımlanacaktır.

Deprem kayıtları (TBDY, 2018) :

- En az 11 çift deprem kaydı için yapılan serbest zemin davranış analizlerinden zemin profili boyunca p-y yaylarının tanımlandığı hizalarda elde edilen toplam yer değiştirmelerin (taban kayası yer değiştirmesi + zeminde meydana gelen rölatif yerdeğiştirme) zamana göre maksimumlarının zarfı kullanılacaktır.
- Toplam yerdeğiştirme zarfı p-y yaylarına basınç yönünde sıfırdan başlayarak maksimum değere kadar artımsal şekilde uygulanarak statik artımsal yerdeğiştirme yüklemesi yapılacaktır. Bodrumlu binalarda bodrum perdeleri düğüm noktalarına tanımlanmış olan yaylar için de aynı statik yerdeğiştirme yüklemesi yapılarak Yöntem-III kinematik etkileşim analizi gerçekleştirilecektir.

Yukarıda belirtilen esaslar dahilinde kurulan (sonsuz rijit ,kütsüz) temel+bodrum kat çevre perdeleri – kazık (kütsesi tanımlanmış)-zemin yayları modelinde 2x11 serbest zemin davranış analizinden (deprem kayıtlarının iki yatay bileşeninden 1 tanesi X yönünde diğeri Y yönünde etki ettirilecek , daha sonra X ve Y yönünde etki ettirilen bileşenler yer değiştirerek tekrar sisteme etki ettirilecek) yay düğüm noktaları hizalarında elde edilen toplam yer değiştirmelerin zamana göre maksimumlarının zarfı p-y yaylarına basınç yönünde statik artımsal şekilde etki ettirilerek ve kazıkların doğrusal davranışları göz önüne alınarak analiz edilecektir.

Kinematik etkileşim analizi sonucunda elde edilecek çıktıları aşağıdaki gibidir :

- Kazıklarda oluşan iç kuvvet ve şekil değiştirmeler 2x11 analizin her biri için elde edilecek ve bu değerlerin en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak

iç kuvvet ve şekil değiştirme talepleri tespit edilecektir. Bu şekilde hesaplanan moment değerleri  $R=2,5$  katsayısına bölünerek azaltılacak , kesme ve eksenel kuvvetler için azaltma yapılmayacaktır.

- Statik-kinematik etkileşim hesabının yapıldığı Yöntem-III'te diğer yöntemlerde olduğu gibi deprem kayıtlarının her bir t adımı için değil statik artımsal olarak analiz yapılır. Dolayısıyla zemin-kazık etkileşimi ile temel tabanı seviyesindeki etkin temel hareketlerinin, ivme kaydının elde edilmesi söz konusu değildir.
- Eylemsizlik etkileşimi analizlerinde kullanılacak etkin temel hareketleri bileşenleri ( yerdeğiştirme ve spektrum) yaklaşık olarak serbest zemin davranış analizlerinden temel tabanı seviyesinde elde edilen spektrumların ortalaması alınarak tanımlanabilir. Bu spektrumun ordinatları yönetmelikte yerel zemin sınıfına göre tanımlanan tasarım spektrumu ordinatlarında daha küçük olmayacaktır.
- Kinematik etkileşimde üstyapı göz önüne alınmadığı ve temel kütsüz sonsuz rijit olarak modellendiğinden üstyapıda herhangi bir iç kuvvet meydana gelmeyecektir.

### **3.5.2 Yöntem III eylemsizlik etkileşimi hesabı**

Eylemsizlik etkileşimi hesapları üstyapı-temel altsisteminin, kinematik etkileşim sonucu temel tabanı seviyesinde elde edilen etkin temel hareketlerine göre yapılan analizidir. Bu bağlamda Yöntem-III'te eylemsizlik etkileşimi hesabı üstyapı-temel-kazık-zemin yaylarını içeren bir model kurularak yapılabilir.

Bu modelde yayların doğrusal davranışları (başlangıç rijitlikleri) göz önüne alınacaktır. Diğer yöntemlerde kazıkların rijitlikleri ve kütleleri göz önüne alınarak taban kayasında tanımlanan deprem kaydının temel seviyesine taşınmış hali elde edilmektedir. Ancak Yöntem-III'te direkt serbest zemin davranış analizinden elde edilen etkin temel hareketleri kullanıldığı için kazıkların zemin ortam içerisinde yayılan deprem hareketine etkisi dikkate alınmamış olur. Dolayısıyla eylemsizlik etkileşimi analizinde kazıkların başlangıç rijitliklerinin göz önüne alınması kazıkların deprem kayıtlarına olan etkisi dolaylı olarak göz önüne alınmış olur. Belirtilen modelde üstyapı, temel ve bodrum katların kütleleri göz önüne alınacak, kazıklar ise kütsüz olarak tanımlanacaktır.

Bu yöntem bina taşıyıcı sistemi açısından eşdeğer deprem yükü yöntemi veya mod birleştirme yöntemine göre yapılan doğrusal deprem hesabının etkileşim etkilerinin göz önüne alındığı haline denk gelmektedir (TBDY, 2018).

Eylemsizlik etkileşimi analizi sonucunda :

- TBDY 3.3.1’de verilen tanıma göre dıştan rijit perdelerle çevrelenen bodrumların bulunduğu binalarda, Eşdeğer deprem yükü veya modal hesap yöntemlerine göre doğrusal deprem hesabı için uygulanan iki adımlı hesap yaklaşımında kazıklar, bodrum elemanları ile birlikte göz önüne alınacaktır.
- Bodrumlar için uygulanan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) eylemsizlik etkileşimi sonucunda kazıklarda hesaplanan kuvvet tesirlerine de uygulanacaktır. Bodrumsuz binalarda ise üstyapı taşıyıcı sistemine ait R ve D katsayıları iç kuvvetlere uygulanacaktır (TBDY, 2018).
- Eylemsizlik etkileşimi analizi sonucunda kazıklarda tespit edilen iç kuvvetler her doğrultu için ( X ve Y doğrultuları) kinematik etkileşimden elde edilen değerlerle mutlak değerlerin toplamı şeklinde hesaplanacaktır.
- X ve Y doğrultularındaki depremlerden oluşan kazık iç kuvvetleri daha sonra aşağıda belirtilen denklemdeki gibi (TBDY, 2018, Bölüm 4.4.2) birleştirilecektir.

$$\begin{aligned} E_d^{(H)} &= \pm E_d^{(X)} \pm 0.3E_d^{(Y)} \\ E_d^{(H)} &= \pm 0.3E_d^{(X)} \pm E_d^{(Y)} \end{aligned} \quad (3.44)$$

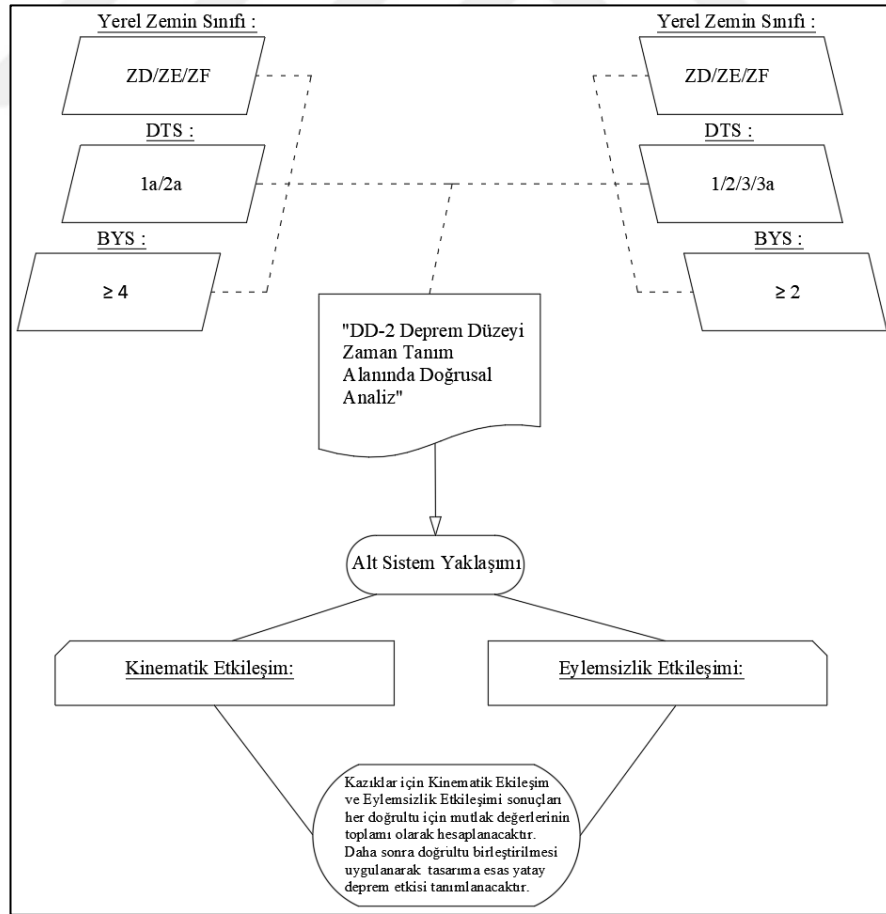
$E_d^{(X)}$ ,  $E_d^{(Y)}$  X ve Y doğrultularındaki depremlere göre yönetmeliğin 4.10 bölümünde belirtilen esaslara göre hesaplanan değerleri ifade etmektedir.  $E_d^{(H)}$  ise doğrultu birleştirilmesi uygulanmış tasarıma esas yatay deprem etkisi olarak tanımlanmaktadır (TBDY, 2018).

Ayrıca yönetmelikte diğer yöntemlerde olduğu gibi Yöntem-III için de eylemsizlik etkileşimi analizleri sonucunda üstyapı taşıyıcı sisteminde analizin dikkate alınmadığı duruma göre daha elverişli sonuçlar elde edilirse, etkileşim analizinin sonuçlarının üstyapı taşıyıcı sisteminin tasarımı açısından göz ardı edileceği belirtilmektedir.



### 3.5.3 Ortak sistem yaklaşımı

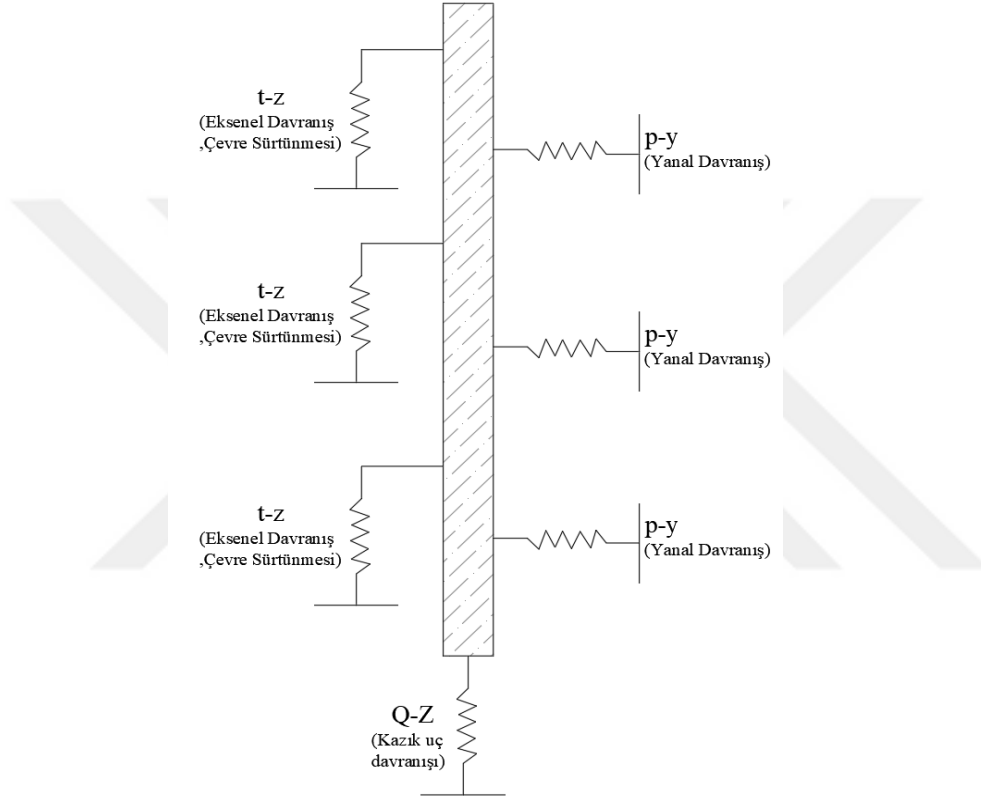
Yöntem-III için yönetmelikte kinematik etkileşim ve eylemsizlik etkileşim hesaplarının birleştirileceği bir ortak sistem hesabından bahsedilmemiştir (Şekil 3.21). Statik kinematik etkileşim olarak tanımlanan kinematik etkileşim hesabı diğer yöntemlere göre daha basit ele alınmakta ve bu analiz sonucunda sadece kazıklardaki iç kuvvet ve yerdeğiştirme talepleri elde edilmektedir. Eylemsizlik etkileşimi analizi kapsamında ise kullanılan temel seviyesi deprem kaydı tümüyle serbest zemin davranış analizinden elde edilmekte kazıkların etkisi ise dolaylı olarak eylemsizlik etkileşimi modelinde başlangıç rijitlikleri göz önüne alınarak ve kütsüz olarak tanımlanmaları ile sağlanmaktadır. Bu bağlamda Yöntem-II deki gibi üst yapı-temel-kazık-zemin yayları ortak sisteminin kurulup analiz edilmesi mümkün değildir çünkü bu yöntemde statik kinematik etkileşim bölümünde düğüm hizalarındaki toplam zemin yer değiştirmelerinin maksimumlarının zarfı sisteme artımsal olarak etki ettirilmekte, eylemsizlik etkileşimi kısmında ise temel tabanı seviyesinde serbest zemin davranışı analizine göre elde edilen tepki spektrumlarının ortalaması kullanılmaktadır.



Şekil 3.21 : Yöntem-III kapsam ve hesap adımları .

### 3.6 Kazık Zemin Etkileşimi İçin Doğrusal Olmayan Zemin Yaylarının Tanımlanması

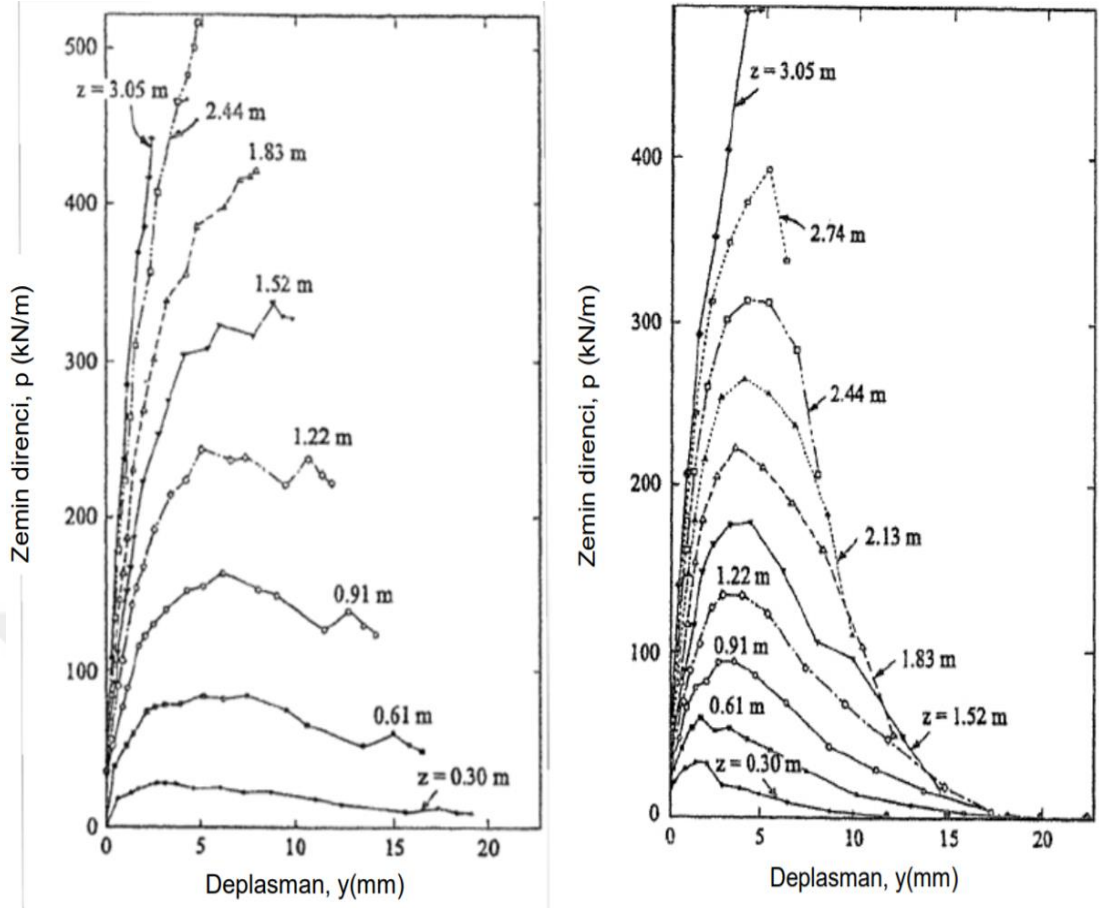
Yöntem-II ve Yöntem-III kapsamında yapılacak olan etkileşim analizlerinde zemin ortamının kazıklara olan etkisi dolaylı olarak yaylar tarafından temsil edilmektedir. Bu yaylar yanal davranış için p-y , çevre sürtünmesi (eksenel davranış) için t-z ve kazık uç davranışı için ise Q-Z olarak adlandırılmaktadır ( Şekil 3.22).



Şekil 3.22 : Kazık-zemin etkileşim yaylarının gösterimi .

TBDY (2018) kapsamında yayların tanımlanması açısından kullanılacak referans kaynaklar belirtilmiştir. Bu kaynaklar aşağıda çizelge 3.10 'da ve şekil 3.24'te belirtilmektedir. Yönetmelikte sadece kil ve kum gibi zemin ortamlar için referanslar verilmiştir. Kaya ve zayıf kaya ortamlardaki yanal davranış için kullanılacak p-y bağıntıları ise ayrıca ilave edilmiştir.

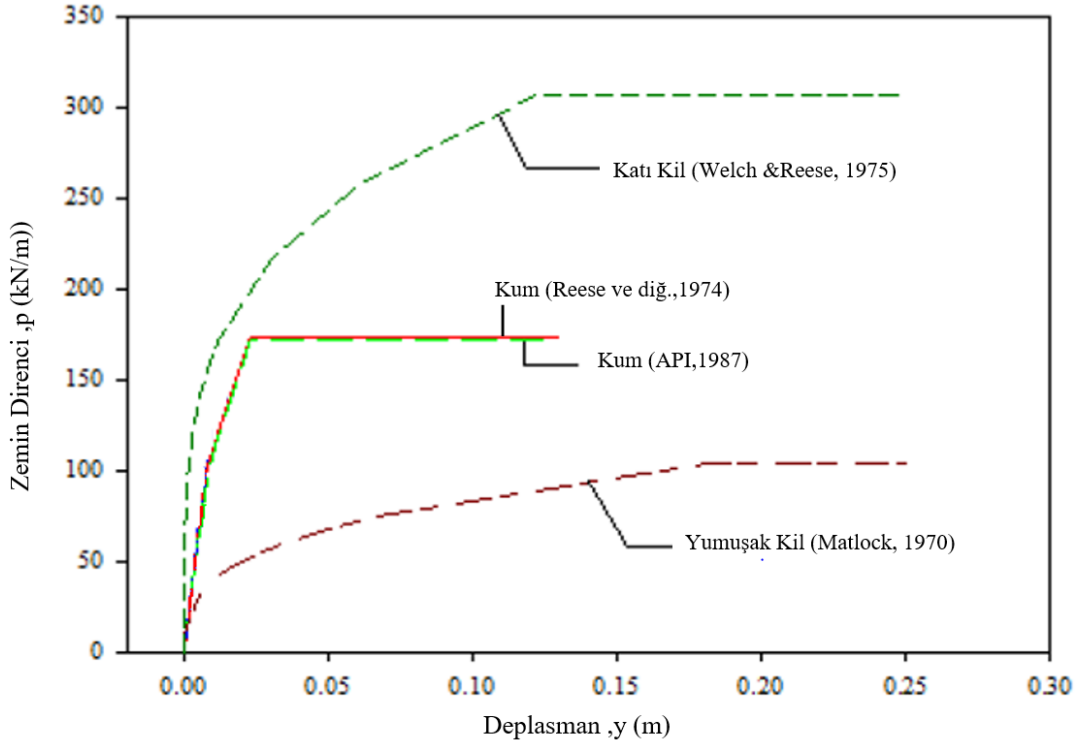
Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi statik durumda zemin direnci artan kazık deplasmanları ile birlikte artarak nihai bir değere ulaşmaktadır (Şekil 3.23). Ancak deprem gibi tekrarlı yükleme koşullarında artan kazık deplasmanları ile birlikte zemin yanal direnci önce bir pik değere ulaşmakta, daha sonra ise artan deplasmanlara paralel hızlıca azalmakta ve zemin yanal direncini tamamıyla yitirmektedir.



**Şekil 3.23 :** Statik yükleme (sol) ve tekrarlı yükleme sonucu elde edilen p-y eğrileri (Kuruoğlu ve diğ., 2011).

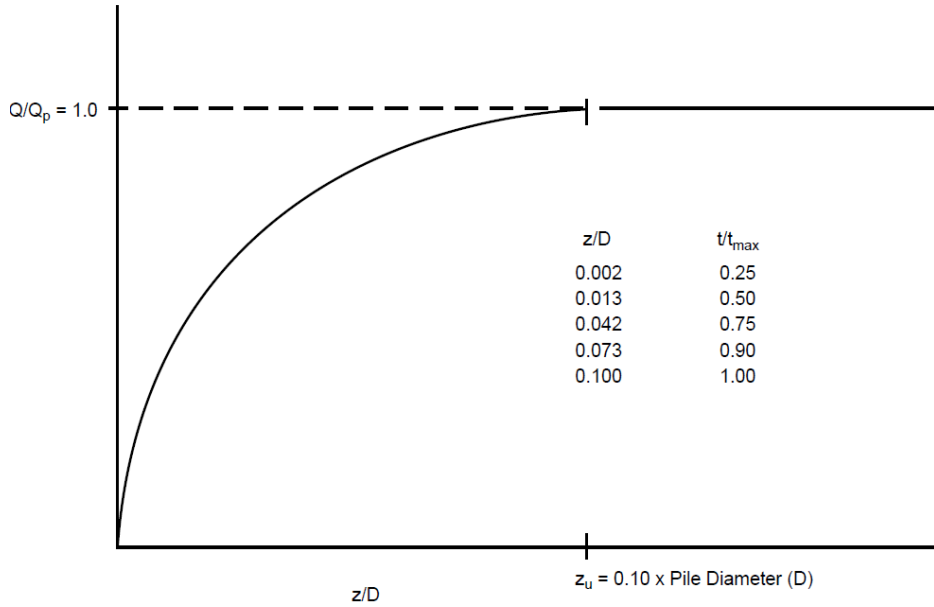
**Çizelge 3.10 :** Kazık-zemin etkileşim yayları ve referans bağlantıları.

Yay Tipi	Zemin tipi	Referans
p-y	Yumuşak kil ( su <50 kPa)	Matlock (1970)
	Katı Kil ( Su seviyesi altında)	Reese ve diğerleri (1975)
	Katı Kil ( Su seviyesi üstünde)	Welch ve Reese (1972)
	Kum	Reese ve diğerleri (1974)
	Zayıf kaya	Reese (1997)
	Kaya	Nyman (1982)
t-z ve Q-Z	Kil ve Kum	API WSD RP-2A (2000)

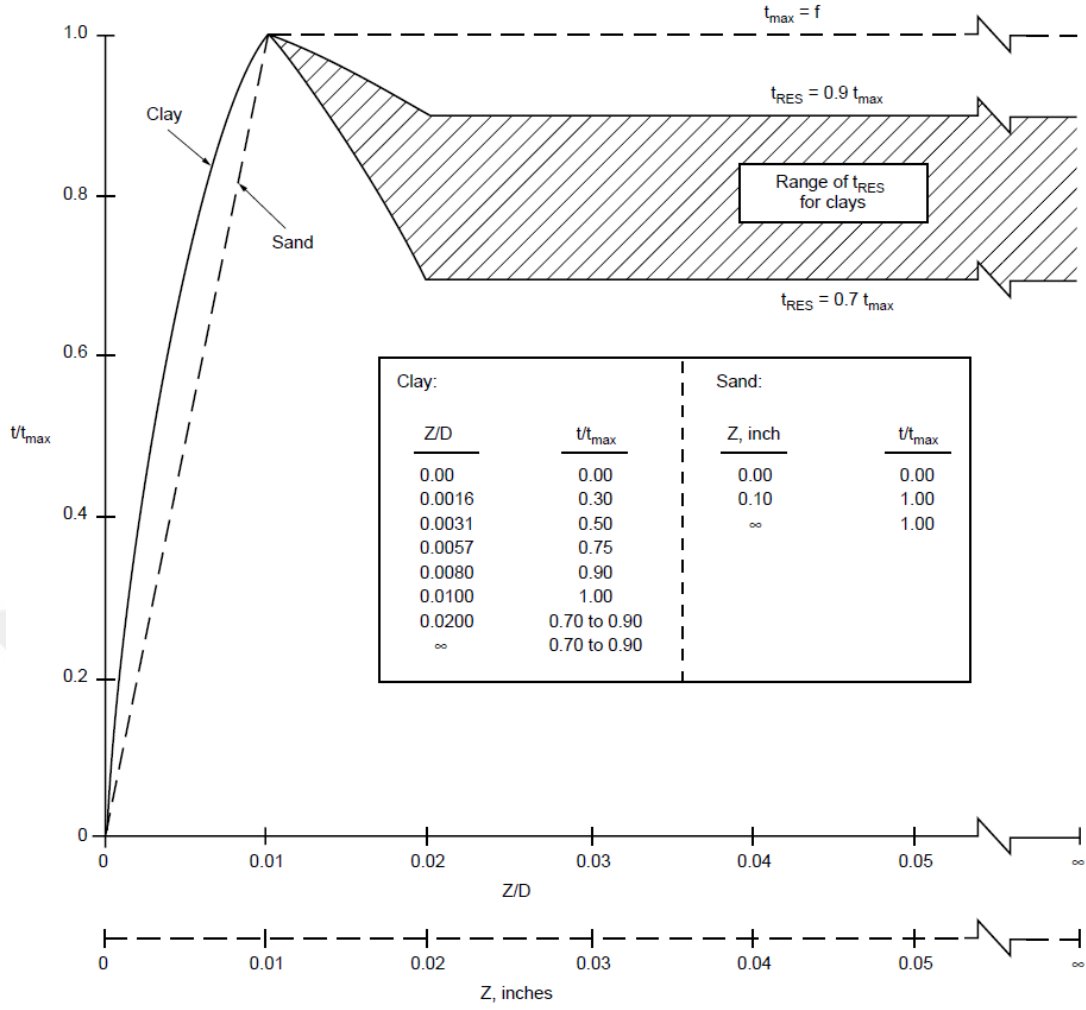


Şekil 3.24 : Çeşitli bağıntılara göre p-y bağıntıları (Pando, 2013).

Q-Z ve t-z yayları için ise API ( American Petroleum Institute) bağlantıları referans verilmiştir. Aşağıda sırasıyla Q-Z ve t-z yayları için önerilen doğrusal olmayan davranış bağıntıları gösterilmektedir (Şekil 3.25 ve 3.26).



Şekil 3.25 : Kazık ucu yük- deplasman (Q-Z) eğrisi (API WSD RP-2A, 2000).



**Şekil 3.26 :** Kazık aksenal yük-deplasman ( $t$ - $z$ ) eğrisi (API WSD RP-2A, 2000).

Burada :

$z$  = uç deplasmanı (mm)

$D$  = kazık çapı (mm)

$Q$  = mobilize uç taşıma kapasitesi. (kN)

$Q_p$  = toplam uç taşıma kapasitesi (kN)

$t$  = mobilize çevre sürtünmesi (kPa)

$t_{max}$  = maksimum çevre sürtünme kapasitesi (kPa)

göstermektedir.

Şekil 3.26'da kil ve kum zeminler için kazık aksenal yük – deplasman eğrileri ( $t$ - $z$ ) grafikleri gösterilmiştir.



#### 4. YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNİN 2 BOYUTLU ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Bu tez kapsamında zayıf zemin koşullarında inşa edilecek yüksek katlı, kazıklı temelli yapı için yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri yapılarak farklı analiz senaryoları ile temel alt seviyesi deprem hareketlerinin, tasarım spektrumunun ve kazıklarda oluşan iç kuvvet değerlerinin değişimi incelenmiştir.

##### 4.1 Zemin Koşulları , Geoteknik Değerlendirme ve Tasarım Parametreleri

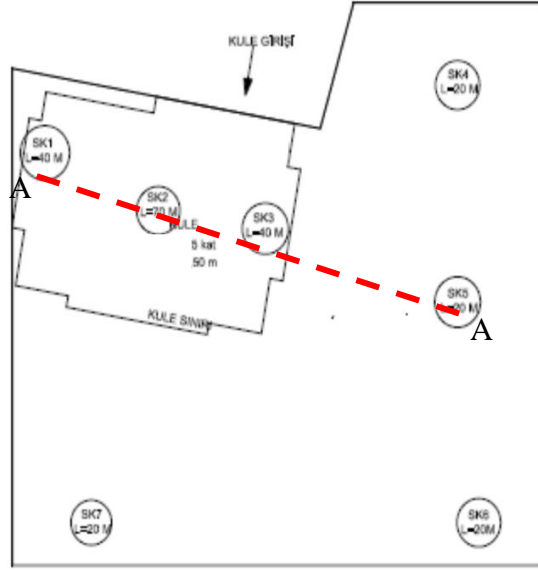
Tez çalışması kapsamında İzmir İli, Karşıyaka ilçesinde yüksek katlı bir konut projesi için yapılmış olan sondaj logu, arazi ve laboratuvar deney sonuçları kullanılmıştır. Kullanılan sondaj logları ve deney sonuçları Ek-A'da verilmiştir.

##### 4.1.1 Saha araştırmaları

Söz konusu inceleme alanında 7 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Sondajlara ait bilgiler aşağıda verilmiştir. Ayrıca sahanın deprensellik ve sismik hızlarının tespit edilmesi amacıyla jeofizik yöntemlerden iki serim sismik kırılma +MASW ile ölçümler alınmıştır. Sondaj bilgileri Çizelge 4.1'de sondaj yerleri ise Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

**Çizelge 4.1 : Sondaj bilgileri.**

Sondaj No	Kuyu Derinliği (m)	Tarih	YASS (m)
SK-1	40	13/05-13/05/2013	2
SK-2	70	17/05-17/05/2013	2
SK-3	40	18/05-18/05/2013	2
SK-4	20	17/05-17/05/2013	2
SK-5	20	17/05-18/05/2013	2
SK-6	20	18/05-18/05/2013	2
SK-7	20	19/05-19/05/2013	2



**Şekil 4.1 : Sondaj yerlerinin gösterimi**

#### **4.1.2 İnceleme alanının jeolojisi**

İzmir İlinin kuzeybatısındaki düzlük alanlarının büyük bir bölümünü eski Gediz deltası sedimanları oluşturmaktadır. Bu, derinde yer alan karasal orijinli aşırı konsolide neojen yaşlı birimler üzerinde, deniz ortamında çökelerek oluşmuş kuvaterner yaşlı alüvyonel (Qa) birimler gözlenmiştir.

İnceleme alanında yapılan SK-1, SK-2, SK-3, SK-4, SK-5, SK-6 ve SK-7 nolu sondajlarda genel olarak yüzeyden itibaren 1.50-2.00 m aralığında değişen derinliklere kadar yapay dolgu tabakasının ardından, araştırma derinlikleri (2.00-70.00 m) boyunca kuvaterner yaşlı killi, siltli ve kumlu alüvyonel birimler gözlenmektedir.

İnceleme alanında açılan bütün sondaj kuyularında araştırma derinlikleri boyunca farklı derinliklerde KİL birimi gözlenmiştir. Gözlemlenen birimin üst seviyeleri (2.00-3.50m) sarımsı kahve renkli olup, yaklaşık 30.00-32.00 m seviyelerine kadar yeşilimsi gri, koyu gri, siyahımsı gri renk tonlarında gözlenmekte olup denizel kökenlidir.

Silt, ince daneli kum, değişen oranlarda ince daneli çakıl ve denizel kavrık içermektedir.

Silt ve kum bantlar şeklinde ya da asıl malzeme ile birlikte çeşitli oranlarda bulunmaktadır.

32.00 m seviyelerinden sonra açık kahve, grimsi kahve, açık yeşilimsi krem, yeşilimsi kahve ve kahve renk tonlarında gözlenmekte olup karasal kökenlidir.



Sondaj kuyularında farklı derinliklerde gözlenen SİLT birimi, koyu gri, yeşilimsi gri, gri, kahvemsi gri tonlarındadır. Çeşitli oranlarda ince daneli kum içermektedir. Silt içerisinde kum ve killer yer yer bantlar şeklinde de gözlenmektedir.

KUM birimi genel olarak gri, yeşilimsi gri, sarımsı kahve renkli, kahvemsi gri renklerde gözlenmektedir. Birim inceden iriye kadar değişen dane boyuna sahiptir. Değişen oranlarda çakıl, silt ve kil içermektedir.

#### 4.1.3 SPT-N<sub>30</sub> değerleri

Söz konusu inceleme sahasında yapılan sondajlarda yaklaşık 1.50 m aralıklar ile standart penetrasyon testi (SPT-N) yapılmıştır. Bu SPT-N<sub>30</sub> değerlerinin derinlikle değişimi Çizelge 4.2’de , grafik olarak dağılımı da Şekil-4.2’ de gösterilmiştir. SPTN<sub>30</sub> değerlerinin derinlikle değişimi incelendiğinde :

- 0-6 m arası N<sub>30</sub> değeri 2-3 aralığında çok yumuşak-yumuşak
- 6-18 m arası N<sub>30</sub> değeri 14-22 aralığında katı-çok katı
- 18-32 m arası N<sub>30</sub> değeri 9-17 aralığında orta katı- katı
- 32-51 m arası N<sub>30</sub> değeri 14-25 aralığında katı-çok katı

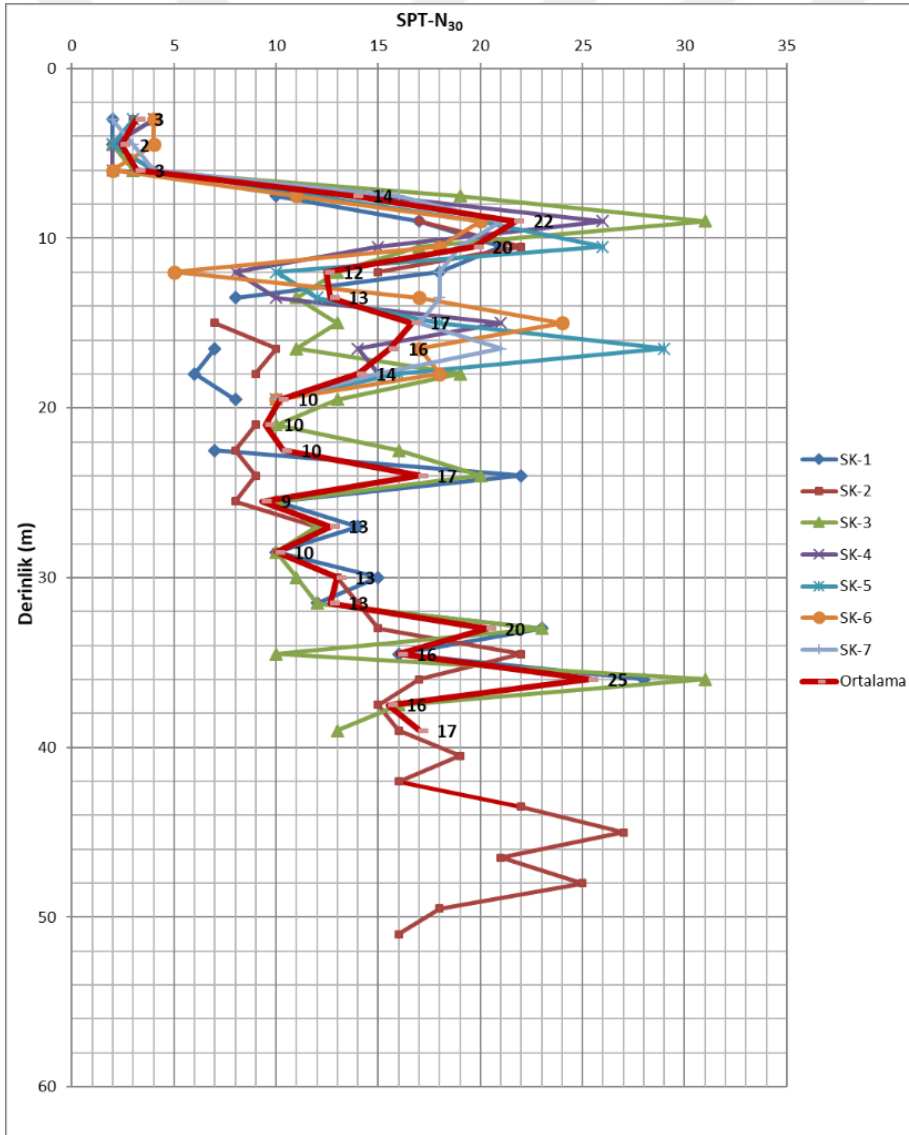
kıvamında olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.2 : SPT-N<sub>30</sub> değerleri .**

Derinlik (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6	SK-7	Ort.
3	2	3	4	4	3	4	2	3
4.5	2	2	2	2	2	4	3	2
6		4	3	2	4	2	4	3
7.5	10		19	15	12	11	16	14
9	17	17	31	26	20	20	21	22
10.5	21	22	17	15	26	18	19	20
12	18	15	13	8	10	5	18	12
13.5	8		11	10	12	17	18	13
15		7	13	21	18	24	17	17
16.5	7	10	11	14	29	17	21	16
18	6	9	19	15	16	18	15	14
19.5	8		13	10	10	10	10	10
21		9	10					10
22.5	7	8	16					10
24	22	9	20					17
25.5	10	8	10					9
27	14	12	12					13
28.5	10	10	10					10
30	15	13	11					13

**Çizelge 4.2 (devam) : SPT-N<sub>30</sub> değerleri.**

Derinlik (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6	SK-7	Ort.
31.5	12	14	12					13
33	23	15	23					20
34.5	16	22	10					16
36	28	17	31					25
37.5		15	16					16
39	22	16	13					17
40.5		19						19
42		16						16
43.5		22						22
45		27						27
46.5		21						21
48		25						25
49.5		18						18
51		16						16



**Şekil 4.2 : SPT-N<sub>30</sub> değerlerinin derinlikle değişiminin grafiği.**

#### 4.1.4 Jeofizik ölçümlerin değerlendirilmesi

İnceleme alanında yapılan sismik kırılma ve MASW ölçüm sonuçları Çizelge-4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3 : Jeofizik test sonuçları .**

Açıklama			Serim No				MASW	MASW
Elastik parametreler	Simge	Birim	Serim-1		Serim-2		S1	S2
Araştırma Derinliği (m)			7.34	>20	7.72	>20	-	-
P Dalga hızı	V <sub>p</sub>	m/s	332	933	504	2139	-	-
S Dalga hızı	V <sub>s</sub>	m/s	137	162	169	178	-	-
Dinamik Elastisite Mod.	E <sub>d</sub>	MPa	69	133	120	200	-	-
Ortalama 30 m için S dalga hızı	(V <sub>s</sub> ) <sub>30</sub>	m/s	155		175		176	153
Zemin Büyütmesi	Ak	-	3.29		3.06		3.06	3.32
Zemin Hakim Periyodu	T	s	0.90		0.80		0.68	0.78

#### 4.1.5 Laboratuvar deney sonuçları

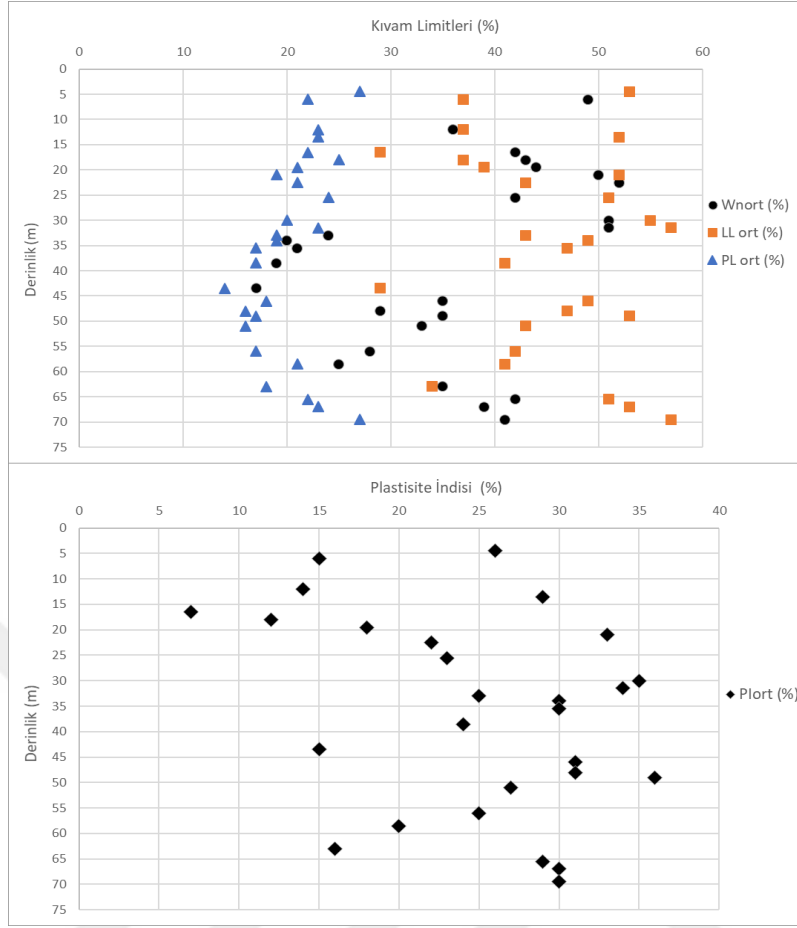
Söz konusu inceleme alanı zemin etüt çalışmaları kapsamında yaptırılan laboratuvar deney sonuçlarına göre kil numunelerde yapılan deney sonucunda su muhtevası (W<sub>n</sub>, %), Plastik limit (PL, %), Plastisite indisi (PI, %) ve İnce malzeme oranları (-#200,%) aşağıdaki şekil ve çizelgelerde gösterildiği gibidir (Şekil 4.3).

İnceleme alanında yapılan elek analizleri sonucu ince malzeme oranları aşağıda Çizelge 4.4'te gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre 3-70 m arası alınan numunelerde ortalama ince dane oranı %78 civarında gözükmektedir.

İnceleme alanında yapılmış olan mukavemet deney sonuçları aşağıda Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4 : İnce malzeme oranları.**

Derinlik (m)	-#200 (75µm)	Derinlik (m)	-#200 (75 µm)	Derinlik (m)	-#200 (75 µm)
3	84	18	98	48	42
4.5	93	19.5	91	49	42
6	91	21	100	51	95
7.5	78	24	75	56	64
9	53	30	97	58.5	48
10.5	30	31.5	100	63	94
12	67	33	60	65.5	82
13.5	94	35.5	69	67	87
15	86	38.5	49	69.5	100
16.5	96	46	85	<b>Ortalama</b>	<b>78%</b>



Şekil 4.3 : Kıvam limitleri ve plastisite indisi dağılımı.

Çizelge 4.5 : Mukavemet deney sonuçları.

Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Serbest Basma		Direkt Kesme Kutusu		Üç Eksenli Basınç (UU)		Zemin Sınıfı
			$q_u$ (kPa)	$c_u$ (kPa)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	
SK-1	UD-1	6.00-6.45	44	22					CL
SK-1	UD-3	21.00-21.50	73	36.5					CH
SK-1	Karot-1	33	528	264					CH
SK-1	Karot-3	35.5-36.0					50	12.4	CL
SK-2	SPT	9.00-9.45			14	10			ML
SK-2	SPT	10.5-10.95			9	15			SM
SK-2	UD-1	13.5	40	20					CH
SK-2	Karot-1	38.5	177	88.5					CL
SK-2	Karot-2	46	270	135					CL
SK-2	Karot-7	65.5-66.0					55	5	CH
SK-2	Karot-9	69.5	394	197					CH
SK-3	SPT	12.00-12.45			8	14			SM
SK-7	SPT	10.5-10.95			7	13			SM

Sınıflandırma deney sonuçlarına bakıldığında, özellikle 15 m’lerde yoğun silt tabakaları, 15-25 m’ler arası ise yer yer silt aratabakalı, kil - kum karışımı gözlenmektedir .

İlk 25 m’lik alüvyonel istif ;

Düşük plastisiteli kil (CL), siltli kum (SM) ve düşük plastisiteli Silt (ML) tabakalardan oluşmaktadır.

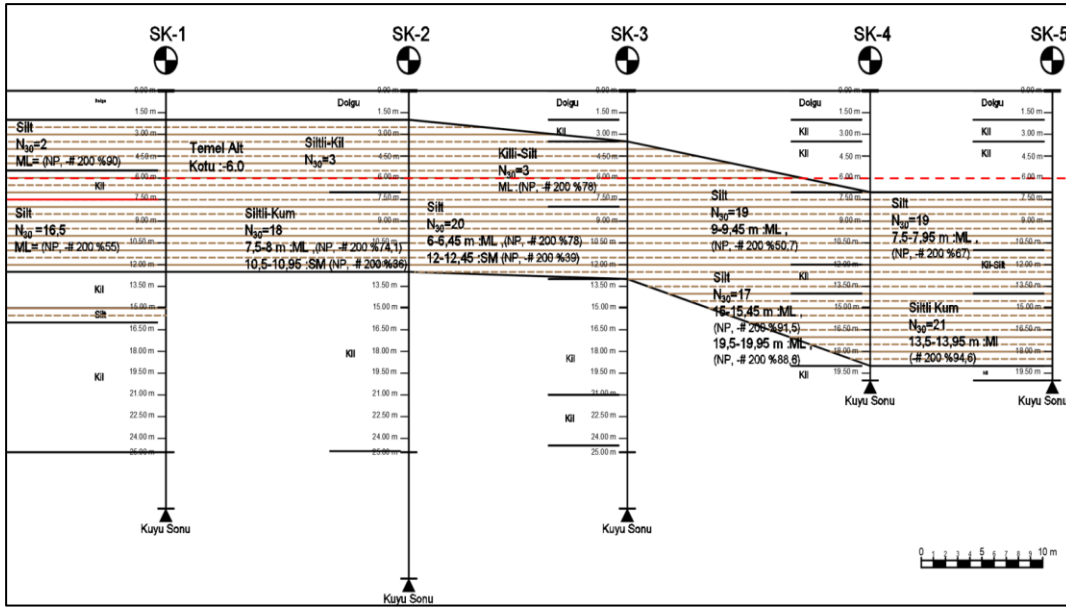
**Çizelge 4.6 : Zemin sınıflandırma deney sonuçları.**

Derinlik (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6	SK-7
3	ML	-	ML	-	-	-	-
4.5	-	-	-	-	CH	-	CL
6	CL	-	ML	CL	-	CL	-
7.5	ML	ML	-	-	ML	-	-
9	ML	-	-	ML	-	-	-
10.5	-	SM	-	-	-	-	SM
12	ML	-	SM	-	-	CL	-
13.5	CL	CH	-	-	ML	-	ML
15	ML	-	-	ML	-	ML	-
16.5	-	-	-	-	-	-	CL
18	-	-	ML	-	-	-	-
19.5	-	CL	-	ML	-	CL	-
21	CH	-	-	-	-	-	-
22.5	-	CH	-	-	-	-	-
24	ML	-	ML	-	-	-	-
25.5	-	CH	-	-	-	-	-
30	CH	-	-	-	-	-	-
31.5	-	CH	-	-	-	-	-
33	CH	-	SC	-	-	-	-
34	CH	-	-	-	-	-	-
35.5	CL	-	-	-	-	-	-
38.5	-	CL	SC	-	-	-	-
43.5	-	SC	-	-	-	-	-
46	-	CL	-	-	-	-	-
48	-	SC	-	-	-	-	-
49	-	CH	-	-	-	-	-
51	-	CL	-	-	-	-	-
56	-	CL	-	-	-	-	-
58.5	-	SC	-	-	-	-	-
63	-	CL	-	-	-	-	-
65.5	-	CH	-	-	-	-	-
67	-	CH	-	-	-	-	-
69.5	-	CH	-	-	-	-	-

TBDY (2018) Tablo16.1’de belirtilen yerel zemin sınıfları açısından inceleme alanı  $(V_s)_{30} < 180$  m/s değeri ile **ZE** zemin sınıfına girmektedir.

## 4.2 Sıvılaşma Riskinin Değerlendirmesi ve Alınacak Önlemler

İnceleme alanında yapılan sınıflandırma deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere yer yer düşük plastisiteli siltlerle karşılaşmaktadır. Silt tabakaların görüldüğü derinliklerdeki düşük SPT değerleri ve yeraltı suyu varlığı göz önüne alındığında sıvılaşma problemi ile karşılaşılabilceği değerlendirilmiştir. Aşağıdaki şekilde sondaj logları ve sınıflandırma deneylerine göre silt olarak tanımlanan zeminler A-A kesitinde (bkz. Şekil 4.1) gösterilmektedir. Bu kesit üzerinde Silt tabakalar taralı olarak gösterilmiştir(Şekil 4.4). İlave olarak SPTN<sub>30</sub> değerleri, o derinlikte var olan sınıflandırma deney sonuçları ve ince dane oranları da belirtilmiştir.



Şekil 4.4 : A-A Kesiti sıvılaşabilir silt zeminler.

TBDY (2018)'de sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi için SPT deney sonuçları üzerinden bir hesap yöntemi belirtilmiştir. Bu hesap yöntemi takip edilerek SK-1 ve SK-5 kuyularında yapılan sıvılaşma analizi sonucu kalınlığı 10m'ye varan Silt tabakalarının sıvılaşabilir olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7 - 4. 8 ve Şekil 4.4'te görüleceği üzere kalınlığı 10m civarında olan ve 20m derinliğe kadar ulaşan silt tabakaları sıvılaşabilir niteliktedir. Sıvılaşma için 1.1 güvenlik sayısı aranmaktadır (TBDY, 2018). Gerekli olan 1.1 güvenlik sayısı için DSM kolonları ile sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirmesi yapılacağı öngörülmüştür. Bu doğrultuda yatay-düşey 2m aralıklarla 80cm çapında DSM kolonlarının yapılması tasarlanmıştır. DSM kolon aralıklarının ve sıvılaşmaya olan etkilerinin hesabında

yüksek modüllü zemin-çimento karışımı kolonların sıvılaşmaya etkilerini göz önüne alan çalışmalardan yararlanılmıştır (Özsoy & Durgunoğlu, 2003).

Özsoy ve Durgunoğlu tarafından önerilen hesap yönteminde “Birim Hücre-Unit Cell” yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yöntemde deprem esnasında kolon ve etrafındaki zemin deplasmanlarının aynı olacağı kabulü ile kolon-zemin arasındaki gerilme dağılımı hesaplanmaktadır. Böyle bir durumda deprem esnasında oluşacak kayma gerilmelerinin önemli bir kısmı daha rijit olan kolonlar tarafından taşınacaktır. Bir başka deyişle zemin tarafından karşılanan çevrimsel gerilme oranının (CSR),  $S_R$  katsayısı ile azaltılması gerekmektedir.

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{[1 + (G_R - 1)\alpha_r]} \quad (4.1)$$

$S_R$ : Zeminin taşıdığı kayma gerilmesinin toplam kayma gerilmesine oranı

$G_R$ : DSM kolonu kayma modülünün , zemin kayma modülüne oranı

$\alpha_r$ : Alan değiştirme oranı

Bahsedilen yöntemle göre yapılan hesap detayları aşağıda Çizelge 4.9’da verilmiştir. 80cm 2x2m karelaajla imal edilecek DSM kolonları ile sıvılaşmaya karşı gerekli minimum güvenlik sayısı  $1.12 \geq 1.10$  olarak sağlanmaktadır. DSM kolonlarının -25 m kotuna kadar yapılacağı öngörülmüştür.





**Çizelge 4.9 : Sıvılaşmaya karşı DSM ile zemin iyileştirmesi.**

Açıklama	Değer
DSM kolonun Tek Eksenli Basınç Mukavemeti, $f_c'$ (MPa) (Axtell & Stark, 2008)	2,0
$E_{DSM}=200 \times UCS$ DSM Kolonu Elastisite Modülü, $E_{DSM}$ (MPa)	400
DSM Kolon Poisson oranı, $\nu_{DSM}$ (Han, 2015)	0,25
$G_{DSM}=E_{DSM}/(2 \times (1+\nu))$ , DSM Kayma Modülü, $G_{DSM}$ (MPa)	160
Mevcut Zemin Elastisite Modülü, $E_s$ (MPa)	10,0
Mevcut Zemin Poisson oranı, $\nu_s$	0,3
$G_s=E_s/(2 \times (1+\nu))$ , Mevcut Zemin Kayma Modülü, $G_s$ (MPa)	3,8
$G_r = G_{DSM} / G_s$ ( Kayma Modülü Oranı)	42
CRR (Sıvılaşma Analizinden)	0,08
CSR (Sıvılaşma Analizinden)	0,42
$FS_{min}$ (CRR/CSR)	0,18
$a_r=(1-S_r)/(S_r \times (G_r-1))$ ; Gereken Min. Alan Yer Değiştirme Oranı, $a_r$ (min)	0,110
<b>DSM Çapı (m)</b>	<b>0,8</b>
<b>DSM Yatay Aralığı <math>S_H</math> (m)</b>	<b>2</b>
<b>DSM Düşey Aralığı <math>S_v</math> (m)</b>	<b>2</b>
$A_{DSM}$ , DSM Toplam Alanı (m <sup>2</sup> )	0,503
DSM Kolona Bağlı Toplam Efektif Alan, $S_H \times S_v$ (m <sup>2</sup> )	4
Gerçekleşen Alan Yer Değiştirme Oranı, $a_r$	0,126
$S_R = \tau_s/\tau = (1/G_r) \times (1/[a_r + (1-a_r)/G_r])$ , (Zeminin taşıdığı kayma gerilmesinin toplam kayma gerilmesine oranı)	0,164
$CSR_{tasarım}=(S_r \times CSR)$	0,068
$FS_{yeni}=CRR/(CSR_{tasarım})$ , <b>DSM Sonrası Güvenlik Katsayısı</b>	<b>1,12</b>

### 4.3 Geoteknik Tasarım Parametreleri

Söz konusu sahanın genel zemin modeli aşağıda verilmiştir (Şekil 4.5). Bu modele göre, alüvyonel birimlerin arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına göre geoteknik tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Yüzeyden itibaren 70 m ye kadar izlenen alüvyonel çökellerin plastisite indisi- efektif kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) arasında Şekil 4.6'da verilen grafiğe göre efektif kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

#### **1. Tabaka =0-25 m arası :**

Plastisite indisi  $PI= \% 7-29$  aralığında, ortalama ise  $PI= \% 22$  olup, Şekil-4.6'da verilen grafiğe göre Efektif kayma direnci Açısı  $\phi'= 28^\circ$  kabul edilmiştir.

Efektif Mukavemet parametrelerinden Kohezyon/kayma direnci,  $c'$  değeri ise Çizelge 4.10 ve aşağıda verilen bağıntıya göre belirlenmiştir.

$$c' = \alpha \times \tan \phi' \quad (\text{Lunne vd, 1997})$$

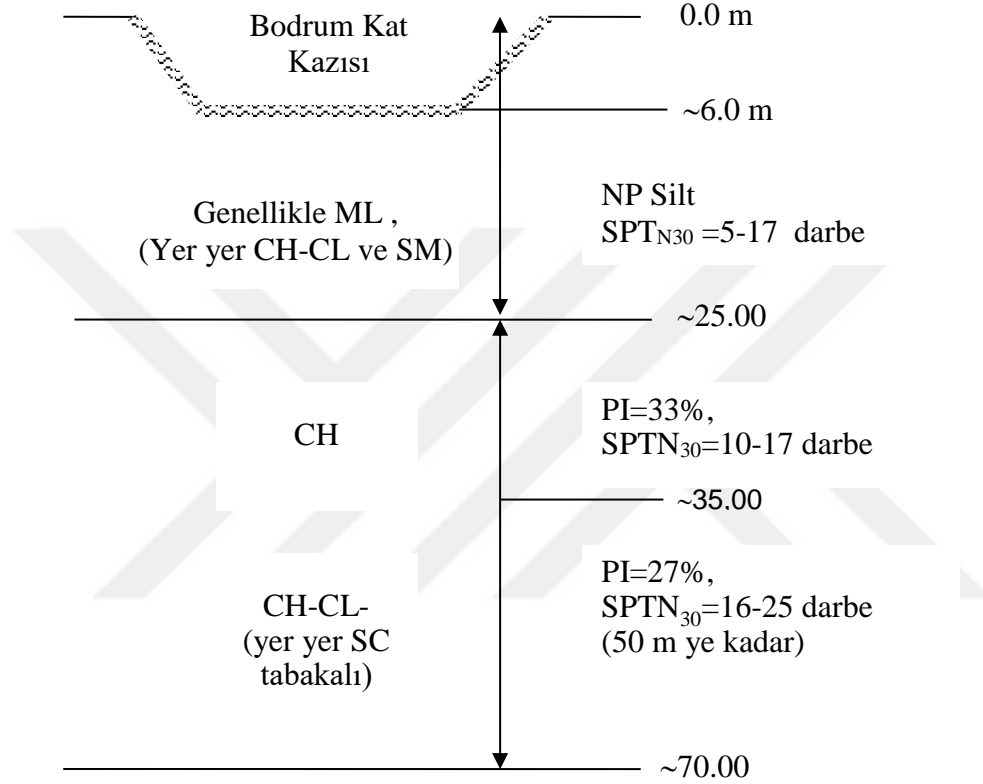
$$\phi' \quad (\text{efektif içsel sürtünme açısı değeri}) = 28^\circ$$

$$c' = 5 \times \tan 28 = 2.6 \text{ kPa}$$

0-25 m'lik alüvyonel siltli çökellerin sınıflandırma deney sonuçları ve mukavemet özelliklerine göre, efektif kayma direnci parametreleri belirlenmiştir.

Efektif Kayma Direnci/kohezyon,  $c' = 0 \text{ kPa}$

Efektif Kayma Direnci Açısı,  $\phi' = 28^\circ$



Şekil 4.5 : Genel zemin modeli.

## **2. Tabaka; 25-35 m arası:**

Plastisite İndisi  $PI = \%18-35$  aralığında, ortalama ise  $PI = \%33$  olup, Şekil-4.6'da verilen grafiğe göre Efektif Kayma Direnci Açısı  $\phi' = 25^\circ$  kabul edilmiştir.

Efektif Mukavemet parametrelerinden Kohezyon/kayma direnci,  $c'$  değeri ise Çizelge 4.10 ve aşağıda verilen bağıntıya göre belirlenmiştir.

$$c' = \alpha \times \tan \phi' \text{ (Lunne vd., 1997)}$$

$$\phi' \text{ (efektif içsel sürtünme açısı değeri)} = 25^\circ$$

$$\alpha = \text{zemin tipine bağlı (Lunne vd., 1997)}$$

$$c' = 15 \times \tan 25 = 7 \text{ kPa}$$

Bu 25-35 m lik alüvyonel killi çökellerin sınıflandırma deney sonuçları ve mukavemet özelliklerine göre, efektif kayma direnci parametreleri belirlenmiştir.

Efektif Kayma Direnci/kohezyon,  $c' = 7$  kPa

Efektif Kayma Direnci Açısı,  $\phi = 25^\circ$

### **3. Tabaka; 35-70 m arası**

Plastisite İndisi  $PI = \%15-36$  aralığında, ortalama ise  $PL = \%27$  olup, Şekil-4.6'da verilen grafiğe göre Efektif Kayma Direnci Açısı  $\phi' = 27^\circ$  kabul edilmiştir.

Efektif mukavemet parametrelerinden kohezyon/kayma direnci,  $c'$  değeri ise Çizelge 4.10 ve aşağıda verilen bağıntıya göre belirlenmiştir.

$$c' = \alpha \times \tan \phi' \text{ (Lunne vd., 1997)}$$

$$\phi' \text{ (efektif içsel sürtünme açısı değeri) } = 27^\circ$$

$$\alpha = \text{zemin tipine bağlı (Lunne vd., 1997)}$$

$$c' = 40 \times \tan 27 = 20 \text{ kPa}$$

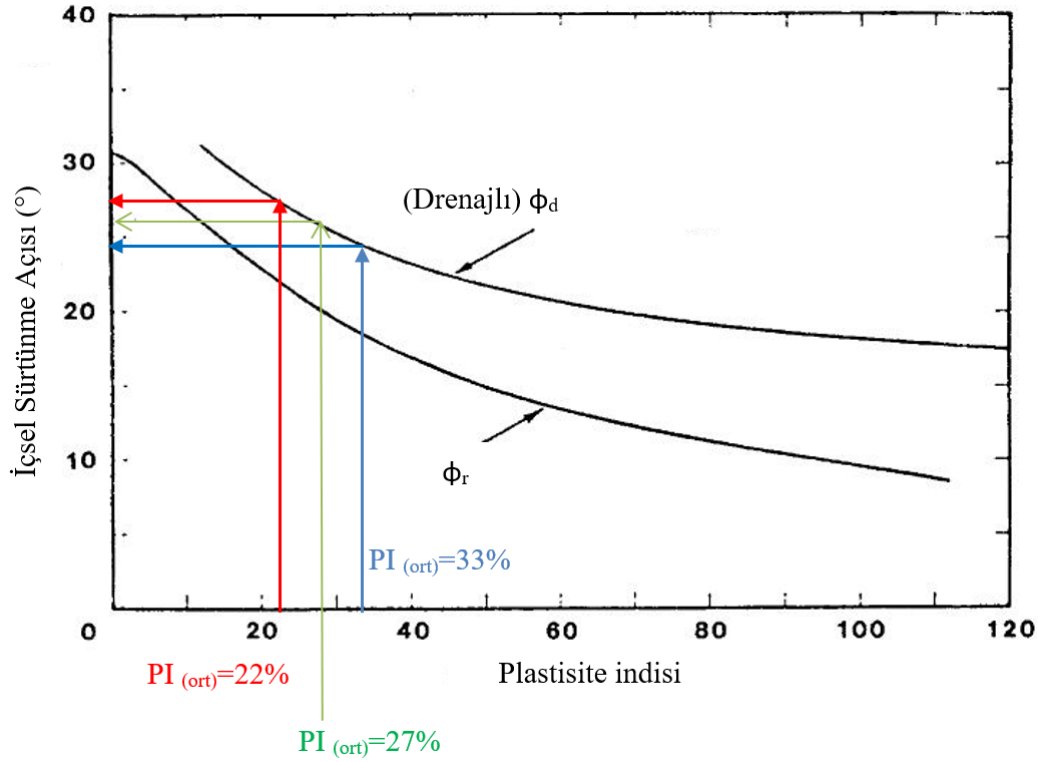
Bu 35-70 m lik alüvyonel killi çökellerin sınıflandırma deney sonuçları ve mukavemet özelliklerine göre, efektif kayma direnci parametreleri belirlenmiştir.

Efektif Kayma Direnci/kohezyon,  $c' = 20$  kPa

Efektif Kayma Direnci Açısı,  $\phi = 27^\circ$

**Çizelge 4.10** : Değişik zemin türlerinde  $\alpha$  faktörünün olası değerleri (Lunne vd, 1997).

Zemin Cinsi	$\alpha$	$\tan \phi'$
Yumuşak Kil	5-10	0,35-0,45
Orta katı Kil	<b>10-20</b>	0,40-0,55
Katı kil	<b>20-50</b>	0,50-0,60
Yumuşak Silt	<b>0-5</b>	0,50-0,60
Orta katı Silt	5-15	0,55-0,65
Katı Silt	15-30	0,60-0,70



**Şekil 4.6 :** Killerde efektif kayma direnci açısı ile plastisite indisi (PI) arasındaki ilişki (Gibson, 1953) .

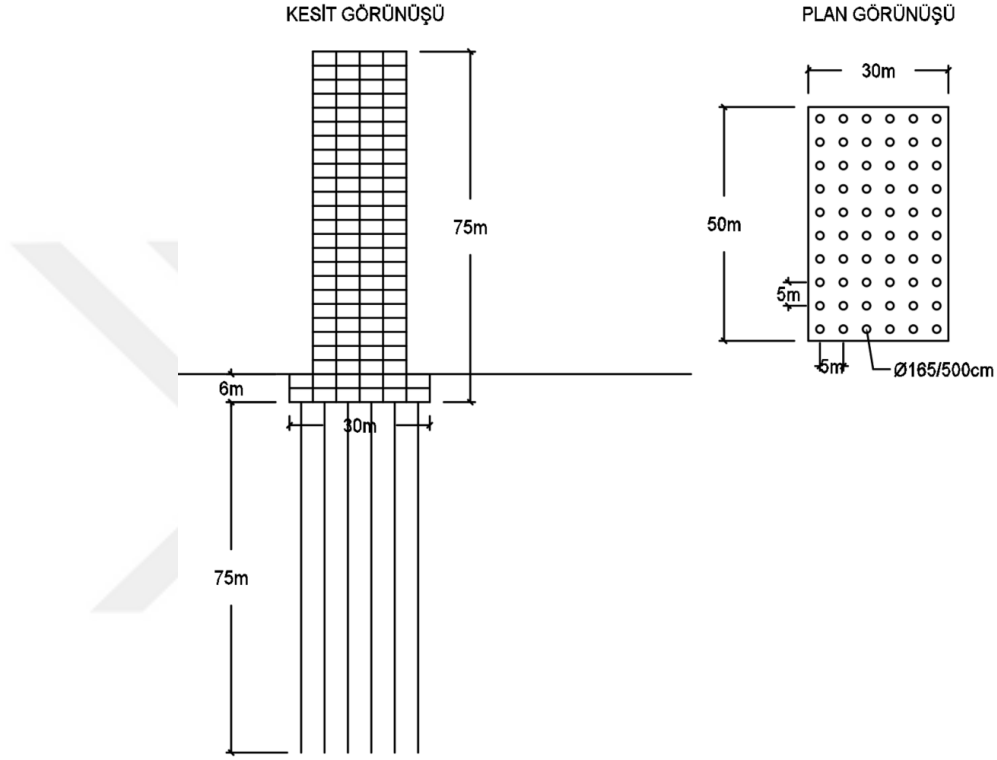
Proje alanında yapılan saha ve laboratuvar deney sonuçlarına göre, idealize zemin profili ve tasarıma esas parametreler Çizelge 4.11 'de özetlenmiştir. 6.0-25.0 m arasındaki zemin tabakasında DSM kolonları ile yapılan iyileştirme sonucunda alan değiştirme oranı üzerinden yapılan hesaplar ile iyileştirme sonrası elastisite modülünün 35 MPa olacağı hesaplanmıştır ve analizlerde bu değer kullanılmıştır.

**Çizelge 4.11 :** Tasarım için kullanılan zemin parametreleri

Litoloji	Derinlik (m)	Efektif Kayma Direnci Parametreleri		$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü, $E_m$ (MPa)	Poisson Oranı, $\nu$
		$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)			
SM-ML	0.0-6.0	-	25	16	0-5 (5)	0.30
ML (yer yer SM ve CL-CH)	6.0-25.0	-	28	18	10-15 (35 ıslah sonrası)	0.30
CH	25.0-35.0	7	25	18	10-15 (15)	0.30
CL-CH	35.0-70.0	20	27	19	20-50 (50)	0.25

#### 4.4 Proje Bilgileri ve Planlanan Yapı

İnceleme alanına ait zemin profili gerçek saha çalışmalarından hareketle oluşturulmuştur ancak bu alan üzerinde yapılacak yapıya dair belirli kabuller yapılmıştır. Proje alanında 1 Bodrum + 24 Normal kattan oluşan 75m yüksekliğinde bir yüksek katlı yapı inşa edileceği kabul edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Planlanan yapı kesit ve plan görünüşleri.

Planlanan yapı için taban gerilmesi kat başına 12.5 kPa ve temel için de 50 kPa alınarak 362,5 kPa olarak hesaplanmıştır. Toplam bina yükü ise  $30 \times 50 \times 362,5 = 543.750$  kN = 54.375 ton olarak belirlenmiştir. 30x50 boyutlarındaki temel içerisine 5m yatay-düşey aralıklarla 60 adet 165cm çapında kazık yerleşimi yapılmıştır. Kazık başına gelen yük  $54375/60 = 906$  ton olarak hesaplanmıştır. Kazık boyu bu yükü karşılayacak şekilde 75m uzunluğunda olarak hesaplanmıştır.

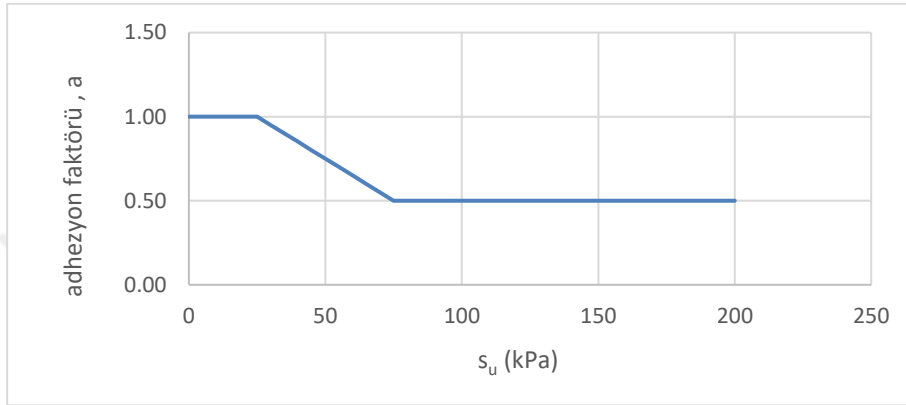
Kazık kapasitesi hesapları Alfa metodu denilen yöntemle yapılmıştır. Bu yöntemde birim çevre sürtünmesi, yapışma katsayısı  $\alpha$  ile drenajsız kayma direncinin çarpımını ile elde edilmektedir.

$$f_s = \alpha \times S_u \quad (4.2)$$

Dört farklı yöntemle kazık kapasite hesabı yapılmış elde edilen sonuçların ortalaması kullanılmıştır. Bu hesaplama yöntemleri genel olarak yapışma katsayısının hesabı açısından ayrışmaktadır.

Kullanılan yöntemler:

- Yapışma katsayısının direkt drenajsız kayma direnci üzerinden belirlendiği API (1987) yöntemi (Şekil 4.8) :



Şekil 4.8 : Adezyon faktörü (α) -s<sub>u</sub> ilişkisi (API, 1987).

- α katsayısının drenajsız kayma mukavemeti s<sub>u</sub> ve o derinlikteki efektif gerilme değerine göre hesaplandığı API (1993) ve Randolph & Murphy (1985) yöntemleri.

Randolph & Murphy (1985) α katsayısının hesabı için aşağıdaki formülleri önermektedir.

$$\alpha = 0,5 \left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)^{-0,5}, \left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \leq 1 \text{ ise} \right) \quad (4.3)$$

$$\alpha = 0,5 \left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \right)^{-0,25}, \left( \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} > 1 \text{ ise} \right)$$

API (1993) yönteminde birim çeper sürtünmesi Denklem 4.4'deki formüllerden daha büyük değer verene göre hesaplanmaktadır.

$$\tau_f = 0,5(S_u \sigma'_{v0})^{0,5}$$

$$\tau_f = 0,5(S_u^{0,75} \sigma'_{v0})^{0,25} \quad (4.4)$$

- $s_u$  ve efektif gerilme değerine ilaveten kazık boyu etkisinin de göz önüne alındığı (Kolk & Velde, 1996) yöntemde birim çeper sürtünmesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\tau_f = 0,55 S_u^{0,7} \sigma'_{v0}{}^{0,3} \left( \frac{40}{L/D} \right)^{0,2} \quad (4.5)$$

Belirtilen yöntemlere göre yapılan hesap sonucunda izin verilebilir toplam kazık kapasitesi:

**L=75m,  $\Phi$ 165cm'lik kazık için 923 ton (>906 ton) olarak hesaplanmıştır.**

Hesap detayları EK B'de verilmiştir. Hesaplamalarda güvenlik sayısı değeri uç direnci için 3, çeper sürtünmesi için 2 alınmıştır.

#### **4.5 Deprem Hareketlerinin Seçilmesi ve Dönüştürülmesi**

Yeni deprem yönetmeliğinde söz konusu saha İzmir ili, Bayraklı ilçesi civarında yer almaktadır. Bu bölge için yapılacak deprem kayıtları seçiminde fay uzaklığı, kaynak mekanizması ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak seçim yapılmıştır. Ayrıca söz konusu saha civarı için Bayraklı belediyesi tarafından yayınlanan “Yeni Kent Merkezinde (Bayraklı Salhane/Turan bölgesi-Alsancak Liman arkası kesimi ve Salhane bölgesi) yapılacak yüksek binalar için zemin geoteknik ve yapı/deprem mühendisliği proje ve raporlarında uyulması gereken teknik önermeler” isimli bir rapor da bulunmaktadır. Bu rapor ve TBDY (2018) birlikte değerlendirilerek deprem kayıtlarının seçimi ve dönüşümü sağlanmıştır.

##### **4.5.1 Deprem hareketlerinin seçilmesi**

TBDY (2018)'de belirtildiği üzere yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri kapsamında gerekli olan 11 çift deprem hareketinin seçimi için PEER NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center) veri tabanı kullanılmıştır. Bu veri tabanına <https://ngawest2.berkeley.edu> adresi üzerinden ulaşılmaktadır. Bu veri tabanı içerisinde kullanıcının sisteme yüklediği tasarım spektrumuna uyum sağlayacak şekilde deprem kayıtları aranabilmekte ve uyum sağlamak için gereken ölçekleme katsayıları belirtilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında deprem yönetmeliğinden elde edilen tasarım spektrumu sisteme yüklenmiş ve bu tasarım spektrumu ile 0,5-2 ölçekleme katsayısı aralığında eşleşen kayıtlar aranmıştır (Şekil 4.9). PEER veri

tabanından elde edilen kayıtlar arasından fay mekanizması, deprem odağına - faya olan mesafe ve moment büyüklüklerine göre 11 adedi seçilmiştir.

The screenshot displays the PEER NGA search interface, which is divided into several sections:

- Search:** This section contains a note: "These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated." Below this, there are fields for "Record Characteristics" (RSN(s), Event Name, Station Name) and "Search Parameters" (Fault Type: All Types, Magnitude: 6,7.5, R\_JB(km): 1,55, R\_rup(km): 1,55, Vs30(m/s): 180,360, D5-95(sec), Pulse: Any Record). There are also "Additional Characteristics" (Max No. Records: (<=100), Initial ScaleFactor: 0,5,2).
- Suite:** This section includes "Spectral Ordinate" (H1), "Damping Ratio" (5%), and "Suite Average" (Arithmetic).
- Scaling:** This section includes "Scaling Method" (Minimize MSE) and a note: "MSE = Computed Weighted Mean Squared Error of record, and suite average, wrt target spectrum."
- Weight Function:** This section includes "Period Points" (0,68,5,1) and "Weights" (1,1). Below this is a graph showing the weight function W versus Period (sec) from 0.00 to 10.00. The graph shows a blue shaded area under a curve that starts at 0.68 and ends at 5.1 seconds, with a peak weight of 1.1.

Şekil 4.9 :PEER NGA veri tabanı deprem kaydı arama kriterleri.

Deprem kayıtlarının seçiminde yukarıda belirtilen kurallar aşağıdaki gibi uygulanmıştır:

- 11 Çift deprem kaydı seçilmiştir.
- Deprem hareketlerinin seçiminde PEER NGA veri bankası kullanılmıştır.
- Moment büyüklüğü 6,2-7,2 aralığında olan, ZD zemin sınıfı deprem yer hareketleri seçilmiştir. TBDY Bölüm 16.5.2.3'de etkileşim analizleri için kullanılacak modelleme ile ilgili esaslara yer verilmiştir. Bu esaslar ışığında taban kayanın çok derinde olması durumunda model sınırının zemin sınıfı ZC veya ZD olan zemin tabakası ile sonlandırılabilceği belirtilmektedir. Söz konusu proje sahası ve civarında  $V_s > 760$  m/s olarak tanımlanan anakayanın 300 m derinlikten sonra başladığı, Sismik ana kayanın ise 1200 m derinlikten itibaren başladığı yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkartılmıştır (Akgün, ve diğerleri, 2015). Dolayısıyla taban kayanın çok derinde olması nedeniyle zemin modeli ZD zemin sınıfı ile bitirilmiştir. Bu amaçla  $V_s = 180-360$  m/sn olan deprem hareketleri seçilmiştir.
- PEER NGA web sitesine ZD zemin sınıfı ve DD-1 deprem düzeyi için yönetmelikte tanımlanan tasarım spektrumu yüklenmiştir. Bu tasarım



spektrumu ile spektral uyuşum sağlamak adına ölçekleme katsayısı 0,5-2 aralığında değişecek kayıtlar veri tabanında taranmıştır.

- Seçilen kayıtların faya en yakın mesafesi 1.47-30.81 km arasında değişmektedir.

Seçilen deprem kayıtları Çizelge 4.12’de gösterilmektedir.

#### 4.5.2 Deprem hareketlerinin dönüştürülmesi

TBDY (2018)’de yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri kapsamında kullanılacak deprem kayıtlarının tasarım spektrumuna “spektral uyuşum” sağlanacak şekilde dönüştürülmesi gerektiği belirtilmektedir.

Bu tez kapsamında analiz sürelerinin uzunluğu ve bilgisayar kapasitesi nedeniyle seçilen 11 adet yer hareketinden iki adeti göz önüne alınmıştır. Bu iki kayıt Çizelge 4.12’de gösterilen “Gazli\_ USSR” deprem kaydının **“GAZ090”** bileşeni ve “Christchurch\_ New Zealand” deprem kaydının **“SHLCS50E”** bileşenidir. Bu iki deprem kaydının seçilmesinde toplamda 12 adet dinamik analiz (bkz Bölüm 4.6) yapılması nedeniyle kayıt sürelerinin kısmen daha az olması etkili olmuştur.

GAZ090 ve SHLCS50E kayıtları TBDY (2018)’de belirtildiği üzere tasarım spektrumu ise spektral uyuşum sağlayacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Bu dönüşüm çalışması “SeismoMatch” yazılımının akademik sürümü kullanılarak yapılmıştır.

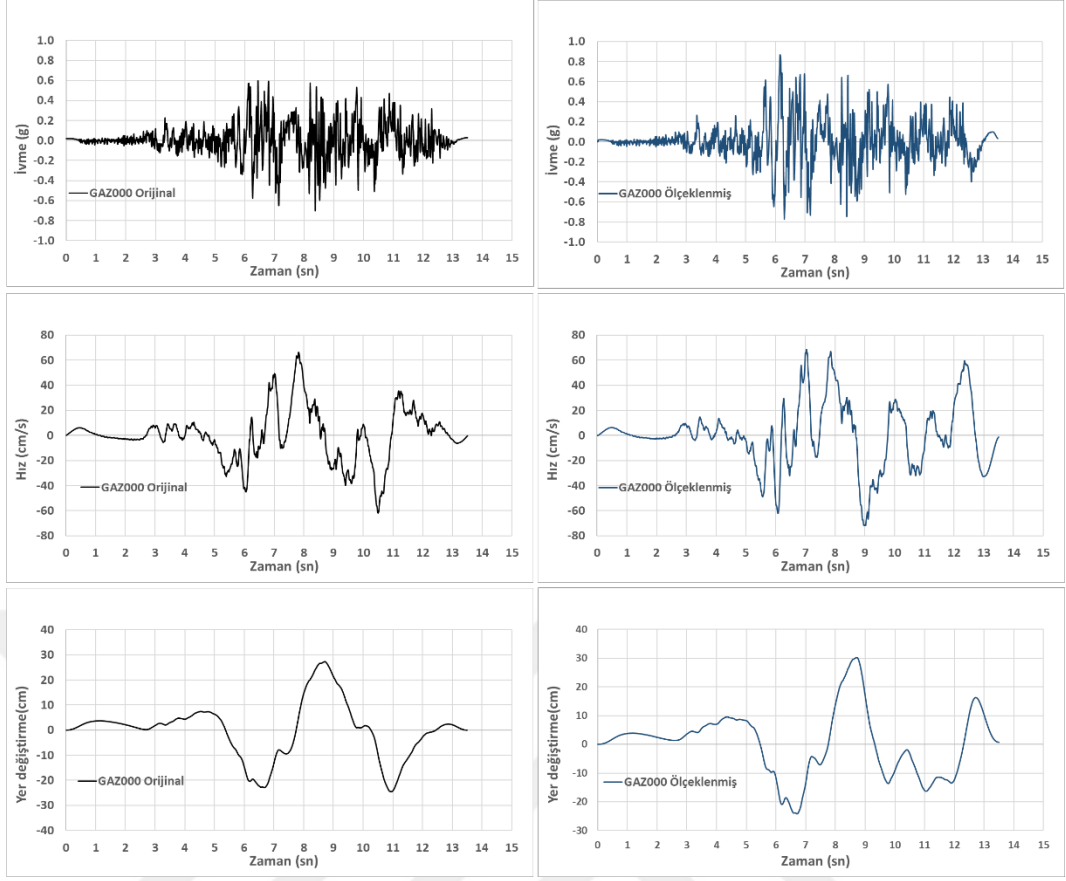
Deprem kayıtlarının dönüştürülmesi aşağıdaki gibi yapılmıştır:

- Gazli\_ USSR ve Christchurch\_ New Zealand kayıtlarının her iki yatay bileşeni de “SeismoMatch” yazılımı ile dönüştürülmüştür.
- Bu spektral uyuşum için gerekli olan tasarım spektrumu söz konusu sahanın koordinatları ile //tdth.afad.gov.tr/\_üzerinden, ZD zemin sınıfı ve DD-1 deprem düzeyine göre elde edilmiştir.
- Dönüştürülen deprem kayıtlarının spektrum ortalamalarının tasarım spektrumunda karşı gelen ivme değerinden daha küçük olmaması sağlanmıştır.

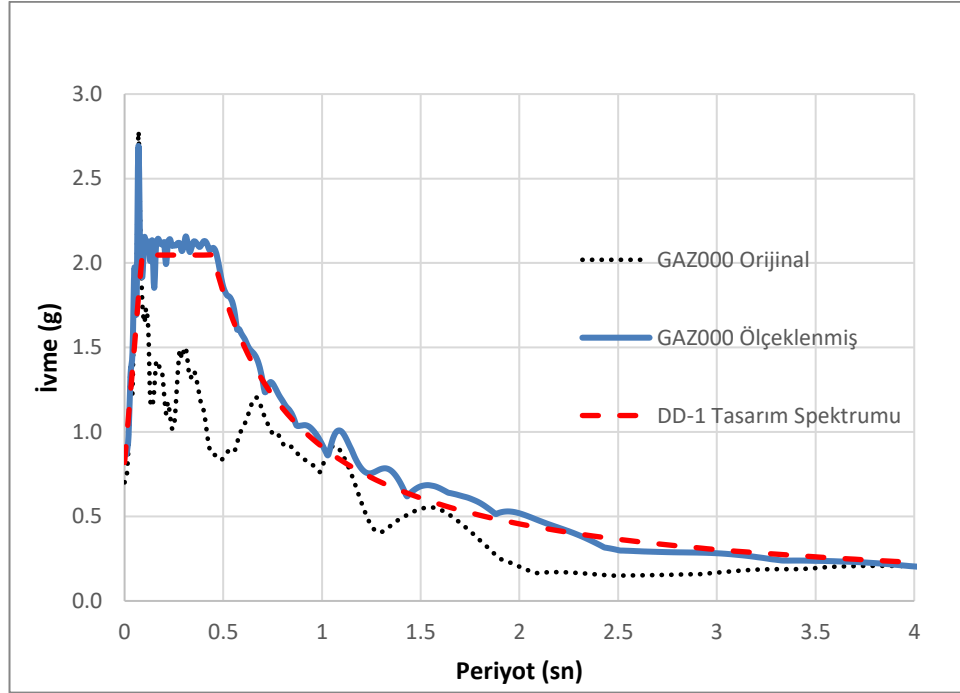
Dönüştürülen deprem kayıtlarına ait grafikler Şekil 4.10-4.18’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.12 : Seçilen deprem kayıtları.**

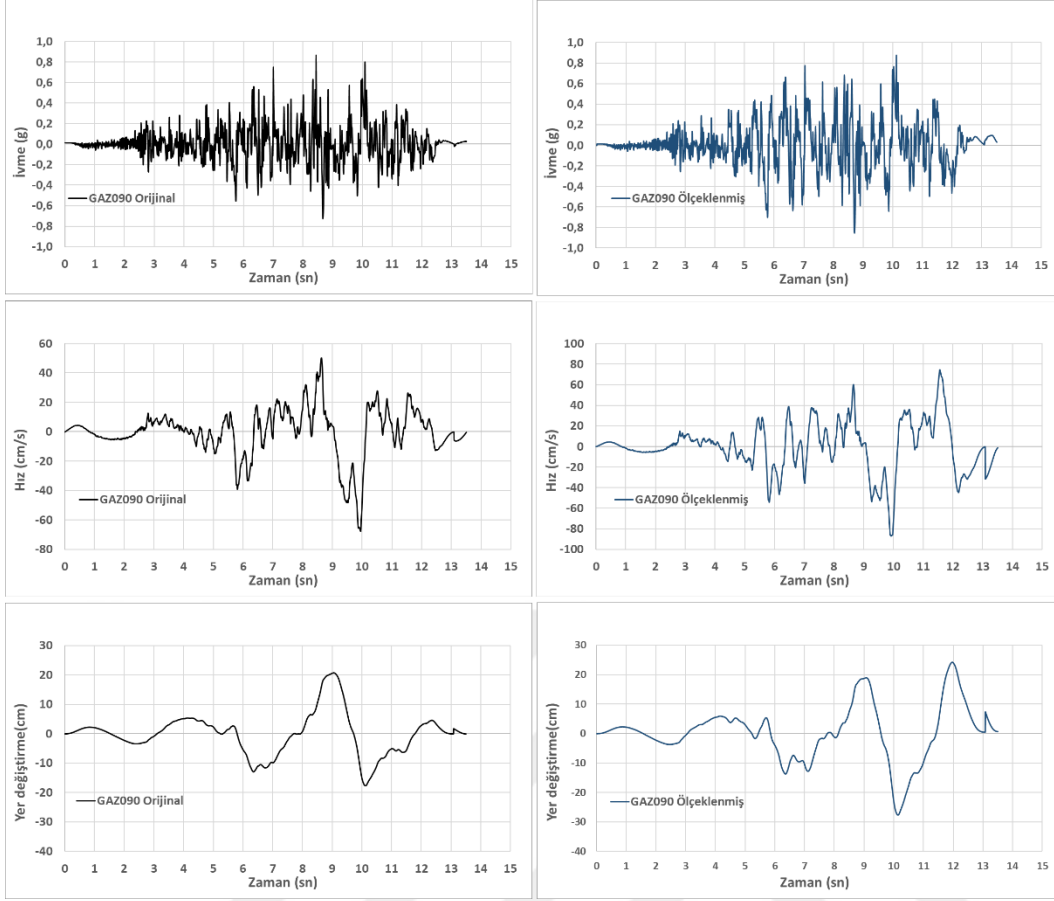
S.No	Deprem Adı/Yılı	Büyüklik	Süre (sn)	Fay Mekanizması	İstasyon Adı	Yatay Bileşen-1	Yatay Bileşen-2	Deprem odağına uzaklık (km)	Faya en yakın mesafe (km)
<b>1</b>	<b>"Gazli_USSR" (1976)</b>	<b>6.8</b>	<b>13.5</b>	<b>Ters</b>	<b>"Karakyr"</b>	<b>GAZ000</b>	<b><u>GAZ090</u></b>	<b>3.92</b>	<b>5.46</b>
<b>2</b>	<b>"Christchurch_New Zealand" (2011)</b>	<b>6.2</b>	<b>22</b>	<b>Ters Oblik</b>	<b>"Shirley Library"</b>	<b>SHLCS40W</b>	<b><u>SHLCS50E</u></b>	<b>5.58</b>	<b>5.6</b>
3	"Imperial Valley-06" (1979)	6.53	39	Doğrultu atımlı	"El Centro Array #5"	H-E05140	E05230	1.76	3.95
4	"Imperial Valley-06" (1979)	6.53	39	Doğrultu atımlı	"El Centro Differential Array"	EDA270	EDA360	5.09	5.09
5	"Loma Prieta" (1989)	6.93	60	Ters Oblik	"Palo Alto - 1900 Embarc."	PAE055	PAE325	30.56	30.81
6	"Northridge-01" (1994)	6.69	30	Ters	"Beverly Hills - 14145 Mulhol"	MUL009	MUL279	9.44	17.15
7	"Kobe_Japan" (1995)	6.9	41	Doğrultu atımlı	"Takatori"	TAK000	TAK090	1.46	1.47
8	"Duzce_Turkey" (1999)	7.14	55.8	Doğrultu atımlı	"Bolu"	BOL000	BOL090	12.02	12.04
9	"Iwate_Japan" (2008)	6.9	120	Ters	"Furukawa Osaki City"	44B91NS	44B91EW	31.07	31.08
10	"El Mayor-Cucupah_Mexico" (2010)	7.2	100	Doğrultu atımlı	"Michoacan de Ocampo"	MDO000	MDO090	13.21	15.91
11	"Darfield_New Zealand" (2010)	7	60	Doğrultu atımlı	"HORC"	HORCN18E	HORCS72E	7.29	7.29



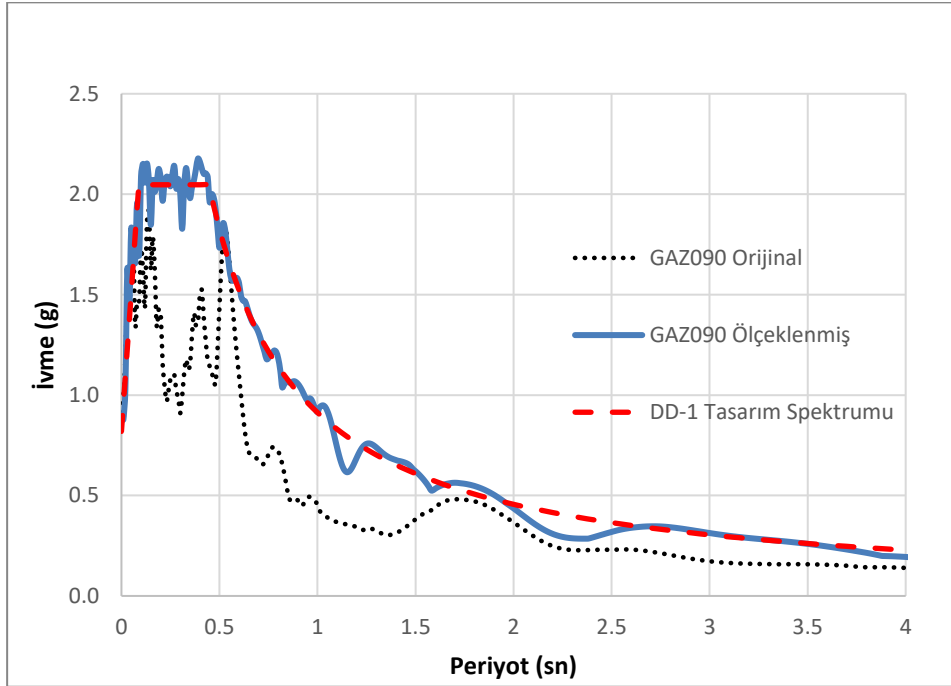
**Şekil 4.10 :** Gazli\_ USSR Depremi Gaz000 Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri



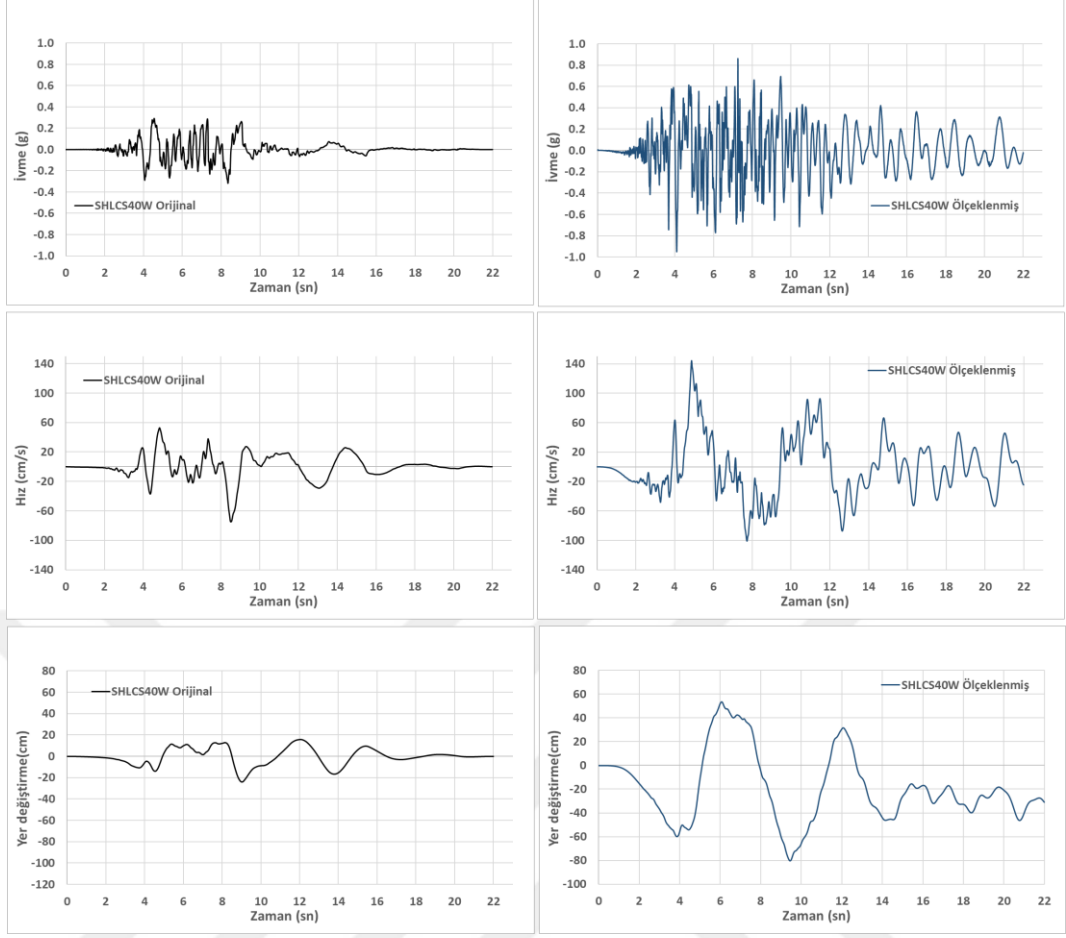
**Şekil 4.11 :** Gazli\_ USSR Depremi Gaz000 Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler.



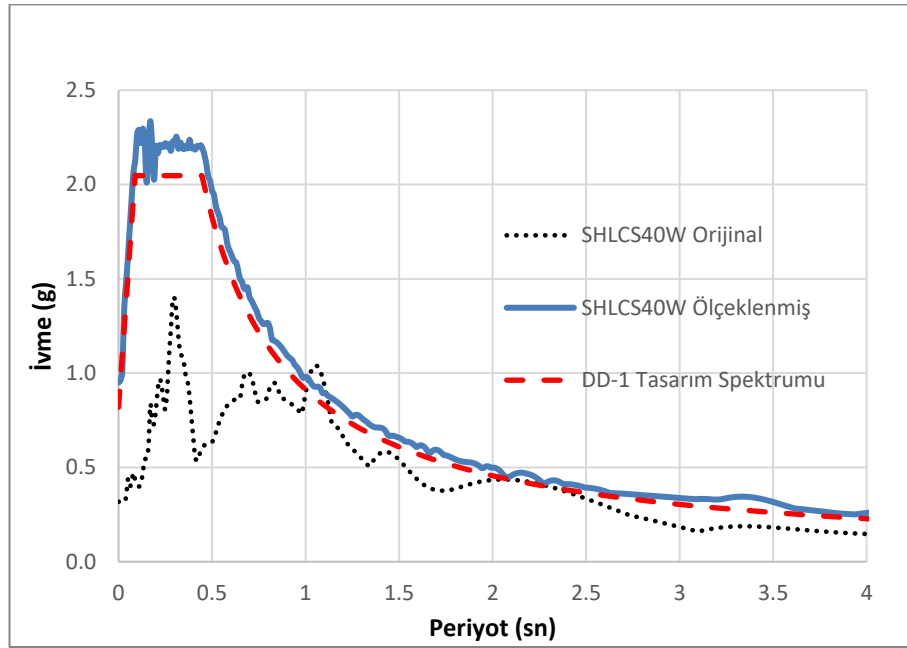
Şekil 4.12 : Gazlı\_ USSR Depremi Gaz090 (**Analizde kullanılan**) Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri



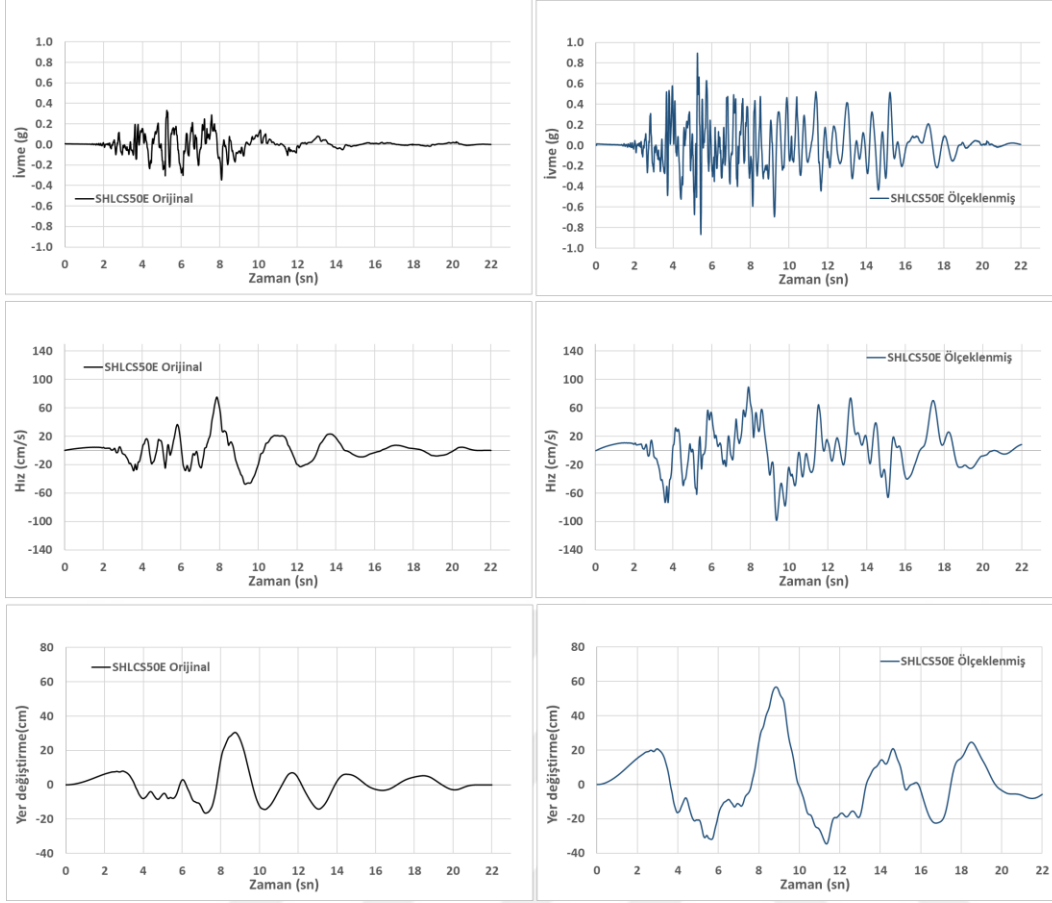
Şekil 4.13 : Gazlı\_ USSR Depremi Gaz090 Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler.



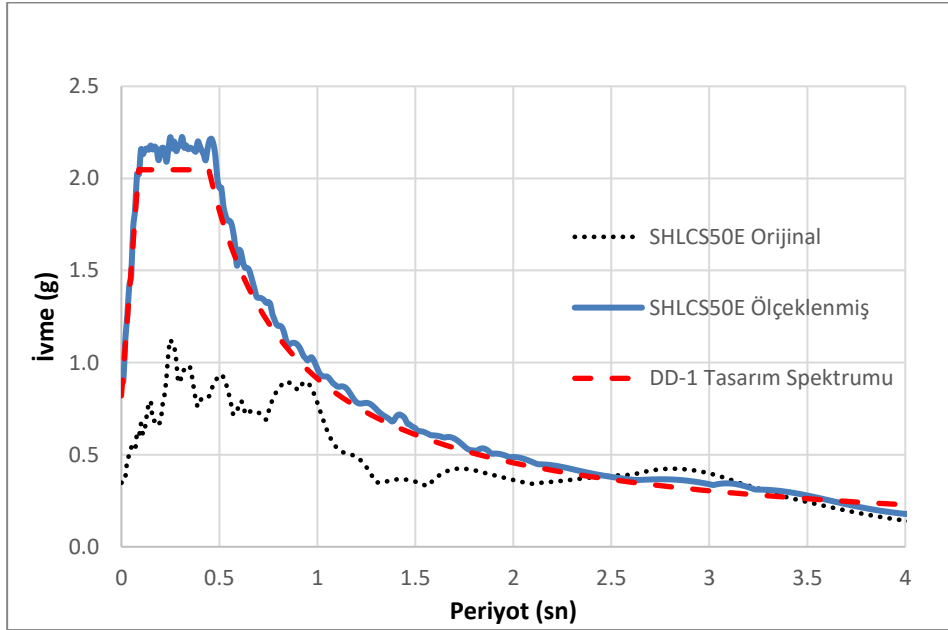
**şekil 4.14 :** Christchurch\_ New Zealand Depremi SHLCS40W Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri.



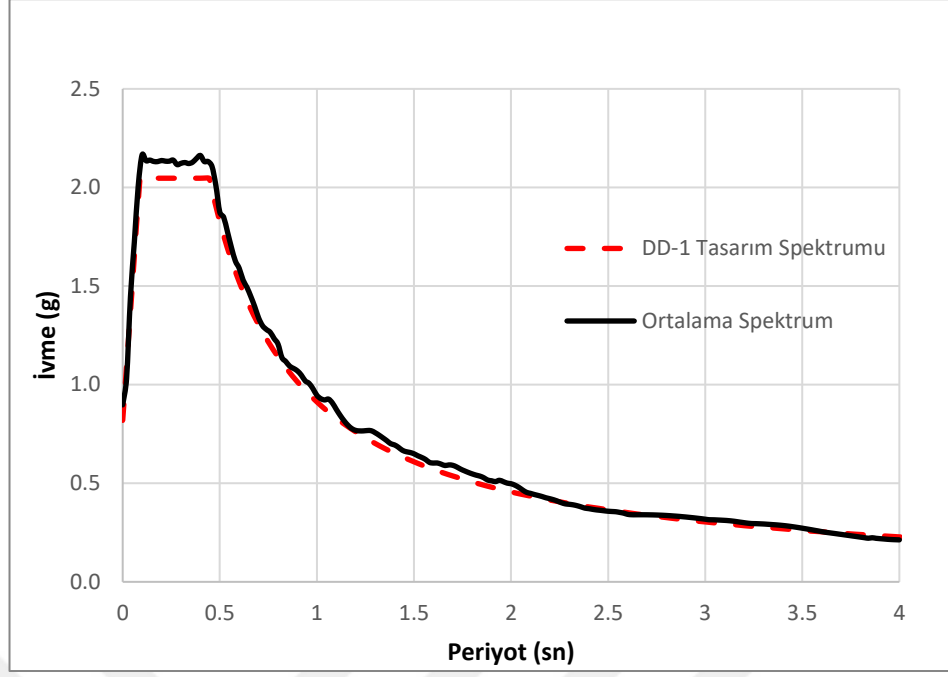
**şekil 4.15 :** Christchurch\_ New Zealand Depremi SHLCS40W Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler.



**şekil 4.16 :** Christchurch\_ New Zealand Depremi SHLCS50E (Analizde kullanılan) Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyi için dönüştürülmüş ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri.



**şekil 4.17 :** Christchurch\_ New Zealand Depremi SHLCS50E Bileşenine ait orijinal ve DD-1 düzeyine göre dönüştürülmüş spektral ivmeler.



**Şekil 4.18 :** Gazli\_ USSR ve Christchurch\_ New Zealand Depremlerine ait ortalama spektrum ve DD-1 düzeyine göre tasarım spektrumu.

#### 4.6 Analiz Yaklaşımı ve Model Bilgileri

Bu tez kapsamında iki boyutlu Plaxis (v2018) yazılımı ile yapı-kazık-zemin etkileşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde Çizelge 4.12’de gösterilen yer hareketleri bileşenlerinden iki adedi (GAZ090 ve SHLCS50E) sonlu elemanlar modeli tabanından tanımlanmıştır.

##### 4.6.1 Analiz ve model bilgileri

Etkileşim analizleri ile ilgili iki ayrı ana model oluşturulmuştur (Şekil 4.19). Bu modeller daha sonra kendi aralarında 3 alt modele ayrılmışlardır (Şekil 4.20 ve Şekil 4.21).

Şekil 4.19’da görüleceği gibi Model-1’de tek bir kazıklı yapı bulunmaktadır. Buna karşın yüksek katlı yapının bir benzerinin temel genişliği kadar mesafe sonrasında olması durumunda analiz sonuçlarının nasıl değişeceği Model-2 ile araştırılmıştır. Model-2 bu bağlamda iki yüksek katlı yapının aralarında temel genişliği kadar mesafe bulunması durumunda yapılan analizdir.

Her iki model: 2 adet Kinematik etkileşim + 1 adet iki boyutlu ortak sistem modeli olmak üzere 3 alt modele ayrılmıştır.

Kinematik etkileşim analizi için 2 alt model:

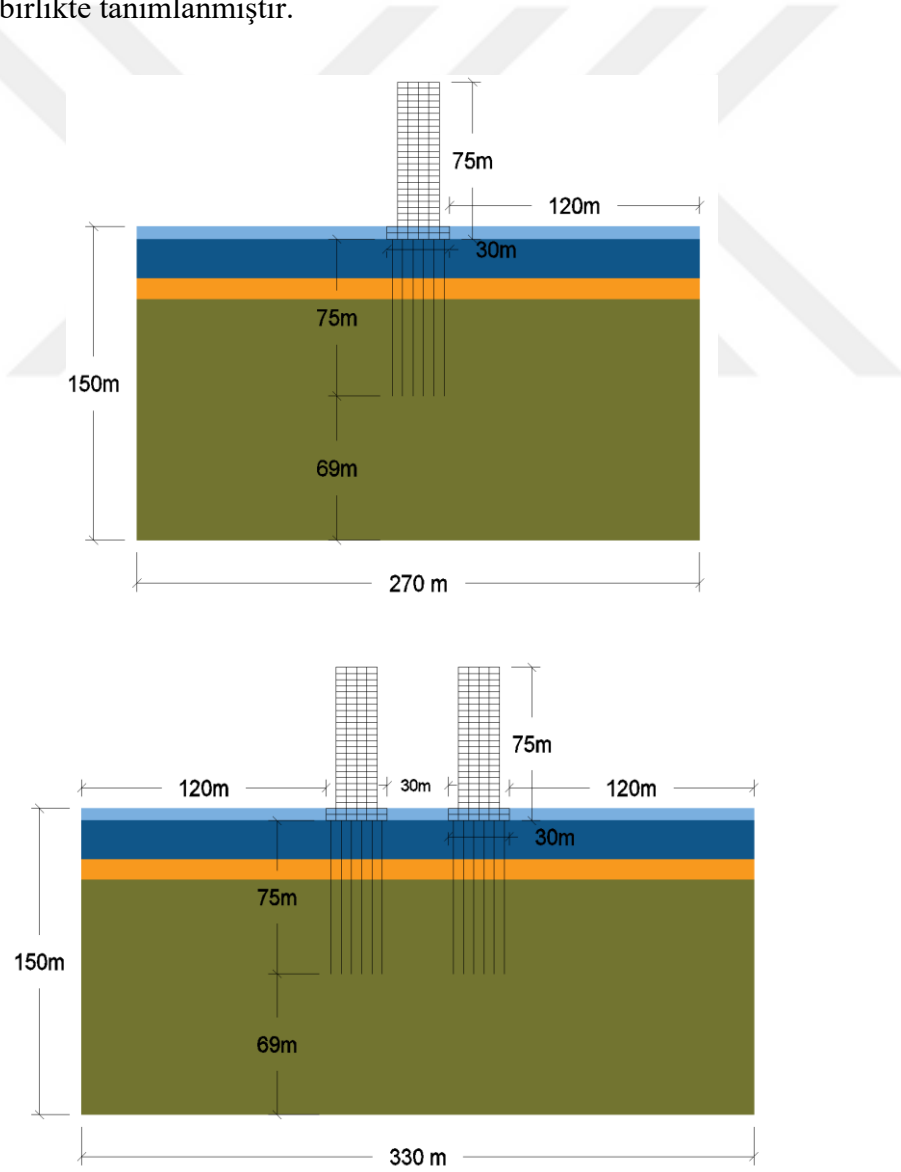
- Kütlesiz-sonsuz rijit Temel + Kazık+Zemin
- Kütlesiz-sonsuz rijit Temel + Kazık+Zemin+Bina Yüğü

şeklinde oluşturulmuştur. Kinematik etkileşim analizlerinde üstyapı modellenmemiştir.

Üçüncü alt model ise:

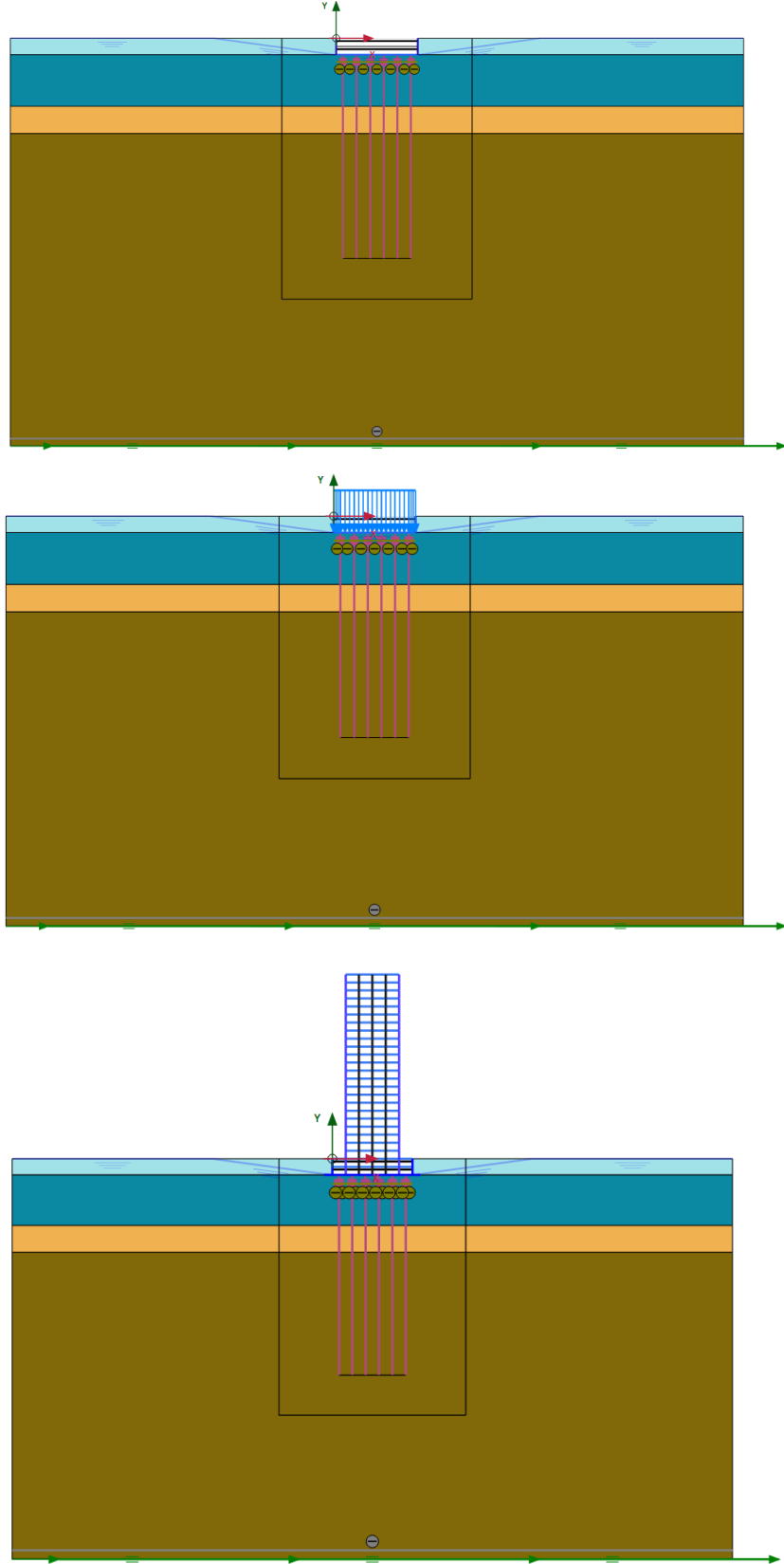
- Üstyapı+Temel+Kazık+Zemin'den oluşan 2 boyutlu ortak sistem modeli

olarak oluşturulmuştur. Bu modelde üstyapı-temel-kazık elemanları rijitlikleri ve kütleleri ile birlikte tanımlanmıştır.

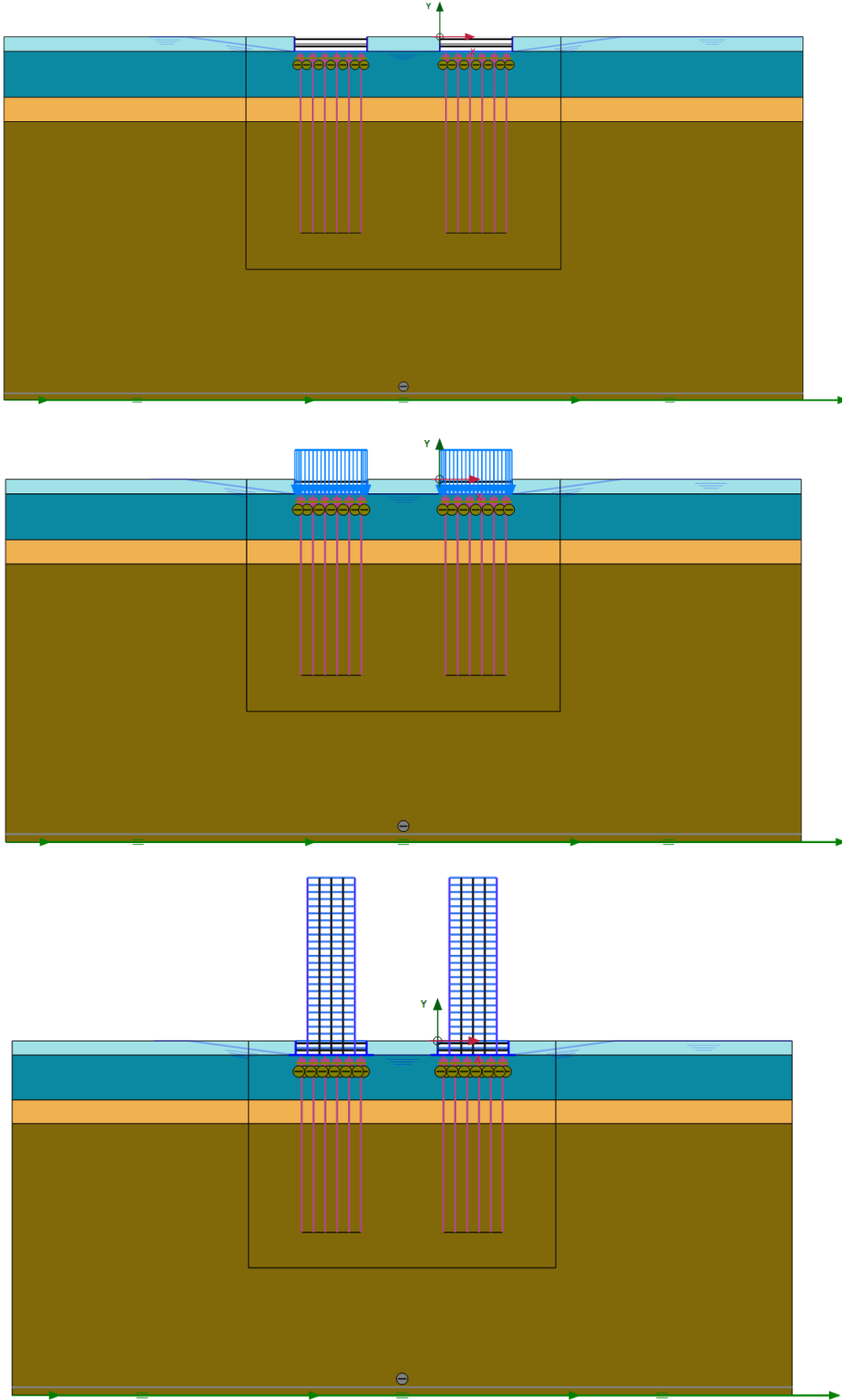


Şekil 4.19 : Sonlu elemanlar model boyutları: Model-1 (üstte), Model-2 (Altta).





**Şekil 4.20 :** Model-1 Analiz görünüşleri : 1-1 Kütlesiz sonsuz rijit temel alt modeli (Üstte), 1-2 Kütlesiz sonsuz rijit temel+Bina yükü alt modeli (Ortada) , 1-3 Üstyapı+Temel+Kazık+Zeminden oluşan 2 boyutlu ortak sistem alt modeli (Altta).



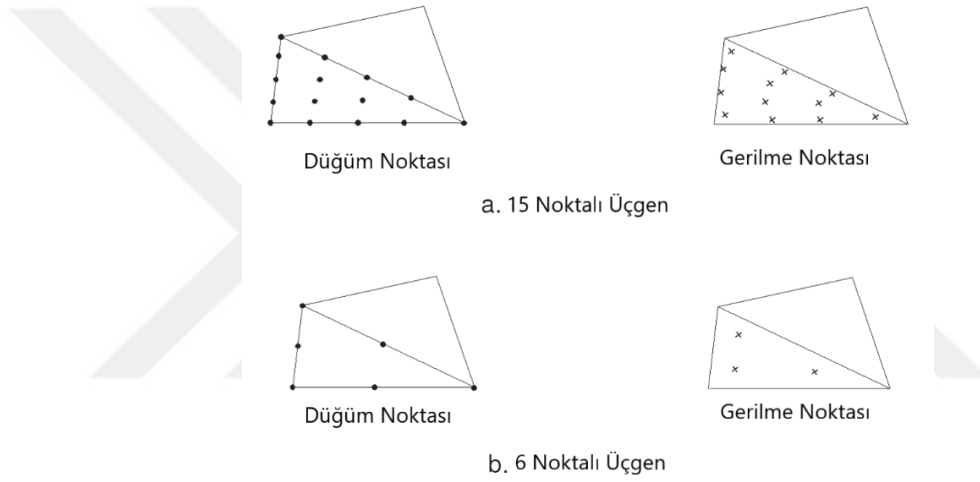
**Şekil 4.21** : Model-2 Analiz görüşleri : 2-1 Kütlesiz sonsuz rijit temel alt modeli (Üstte), 2-2 Kütlesiz sonsuz rijit temel+Bina yükü alt modeli (Ortada) , 2-3 Üstyapı+Temel+Kazık+Zeminden oluşan 2 boyutlu ortak sistem alt modeli (Altta).

## 4.6.2 Sonlu elemanlar modeli özellikleri

### 4.6.2.1 Model boyutları ve eleman sayısı

Sonlu elemanlar modelinde model boyutları yatayda temel sınırından itibaren temel genişliğinin dört katı (4B), düşeyde ise beş katı (5B) mesafe uzaklıkta olacak şekilde düzenlenmiştir. Model sınırlarında deprem dalgalarının sonlu elemanlar modeli içerisine tekrar yayılmasını önleyecek geçirgen sınır koşulları kullanılmıştır.

Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımında zemin ortamının tanımlanmasında 15 noktalı ve 6 noktalı üçgen elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 4.22). Sonlu elemanlar ağı modelin üçgen elemanlara bölünmesi ile oluşturulmaktadır.



**Şekil 4.22 :** Zemin elemanlardaki düğüm ve gerilme noktaları (Plaxis, 2019)

Dinamik analizler açısından sonlu elemanlar modelinde dalga yayılımının doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için üçgen eleman boyutlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Kuhlemeyer & Lysmer (1973) bir dinamik analizlerde sonlu elemanlar modelinde ortalama eleman boyutunun deprem hareketinin maksimum frekans içeriğine göre tanımlanan dalga boyunun 1/8'inden küçük olması gerektiğini belirtmiştir.

$$\text{Ortalama Eleman Boyu} \leq \frac{\lambda}{8} = \frac{v_{s,min}}{8f_{max}} \quad (4.6)$$

$f_{max}$  : Fourier spektrumundan elde edilen deprem kaydının maksimum frekans içeriği

$v_{s,min}$  : Tüm zemin tabakaları açısından en küçük kayma dalgası hızı

$\lambda$  : Dalga boyu

Tez kapsamında kullanılan deprem kayıtları için  $f_{max}$  değeri 10 Hz. civarındadır. En düşük Vs hızı ise 1. tabakada (0-6m) için 175 m/s mertebelerindedir. Denklem 4.6 takip edilerek yapılan hesaplama sonucunda kurulan sonlu elemanlar modelinde ortalama eleman boyu  $\leq 2.18$  m olması gerektiği hesaplanmıştır. Bu eleman boyunun sağlanacağı şekilde sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan iki boyutlu sonlu elemanlar modelinde yaklaşık 22000 zemin elemanı ve 45000 düğüm noktası bulunmaktadır. Yaklaşık 30 m kazı derinliğine sahip iksa projesinde ortalamada 3000-5000 zemin elemanı oluşturulduğu düşünülürse dinamik analiz yapılan modelin eleman sayısının mertebesi anlaşılacaktır.

#### 4.6.2.2 Malzeme modeli

##### Zemin elemanlar

Dinamik analizler kapsamında zemin tabakaları hiperbolik gerilme -birim deformasyon davranışının dikkate alındığı malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Bu malzeme modeli düşük birim deformasyon rijitliği ile birim deformasyonla sertleşen zemin modelidir (HSsmall). Bu modelde Hardin & Drnevich'in (1972) birim deformasyona karşı kayma modülü ve sönüm oranının değişimi davranışı göz önüne alınmaktadır.

HSsmall modelinde gerilme-birim deformasyon ilişkisi Denklem 4.7'deki gibi formülize edilmektedir (Şekil 4.23).

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + 0.385 \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|} \quad (4.7)$$

Burada :

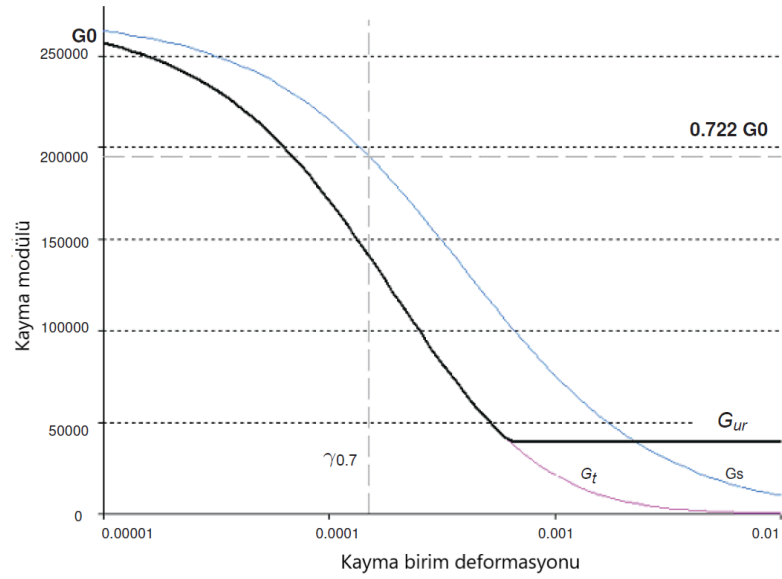
$G_s$  : Sekant kayma modülü

$G_0$  : Çok küçük birim deformasyonlara tekabül eden kayma modülü

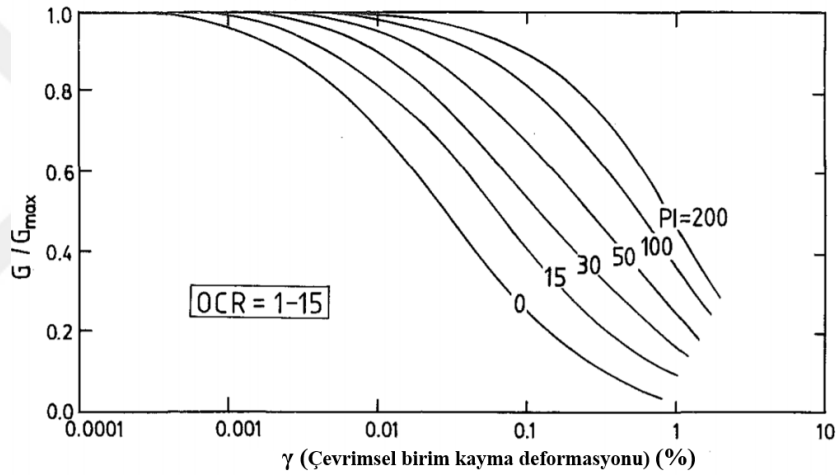
$\gamma$  : Kayma birim deformasyonu

$\gamma_{0.7}$ :  $G_s/G_0 = 0.722$  durumundaki kayma birim deformasyonu

Plaxis yazılımında HSsmall modeli için Çizelge 4.11'de belirtilen zemin parametreleri ile birlikte  $G_0$  ve  $\gamma_{0.7}$  parametrelerinin de girilmesi gerekmektedir (Şekil 4.23).  $\gamma_{0.7}$  parametresinin belirlenmesinde Vucetic & Dobry (1991) tarafından farklı plastisite indislerine göre hazırlanmış kayma modülü azalım oranının çevrimsel birim kayma deformasyonu ile değişimi grafiği kullanılmıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.23 : Sekant ve tanjant kayma modülü azalım grafiği (Plaxis, 2019) .



Şekil 4.24 : Killi zeminlerde  $G/G_{max}$  oranının çevrimsel birim kayma deformasyonu ile değişimi (Vucetic & Dobry, 1991).

Plaxis yazılımında tanımlanan zemin malzeme özellikleri Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 : Zemin Malzeme Özellikleri.

Profil	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_{50}^{ref}$ (MPa)	$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	m	$c'_{ref}$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma_{0.7}$	$G_0^{ref}$ (MPa)
0-6m	16	5	5	15	0.7	1	25	1,00E-04	50
6-25m	18	35	35	105	0.7	1	28	1,00E-04	50
25-35m	18	15	15	45	0.8	7	25	1,00E-04	70
> 35m	19	50	50	150	0.75	20	27	1,20E-04	140

### **Kazık ve bina elemanları**

Analizlerde zemin tabakaları dışında üstyapı ve kazık elemanları da modellenmiştir. Plaxis esas itibariyle geoteknik problemlerin çözümüne yönelik bir yazılımdır. Bu doğrultuda üstyapı tasarımı açısından gerek modelleme gerek analiz kapasitesinin sınırlı olduğu düşünülebilir.

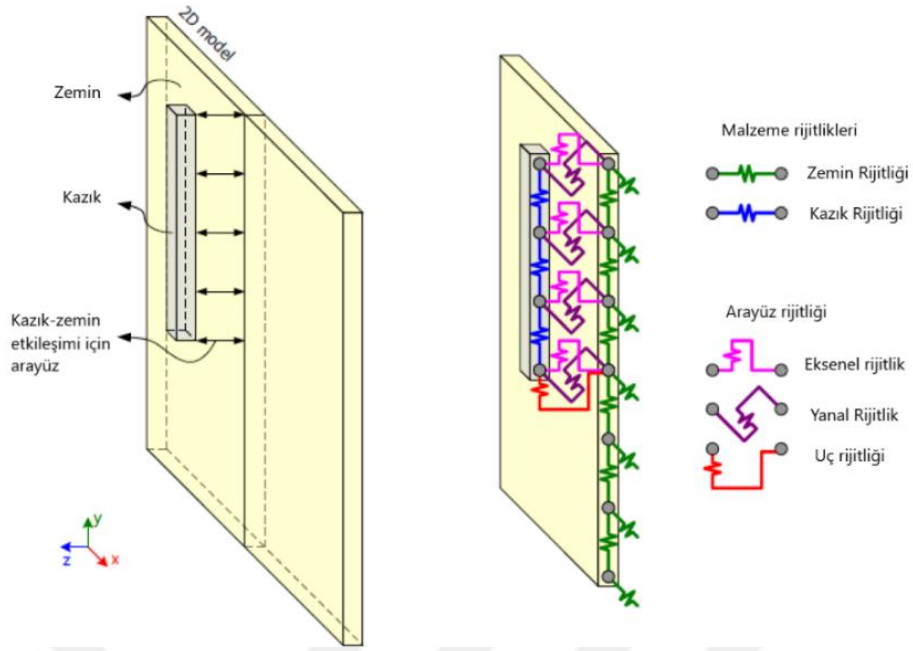
Bu tez çalışması kapsamında yapılan üstyapılı model analizinde üstyapının varlığı nedeniyle oluşan eylemsizlik kuvvetlerinin temel seviyesi ivme kaydına ve kazıklarda oluşan iç kuvvet, deplasman değerlerine olan etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Dolayısıyla analiz sonuçlarının üstyapıda oluşan etkileri dikkate alınmamış, üstyapının kazık ve zeminde yarattığı değişimler incelenmiştir.

Bu doğrultuda döşeme, perde gibi üstyapı elemanları plaxis yazılımında mevcut olan levha (plate) elemanları ile kütleleri ve rijitlikleri ile birlikte modellenmiştir. Yapılan modelleme sonucunda temel tabanında bölüm 4.4'te belirtildiği gibi 362,5 kPa taban gerilmesi elde edilmiştir.

Plaxis yazılımında kazık elemanların tanımlanması için birden fazla yöntem mevcuttur. Bu yöntemler proje gerekliliklerine göre tercih edilmektedir. Örneğin kazıklar arası mesafenin az olduğu iksa kazıkları levha (plate) elemanlarla modellenirken kazıklar arası mesafenin görece fazla olduğu temel altı kazıklar genellikle gömülü kiriş (embedded beam) elemanlar ile modellenir. Gömülü kiriş ile kazık modellenmesi temel altı kazıkların davranışlarının incelenmesi açısından daha doğru bir yaklaşım olmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan analizlerde temel altı kazıklar gömülü kiriş (embedded beam) elemanlar ile modellenmiştir. Bu model ile kazık ve zeminin farklı rijitlikleri ve bağımsız hareketleri göz önüne alınabilmektedir. Ayrıca kazık-zemin ara yüzünde eksenel, yanal ve uç rijitlik faktörleri de tanımlanabilmektedir (Şekil 4.25). Bu rijitlik faktörleri zemin kayma modülü, kazık aralığı ve kazık çapına bağlı olarak değişmektedir (Plaxis, 2019).

Gömülü kiriş elemanlar (embedded beam) ile kazık rijitlik parametrelerine ilaveten kazık boyunca çeper sürtünmesi değişimi ve uç direnci değerleri de tanımlanabilmektedir. Plaxis yazılımında tanımlanan kazık malzeme özellikleri çizelge 4.14'te verilmiştir.



**Şekil 4.25 :** Plaxis 2D gömülü kiriş elemanı (embedded beam) ile kazık modellenmesi (Sluis, 2012).

**Çizelge 4.14 :** Kazık malzeme özellikleri .

Açıklama	Değer
E (kN/m <sup>2</sup> )	32E+06
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	25
D (m)	1.65
A (m <sup>2</sup> )	2.138
I (m <sup>4</sup> )	0.3638
Kazık aralığı (m)	5
$T_{skin,start,max}$ (Kazık başlangıcı çeper sürtünmesi değeri) (kN/m)	60
$T_{skin,end,max}$ (Kazık sonu Çeper sürtünmesi değeri) (kN/m)	292.7
$F_{max}$ (Uç Direnci) (kN/m)	513

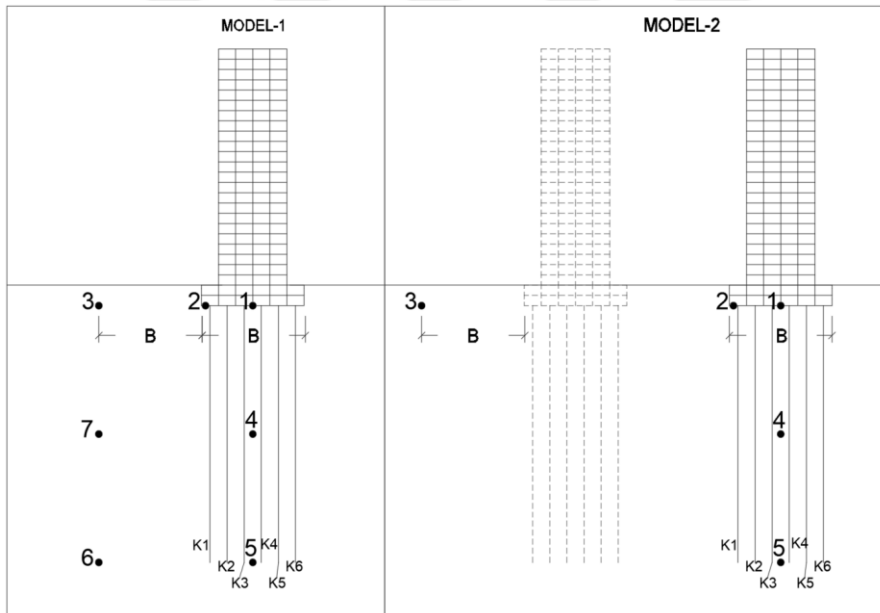
#### 4.7 Analiz Sonuçları

Model-1 ve Model-2 için yapılan analiz sonuçları aşağıda şekil 4.26'da gösterilen noktalar üzerinden karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar üç ana başlık altında ele alınmıştır :

- İvme kaydının değişimi
  - Model tabanı- Kazık Boyu Orta Seviyesi - Kazık Ucu Seviyesi ve Temel altı orta noktası arası

- Temelden B (temel genişliği) kadar mesafe sonrasında: Model tabanı hizası- Kazık Boyu Orta Seviyesi hizası - Kazık Ucu Seviyesi hizası ve Temel altı orta noktası hizası arası
- Temel altı orta noktası tepki spektrumu
- Zeminde oluşan kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyonu değerleri
- Kazık moment ve kesme kuvveti değerlerinin değişimi
  - Her bir kazık için moment ve kesme kuvveti değerleri
  - Tüm kazıklar için moment ve kesme kuvveti değerlerinin zarfı

Yukarıda belirtilen sonuçlar Model-1 (Tek binanın bulunduğu model) için her 3 alt modelde ve 2 ayrı deprem kaydı için ayrı ayrı verilmiştir. Model-2 analiz sonuçları ise detaylıca sunulmamış sadece Model-1’de elde edilen değerlerin ikinci bir yapı bulunması durumunda ne kadar değiştiğini göstermek adına sonuç olarak verilmiştir.



**Şekil 4.26 :** Model-1 ve Model-2 Sonuç karşılaştırma noktaları.

Şekil 4.26’da belirtilen numaraların açıklamaları aşağıdaki gibidir.

- 1: Temel Tabanı Orta Noktası
- 2: Temel Tabanı Köşe Noktası
- 3: Temel Taban Hizası-Temelden B kadar mesafe sonrası (B: Temel Genişliği)
- 4: Kazık Boyu Orta Seviyesi (Temel tabanı orta noktası hizası)
- 5 : Kazık Ucu Seviyesi (Temel tabanı orta noktası hizası)



6 : Temelden B kadar mesafe sonra Kazık Ucu Hizası

7: Temelden B kadar mesafe sonra Kazık Boyu Orta Seviyesi

K1 : 1 Nolu Kazık

Şekil 4.26 da belirtilen noktalar analiz sonuçlarını gösteren grafiklerde parantez içerisinde belirtilmiştir. Model-1 önceki bölümlerde anlatıldığı üzere üç alt bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. Model-2 için detaylı analiz sonuçları verilmemiştir. Sadece çift bina olmasının kazık kesme kuvveti ve moment zarfına olan etkisi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Model 1-1 Kinematik etkileşim (bina yükünün göz önüne alınmadığı durum) :** Bu model kinematik etkileşim analizi olarak ele alınmıştır. Üstyapı tanımlanmamış, temel ve bodrum perdeleri kütsüz-sonsuz rijit olarak modellenmiştir. Kazık elemanlar ise kütleleri ve rijitlikleri ile birlikte tanımlanmıştır. Zemin ortam ise zeminin nonlineer davranışını göz önüne alan HSsmall malzeme modeli ile tanımlanmıştır.

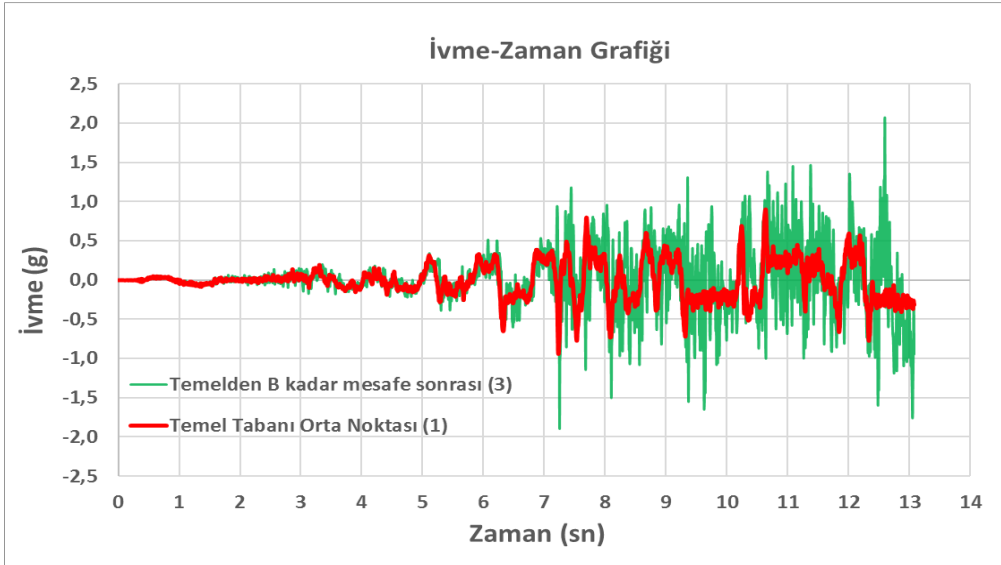
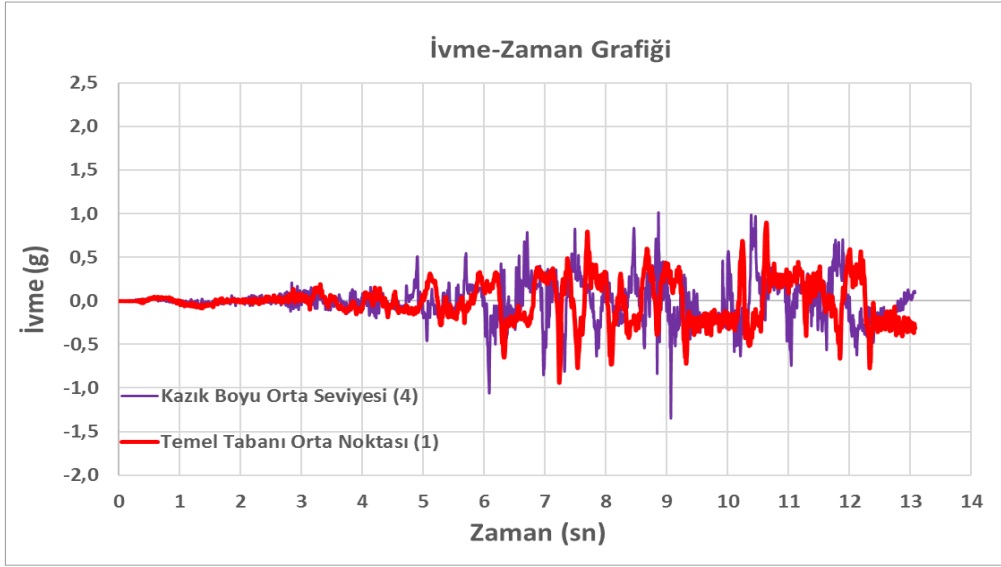
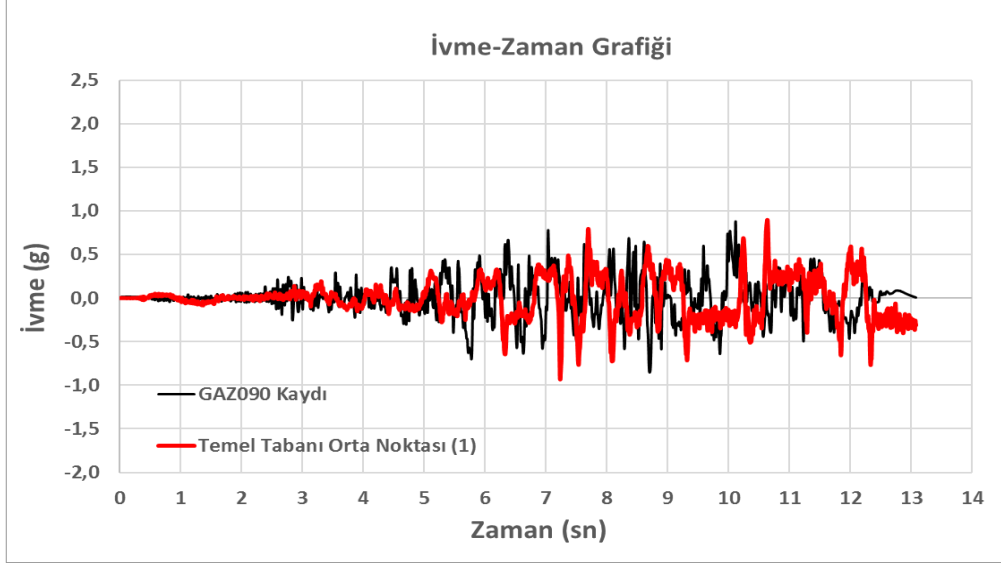
**Model 1-2 Kinematik etkileşim (bina yükünün göz önüne alındığı durum):** Bu model 1-1 modelinden sadece bina yüklerinin de analize katılması açısından farklıdır. Diğer tüm özellikler iki alt model için de aynıdır. Bina yüklerinin hesaba katılması ile kinematik etkileşim analizi öncesinde bina yükleri nedeniyle zemin ortamdaki gerilme dağılımı değiştirilmiştir. Üstyapı göz önüne alınmamış, temel ve bodrum perdeleri kütsüz sonsuz rijit olarak modellenmiştir. Dolayısıyla herhangi bir eylemsizlik kuvveti oluşmamıştır. 1-1 ile 1-2 modellerinin karşılaştırılması bina yüklerinin kinematik etkileşim analizleri sonuçlarına etkisinin araştırılması açısından önemlidir.

**Model 1-3 Üstyapı-Temel-Kazık-Zeminden oluşan iki boyutlu ortak sistem modeli :** Bu model iki boyutlu ortak sistem modeline denk gelmektedir. Üstyapı-temel-kazık elemanlar kütleleri ve rijitlikleri ile birlikte tanımlanmıştır. Bu model ile üstyapı-temel-kazık ve zemin ortam deprem etkisi altında birlikte analiz edilmiştir.

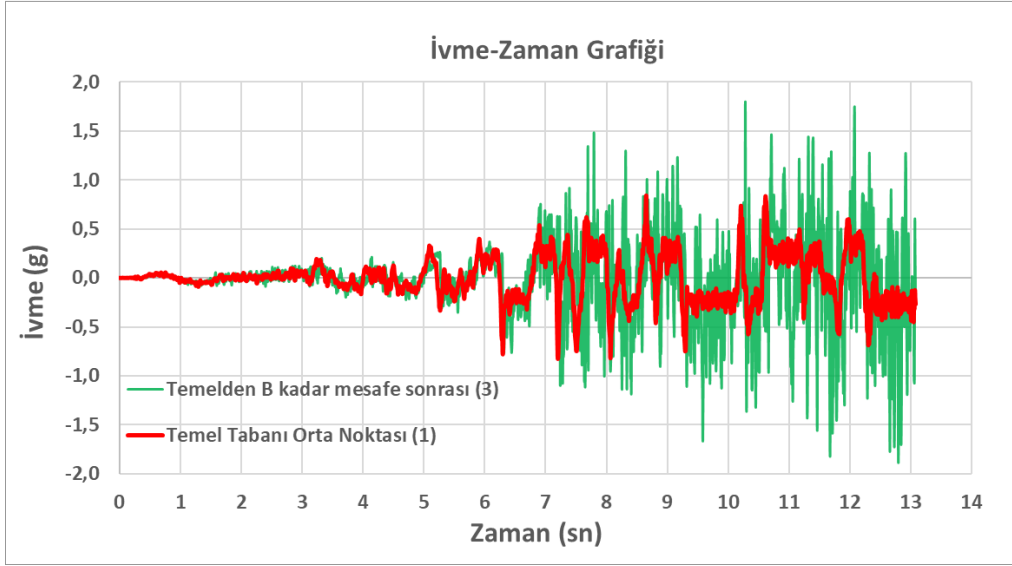
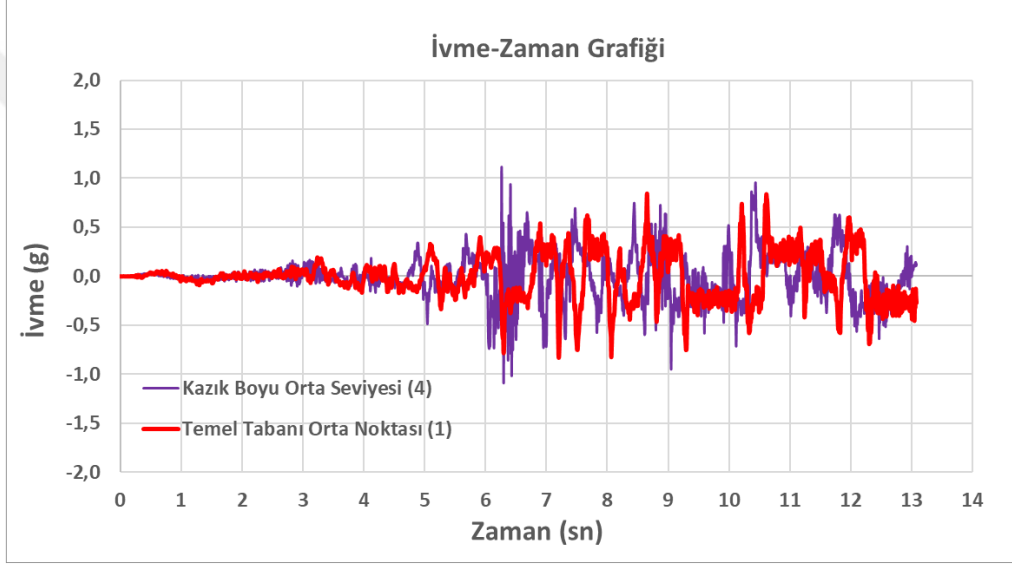
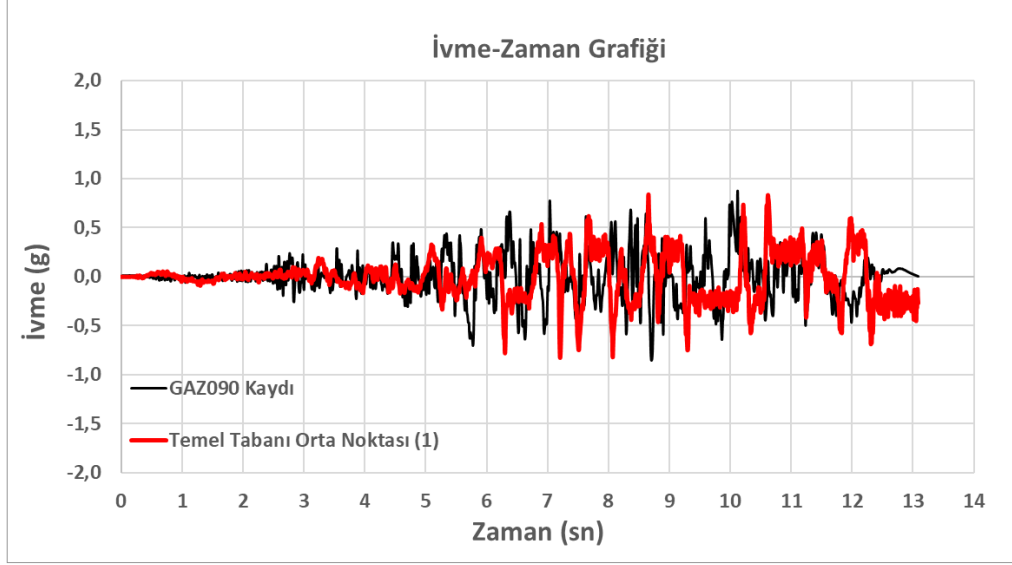
#### **4.7.1 GAZ090 deprem kaydı ile analiz sonuçları**

##### **4.7.1.1 Yatay ivme kaydı ve tepki spektrumu değişimi**

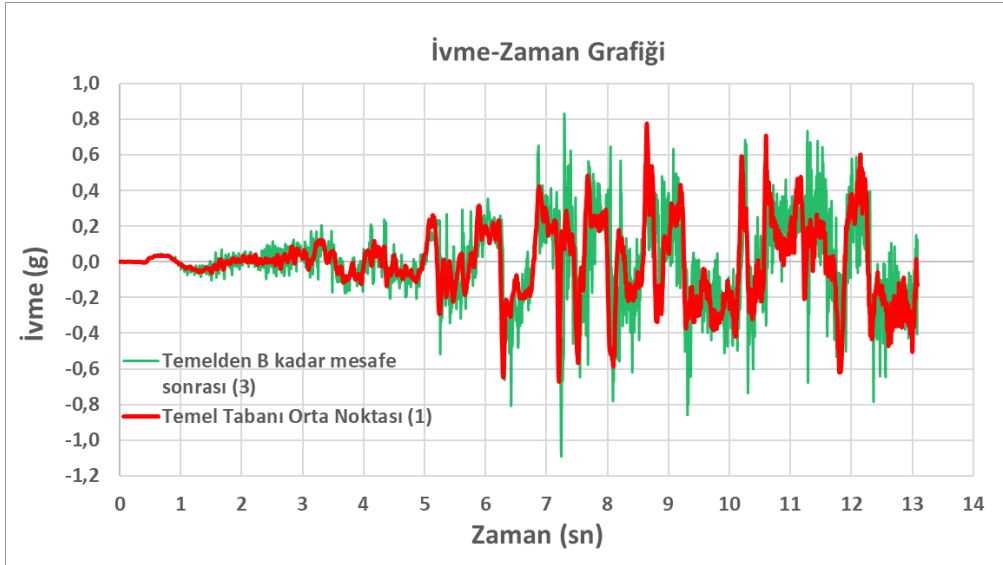
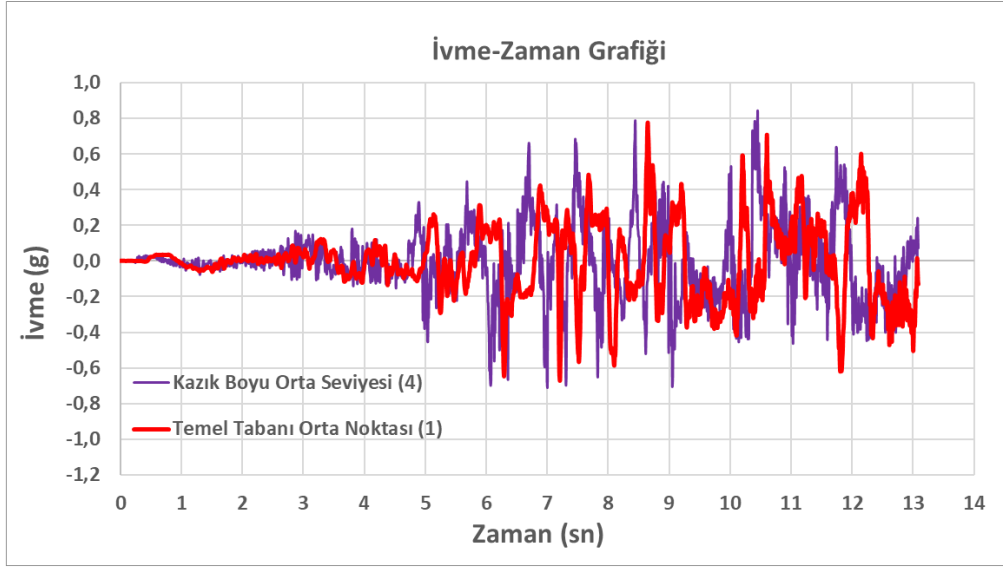
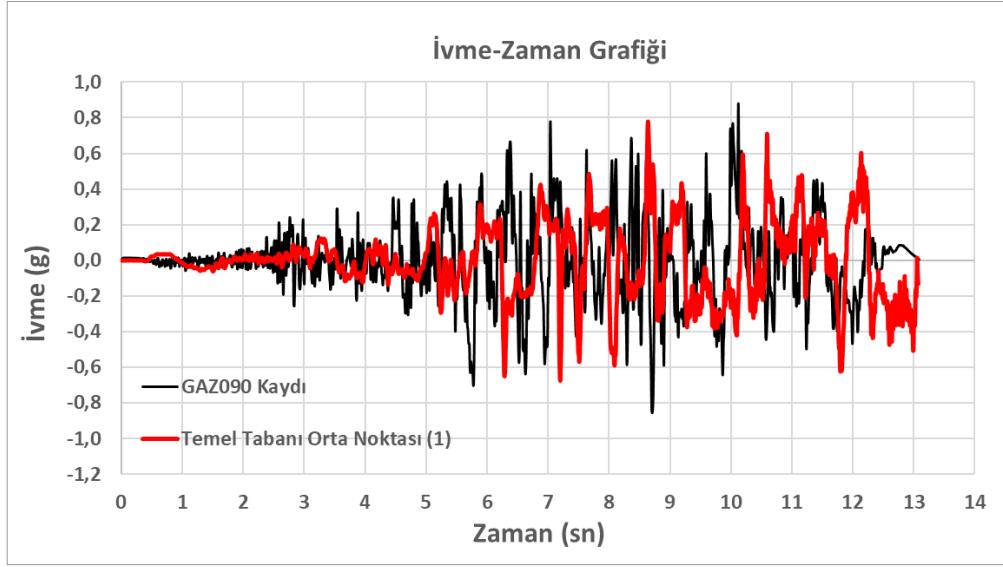
Model-1 , Model 1-2 ve Model 1-3 için şekil 4.26'da belirtilen noktalar için ivme kaydı değişim grafikleri ve temel tabanı orta noktasında elde edilen tepki spektrumu grafiği aşağıda sunulmuştur (Şekil 4.27- Şekil 4.30).



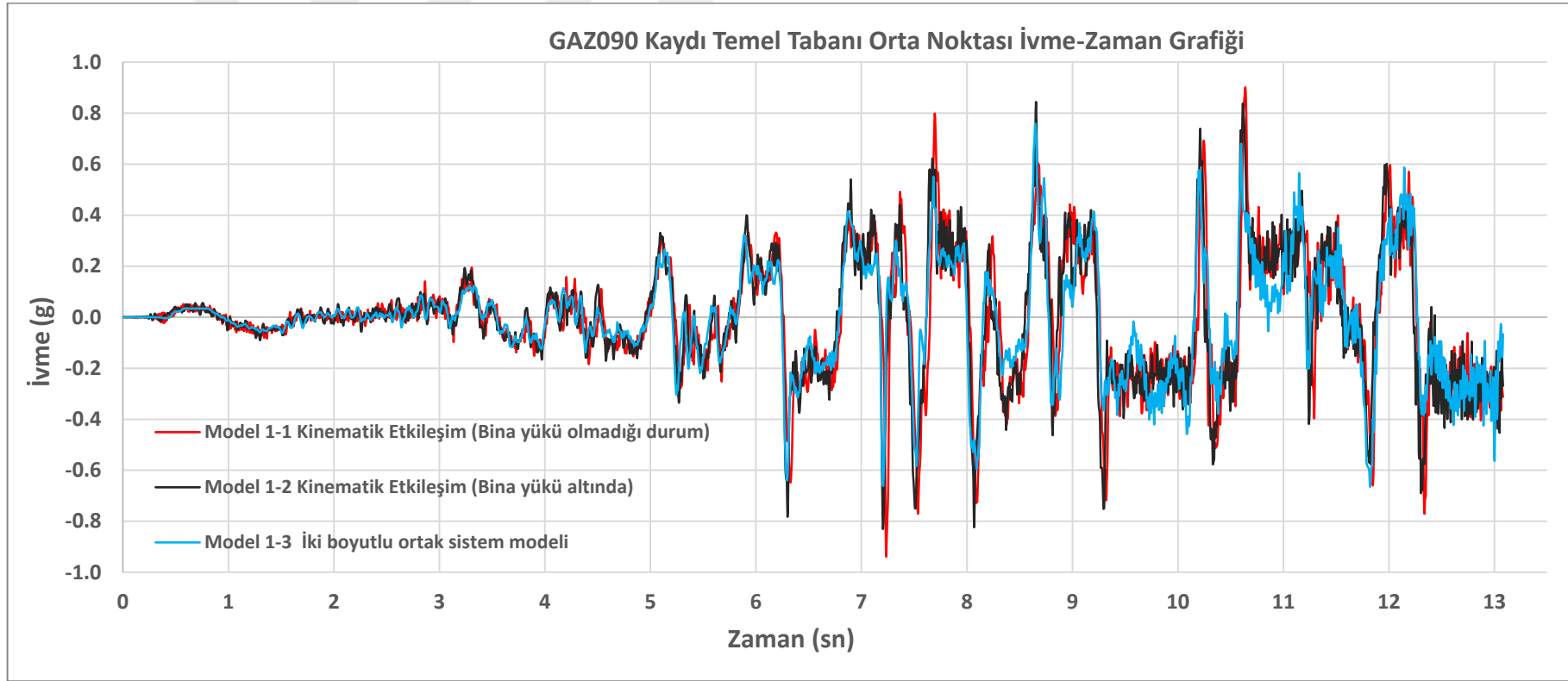
Şekil 4.27 : Model 1-1 Kinematik Etkileşim (Bina yükü olmadığı durum) için analiz sonuçları.



Şekil 4.28 : Model 1-2 Kinematik Etkileşim (Bina yükü altında) için analiz sonuçları.



**Şekil 4.29** : Model 1-3 Üstyapı-Temel-Kazık-Zeminden oluşan iki boyutlu ortak sistem modeli analiz sonuçları.

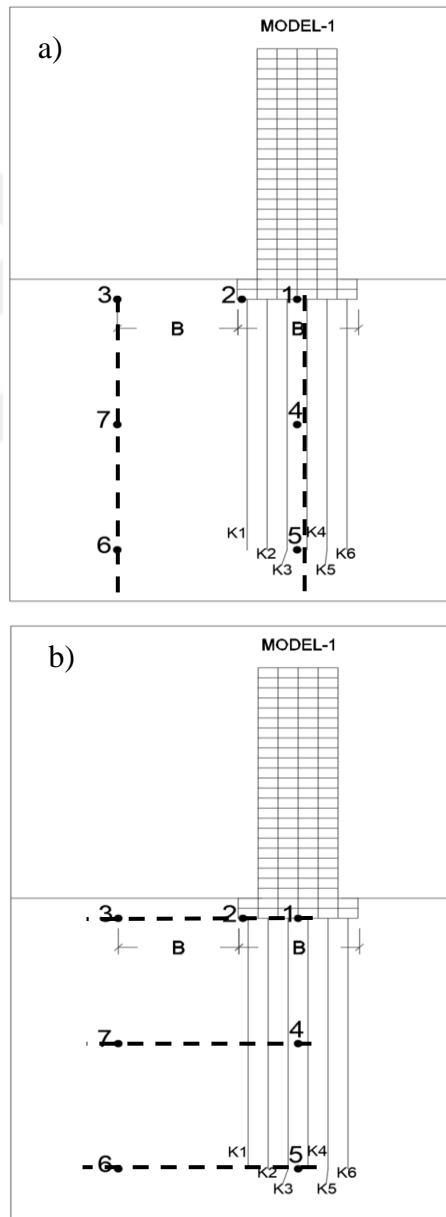


Şekil 4.30 : GAZ090 Kaydı temel orta noktası yatay ivme kaydı değişimi.

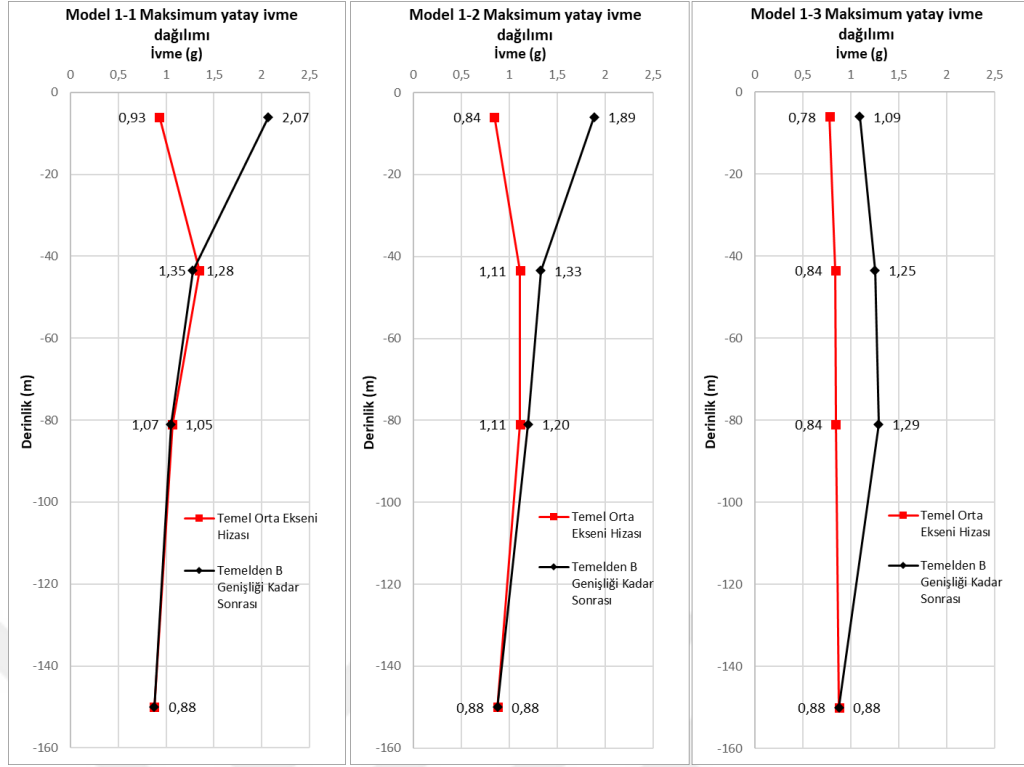
Model-1’de GAZ090 kaydı ile yapılan analiz için temel orta eksenini ve temelden temel genişliği “B=30m” kadar uzakta olan noktalar için ivme, hız ve deplasman değerlerinin değişimi sırasıyla şekil 4.32 – şekil 4.37’de verilmiştir.

Düşeyde model tabanı-temel tabanı seviyesi arasındaki ivme, hız ve deplasman değerlerinin karşılaştırıldığı eksenler şekil 4.31a’da , yataydaki değerlerin alındığı eksenler ise şekil 4.31b’de kesik çizgi ile gösterilmiştir.

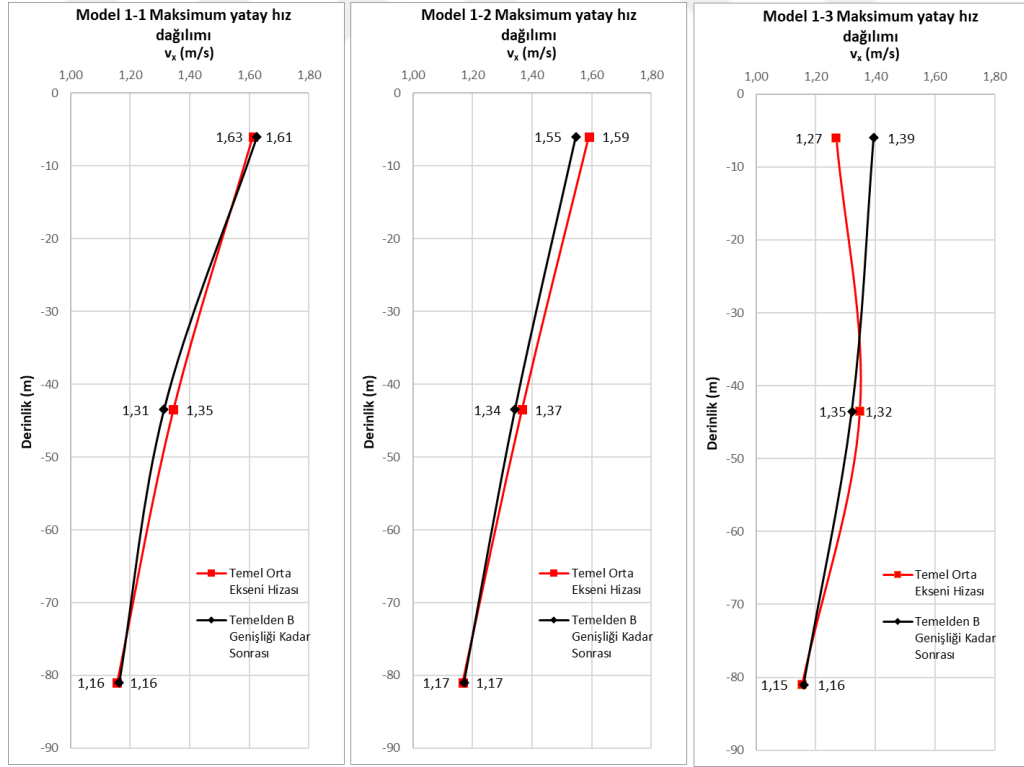
Yataydaki grafikler açısından (Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37) Temel orta eksenini belirten “1” nolu nokta  $x=15, y=-6$  , “3” nolu nokta ise  $x=-30, y=-6$  koordinatlarındadır.



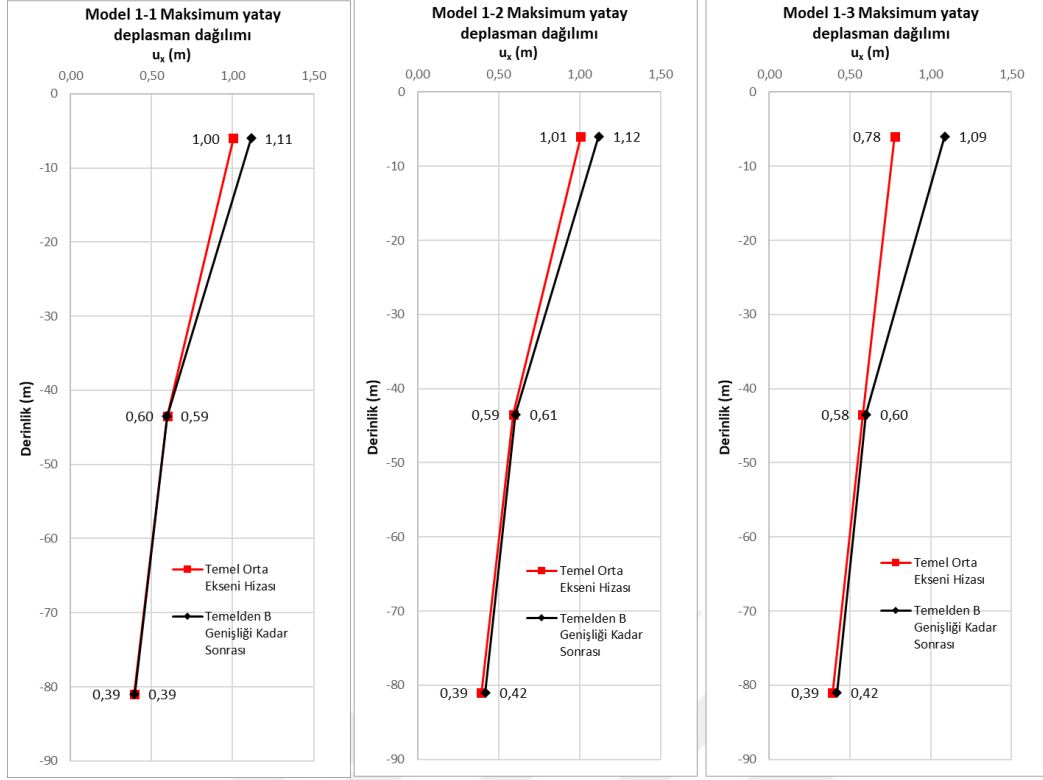
**Şekil 4.31 :** İvme, hız ve deplasman değerlerinin karşılaştırıldığı eksenler : a) Düşey eksenler, b) yatay eksenler .



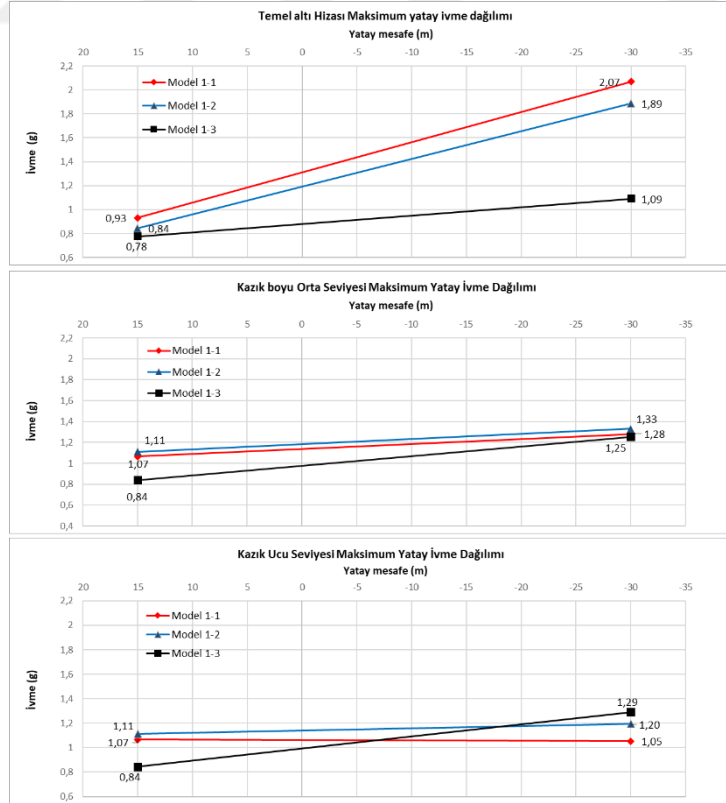
Şekil 4.32 : Düşeyde model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum ivme değerleri.



Şekil 4.33 : Düşeyde model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum hız değerleri.

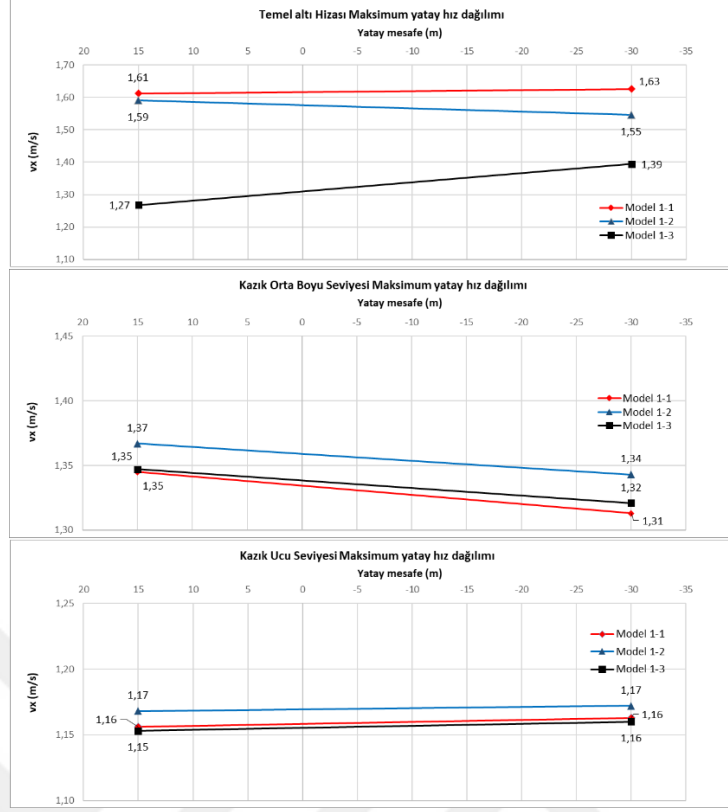


**Şekil 4.34 :** Düşeyde model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum deplasman değerleri.

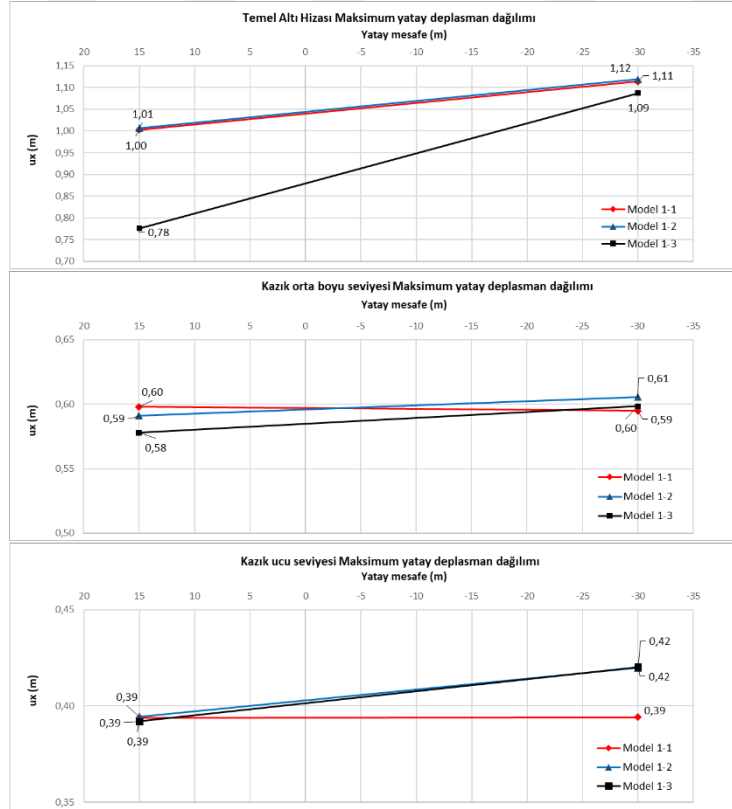


**Şekil 4.35 :** Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum ivme değerleri.



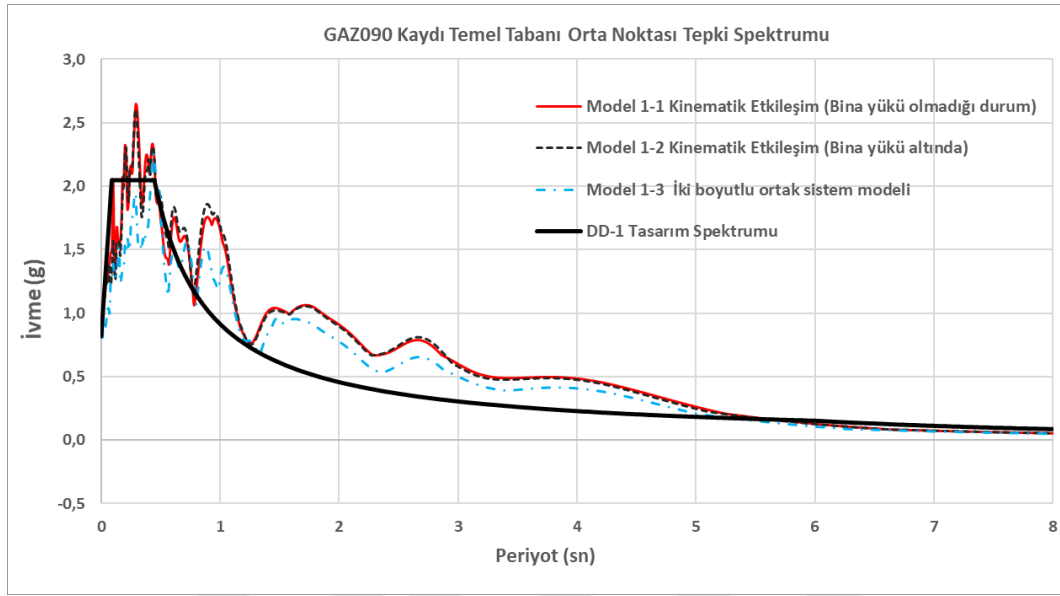


Şekil 4.36 : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum hız değerleri.



Şekil 4.37 : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum deplasman değerleri.

Temel tabanı orta noktasında GAZ090 kaydı ile yapılan analiz sonucu elde edilen %5 sönümlü tasarım spektrumu grafikleri şekil 4.38’de verilmiştir.



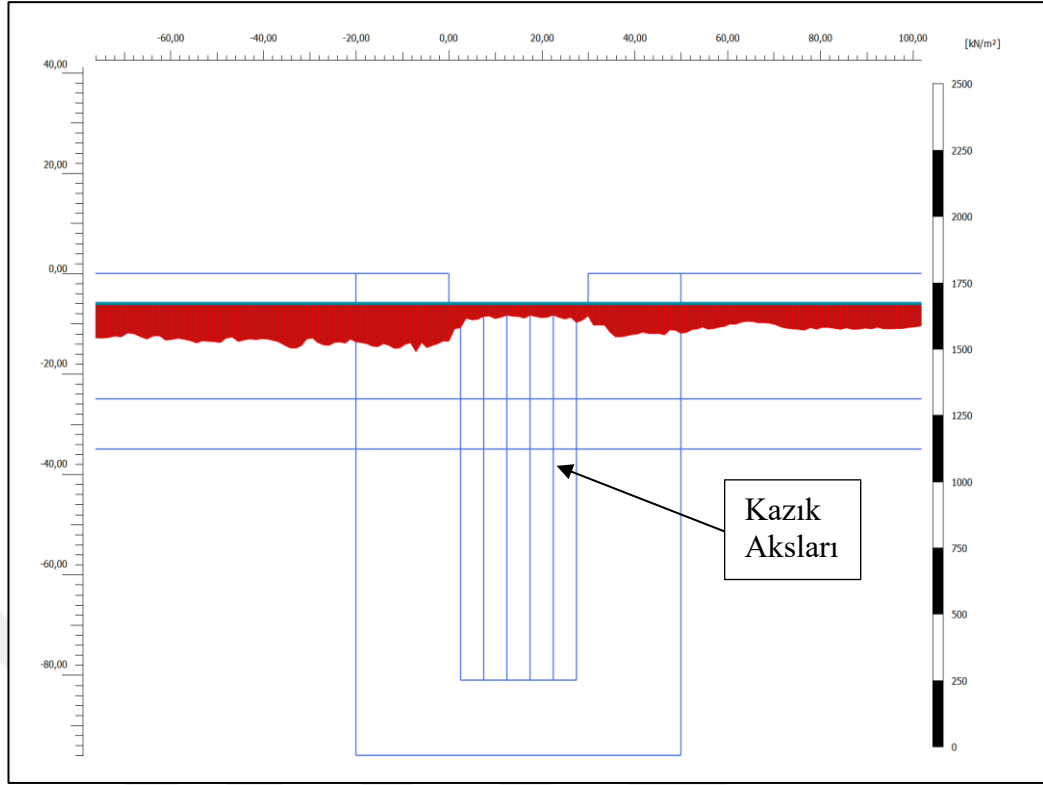
**Şekil 4.38 :** GAZ090 kaydı ile analiz sonucu temel tabanı orta noktasında elde edilen %5 sönümlü tepki spektrumu karşılaştırması.

#### 4.7.1.2 Zeminde oluşan kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyonu değerleri

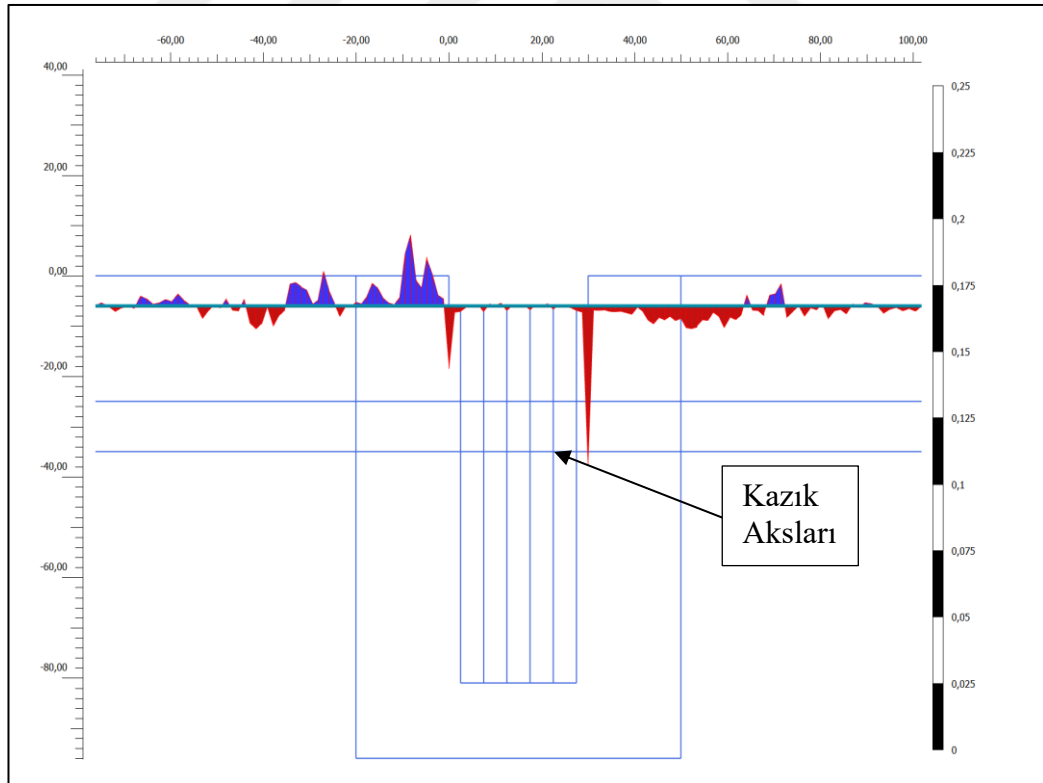
Model 1-1, 1-2 ve 1-3 için kazık - temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

Şekil 4.39’da Model 1-1 için kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri , şekil 4.39’da Model 1-2 için kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri gösterilmiştir. Model 1-3 için kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri şekil 4.41’de gösterilmiştir.

Söz konusu şekiller incelendiğinde kinematik etkileşim modellerinde temel-kazık birleşim bölgesinde kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. Model 1-3 (iki boyutlu ortak sistem modeli)’te ise birim deformasyon açısından aynı eğilim gözlemlenmiş ancak kayma gerilmelerinin temel-kazık birleşim bölgesinde daha fazla olduğu anlaşılmıştır.

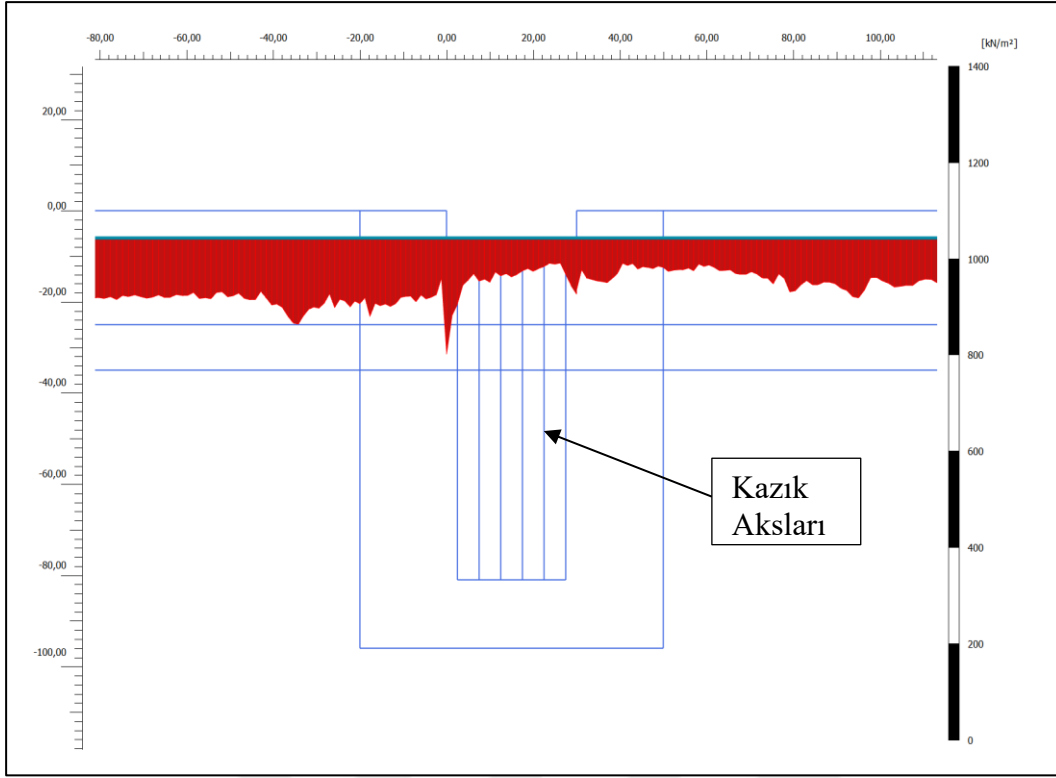


a) Kayma gerilmesi dağılımı (min.: -193,4 kPa, maks. -45,98 kPa)

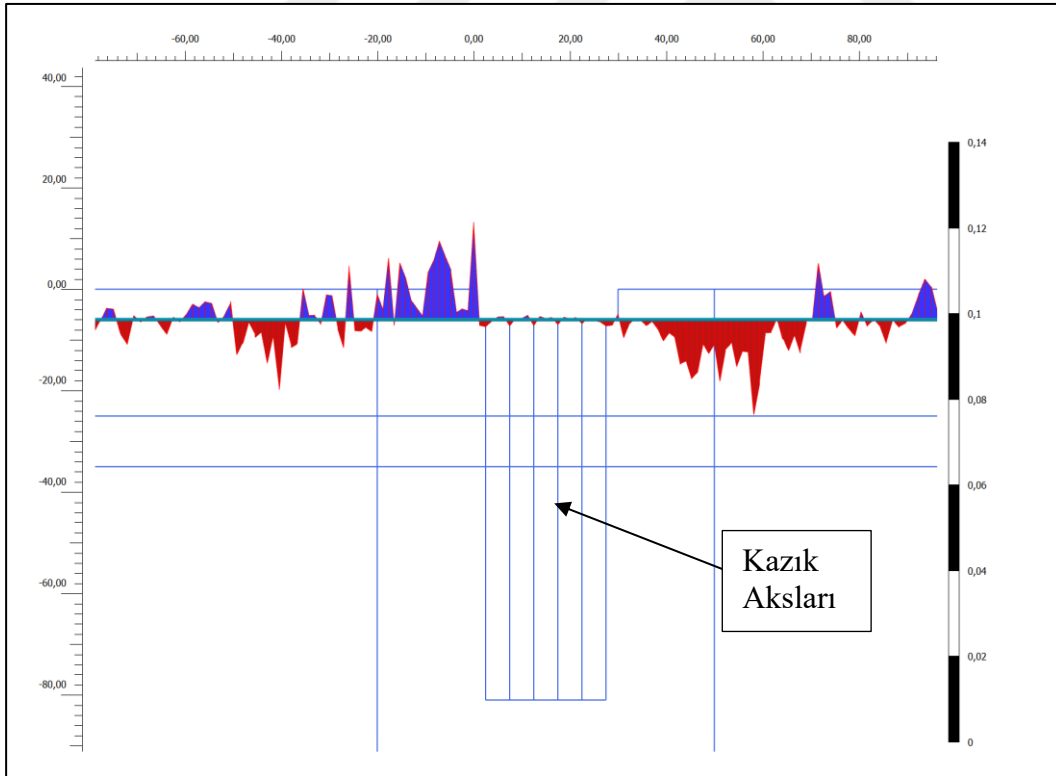


b) Kayma birim deformasyonu dağılımı (min.: -0.06316, maks 0,02824 )

**Şekil 4.40 :** Model 1-1 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme

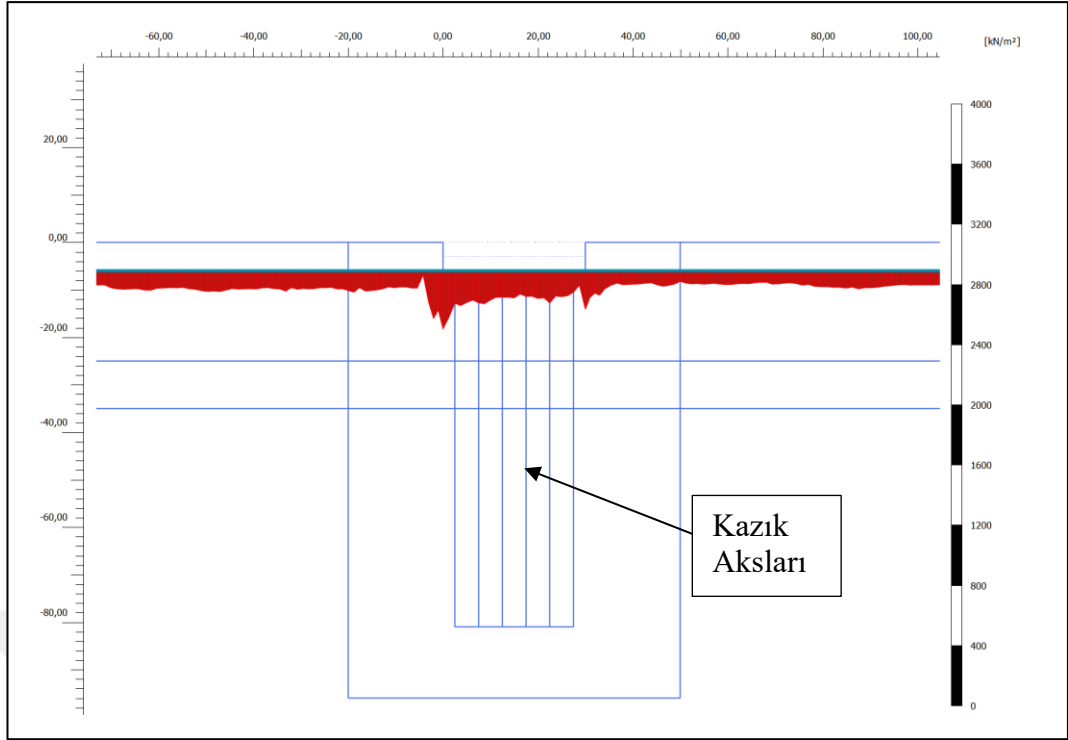


a) Kayma gerilmesi dağılımı (min.: -254,9 kPa, maks -54,76 kPa)

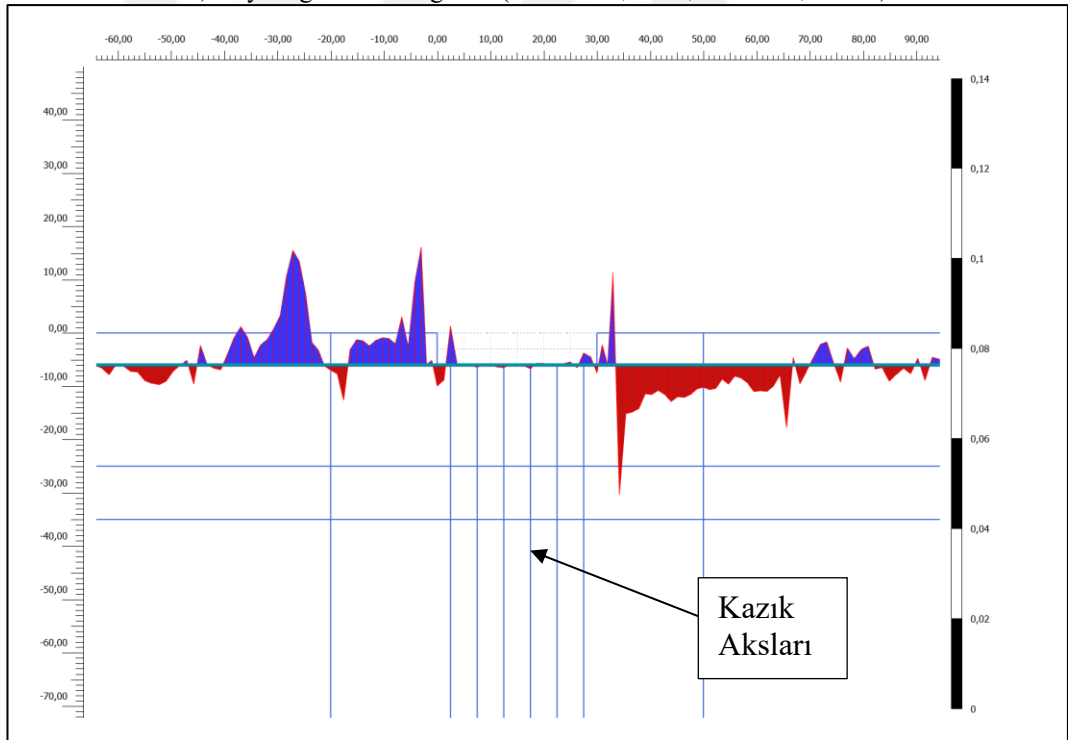


b) Kayma birim deformasyonu dağılımı (min.: -0,02343, maks 0,02402 )

**Şekil 4.41** : Model 1-2 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme



a) Kayma gerilmesi dağılımı (min.: -409,6 kPa, maks -30,12 kPa)

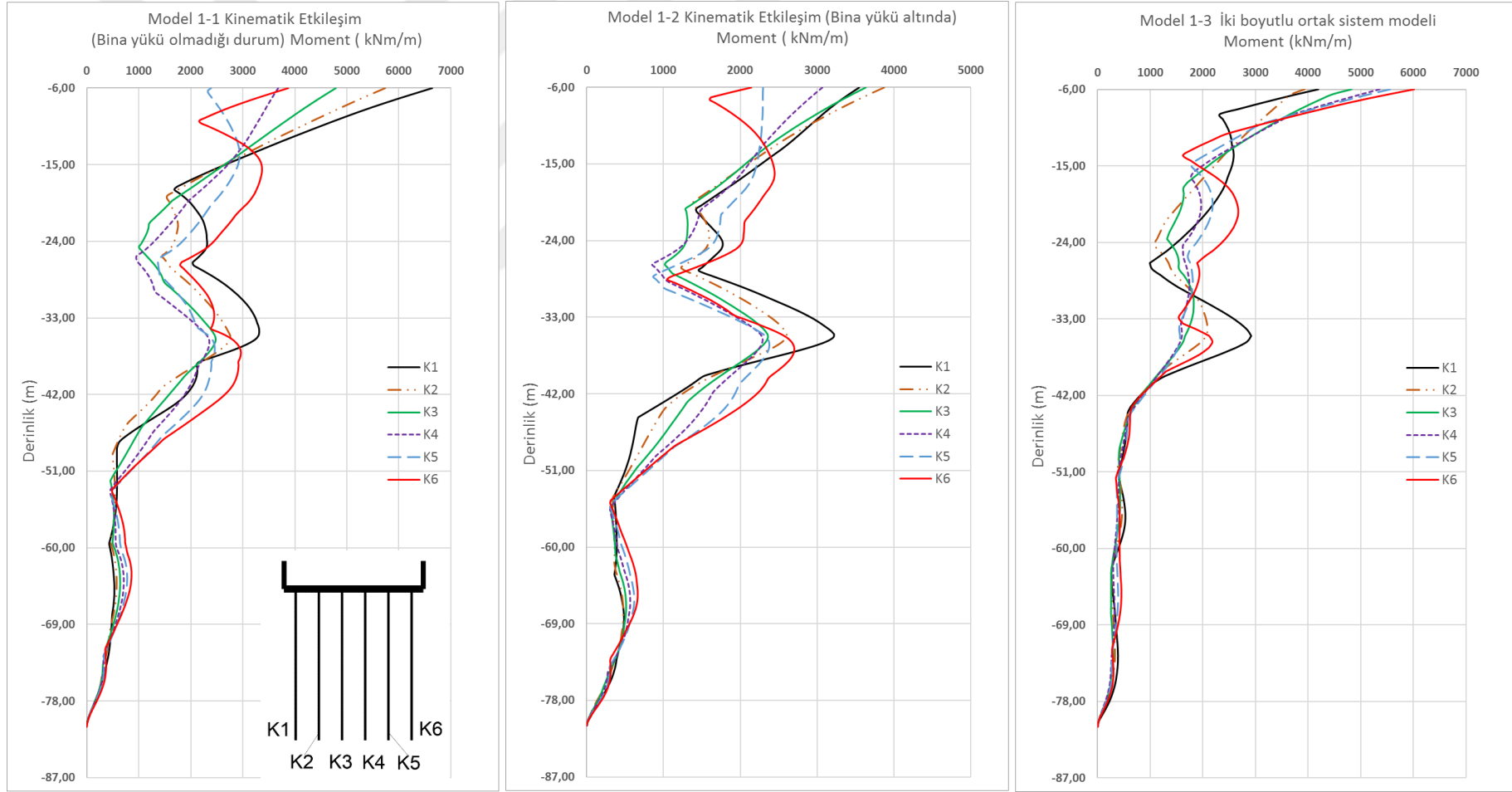


b) Kayma birim deformasyonu dağılımı (min.: -0.03047, maks 0.02771)

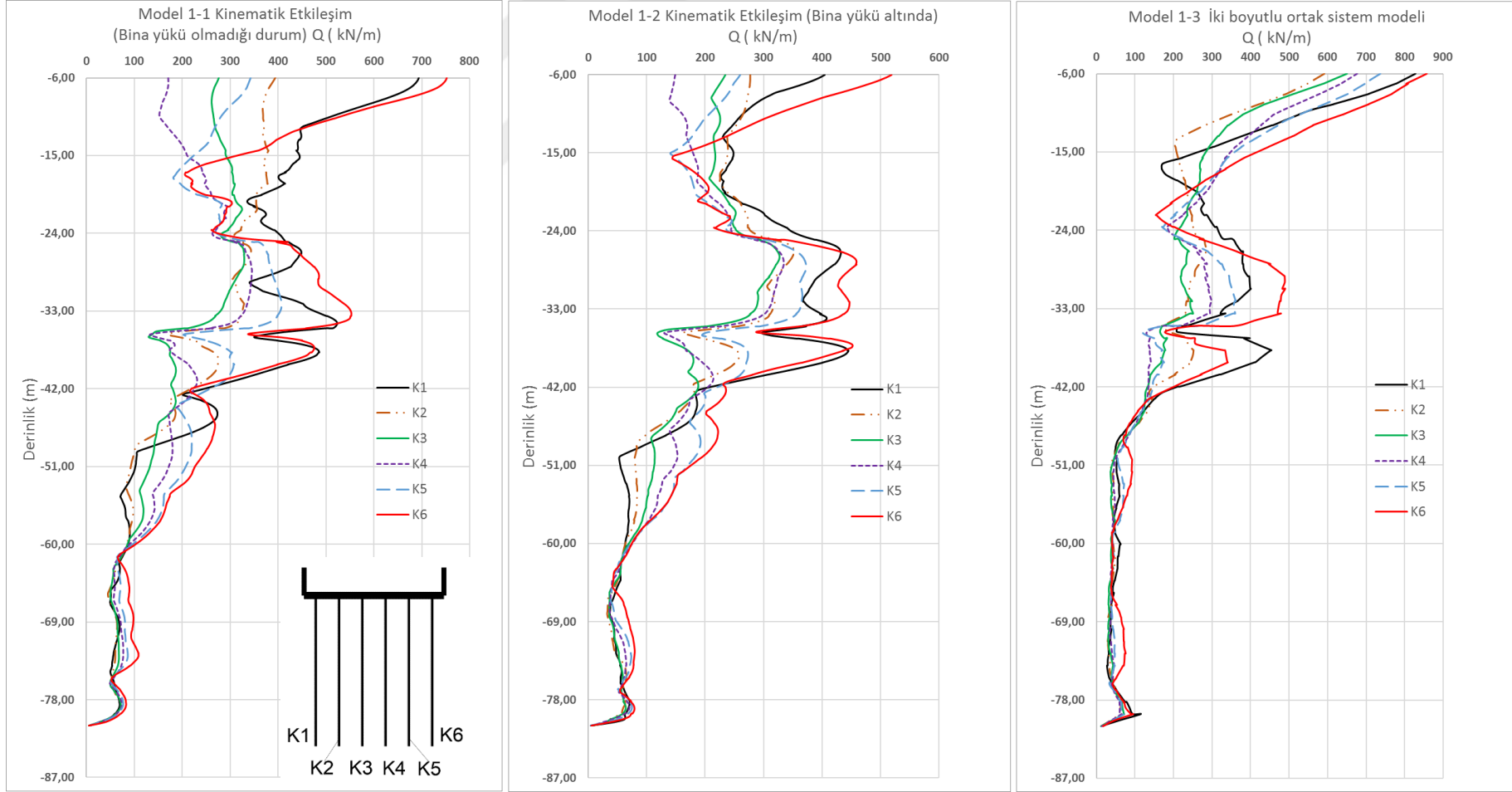
**Şekil 4.42 :** Model 1-3 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) Kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme

#### 4.7.1.3 Kazık moment ve kesme kuvveti değerleri

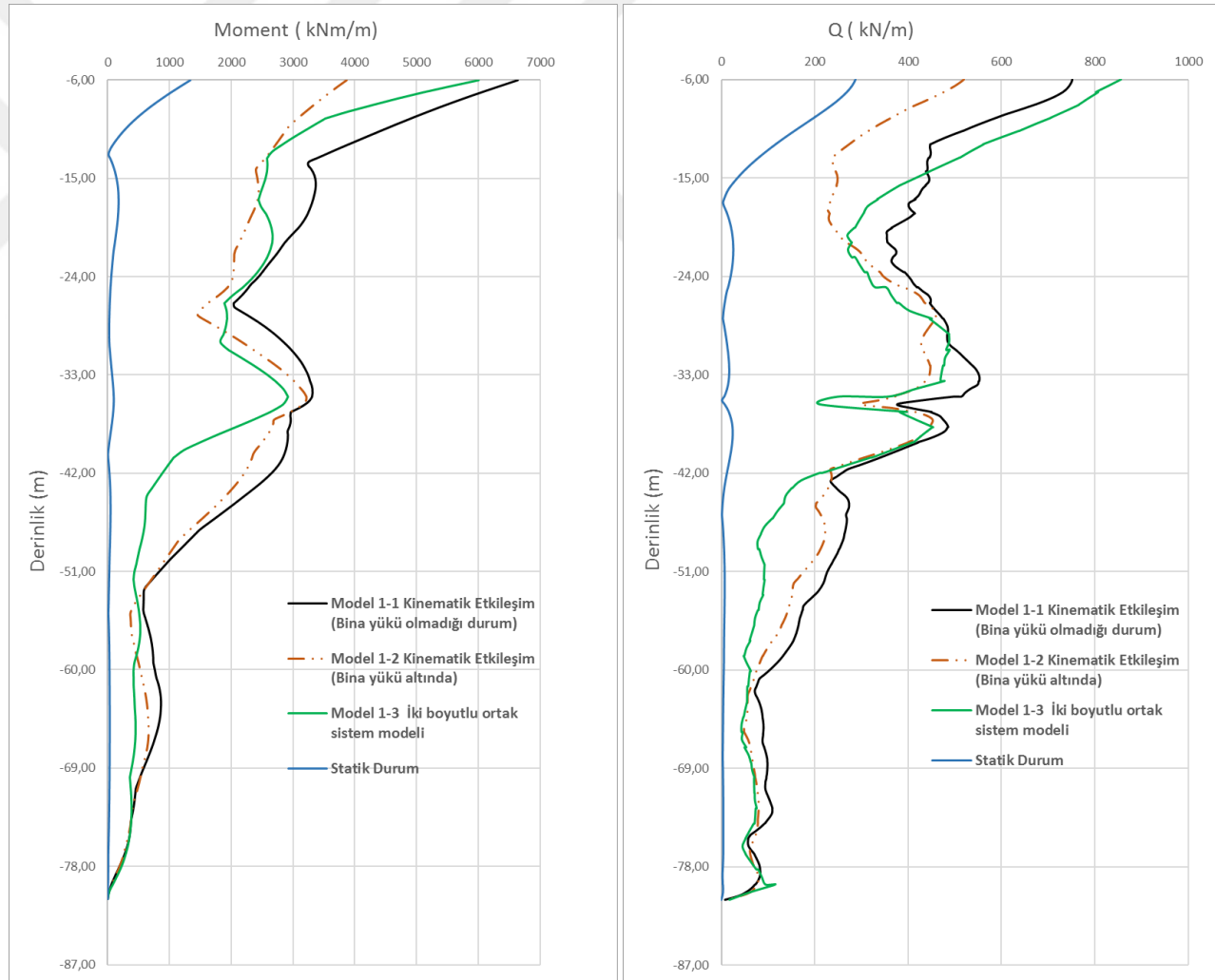
Analizler sonucunda kazıklarda elde edilen kesme kuvveti ve moment değerlerinin dağılımları aşağıdaki verilmiştir (Şekil 4.42 - Şekil 4.46).



Şekil 4.43 : Model -1 GAZ090 Kaydı ile analiz moment değişim grafikleri.



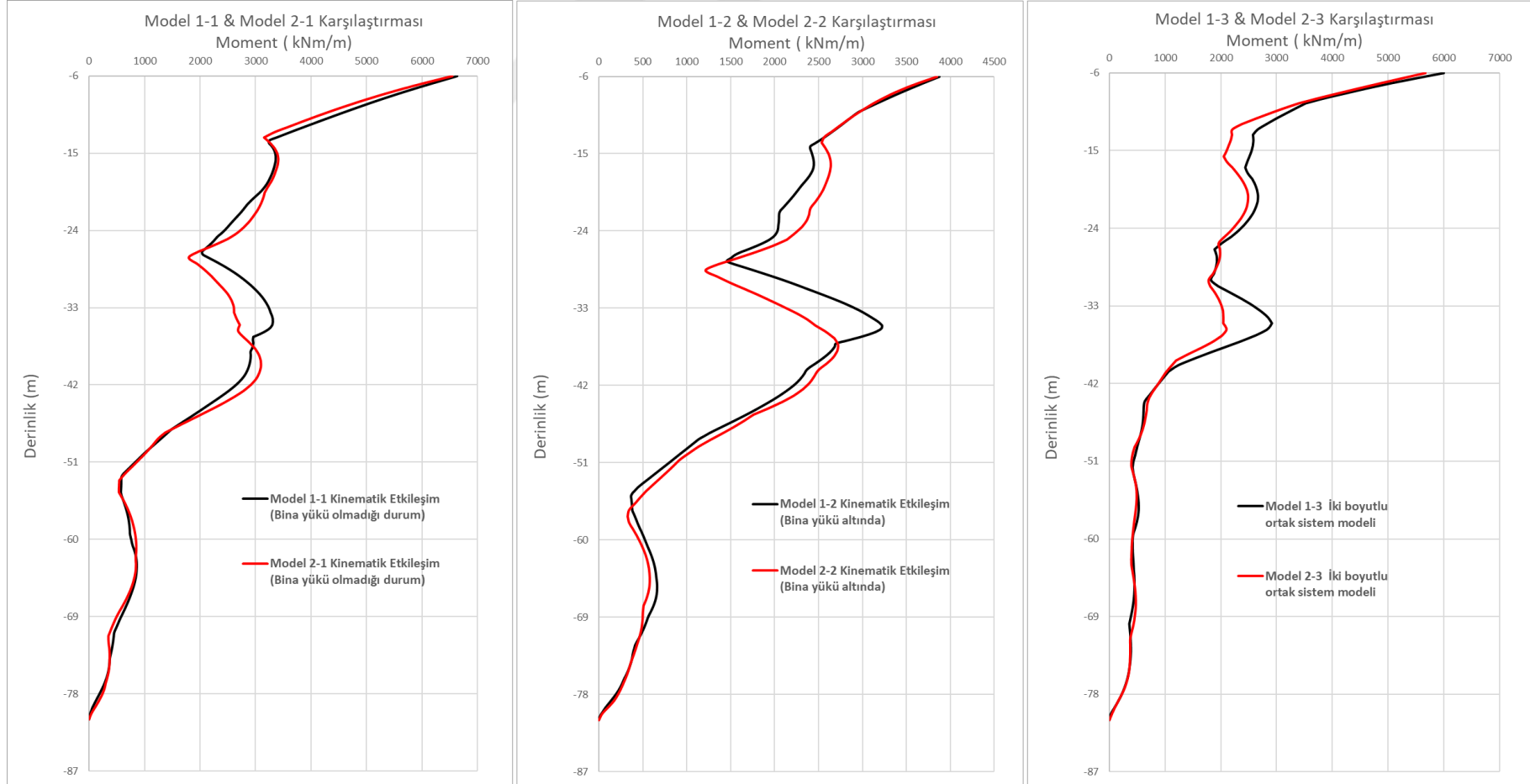
Şekil 4.44 : Model -1 GAZ090 Kaydı ile analiz Kesme kuvveti değişim grafikleri.



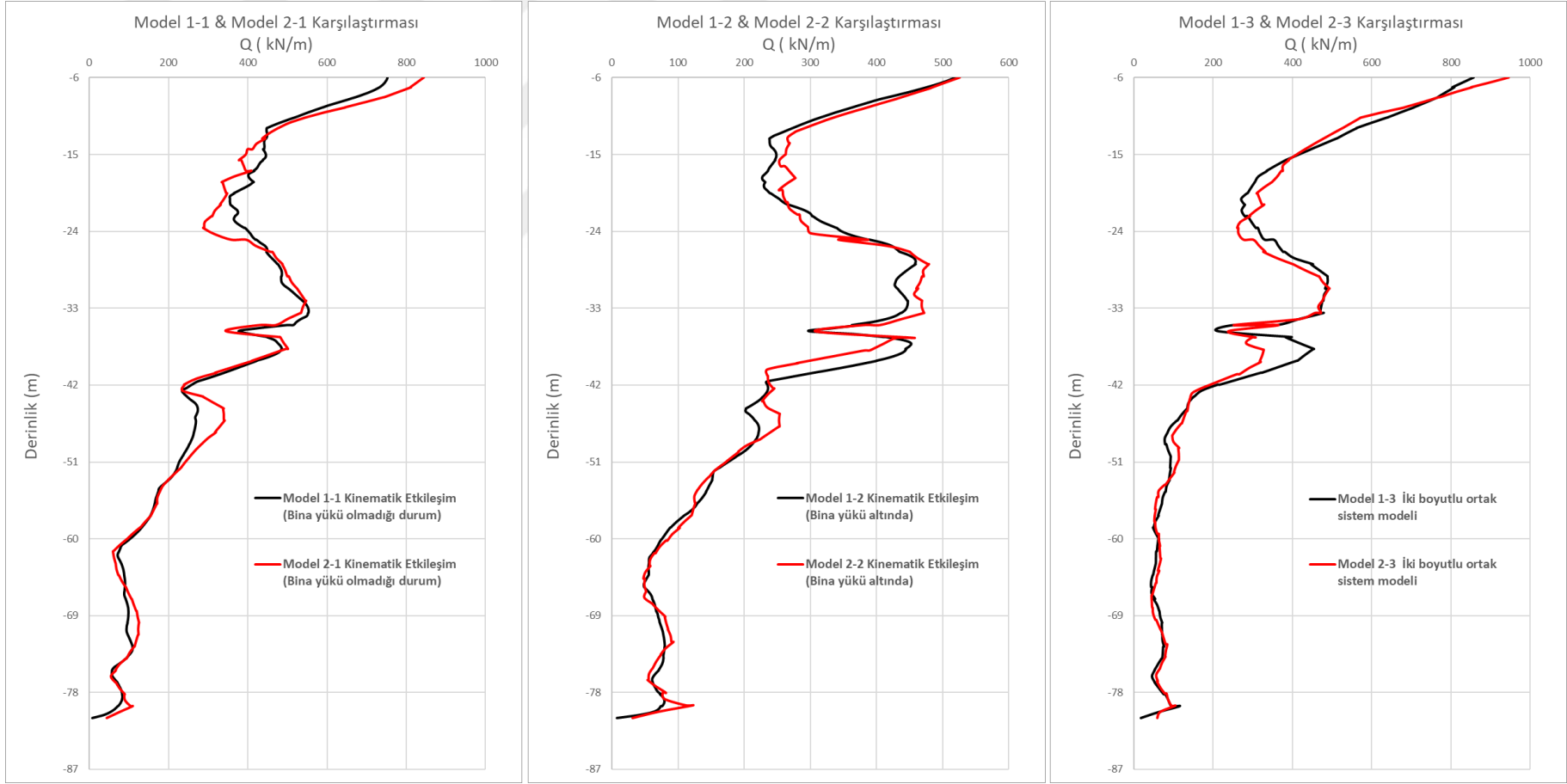
Şekil 4.45 : Model -1 GAZ090 kaydı kesme kuvveti ve moment zarfı değişim grafiği.



## Model-1 ve Model-2 kazıklarda oluşan etkilerin karşılaştırılması



Şekil 4.46 : Model -1 ve Model-2 GAZ090 kaydı moment zarfı karşılaştırma grafiği.

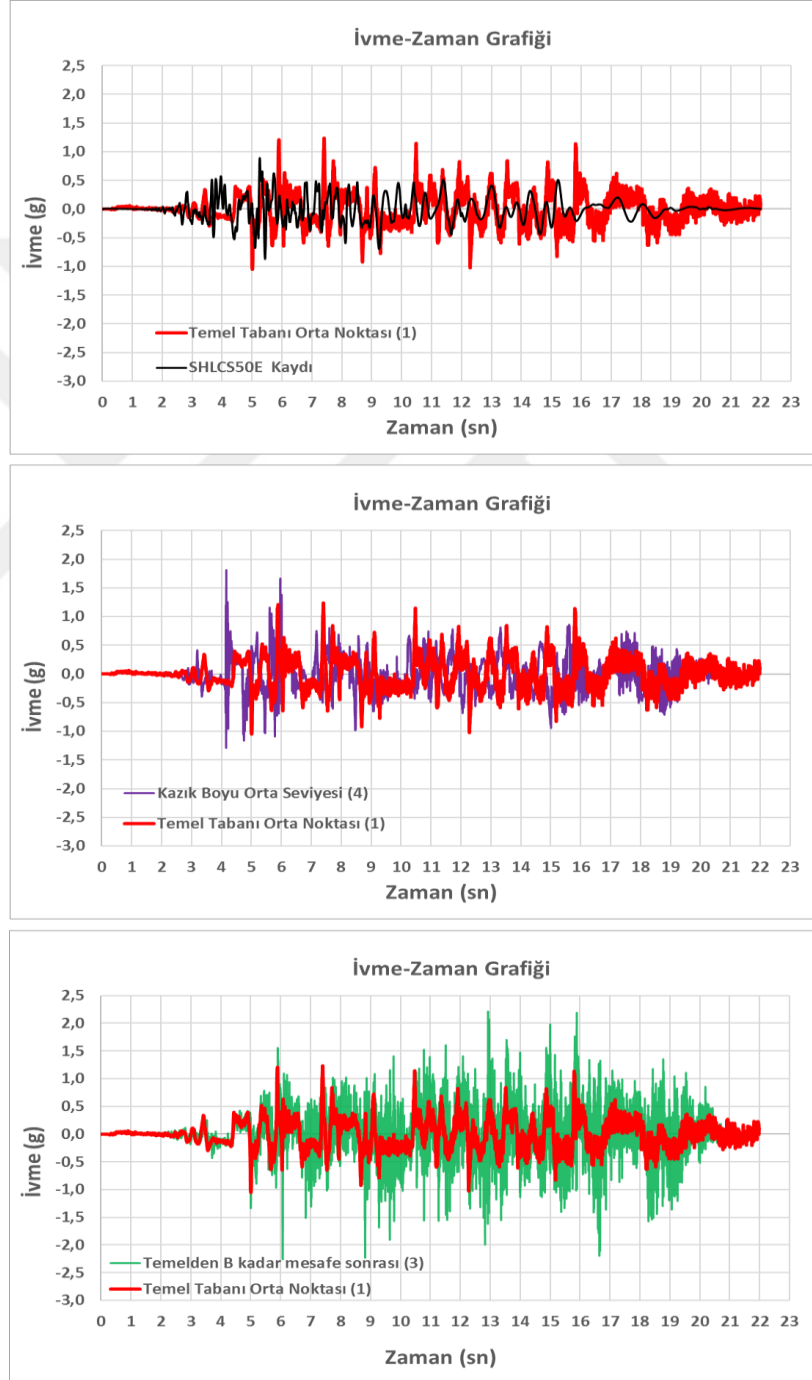


Şekil 4.47 : Model -1 ve Model-2 GAZ090 kaydı kesme kuvveti zarfı karşılaştırma grafiği.

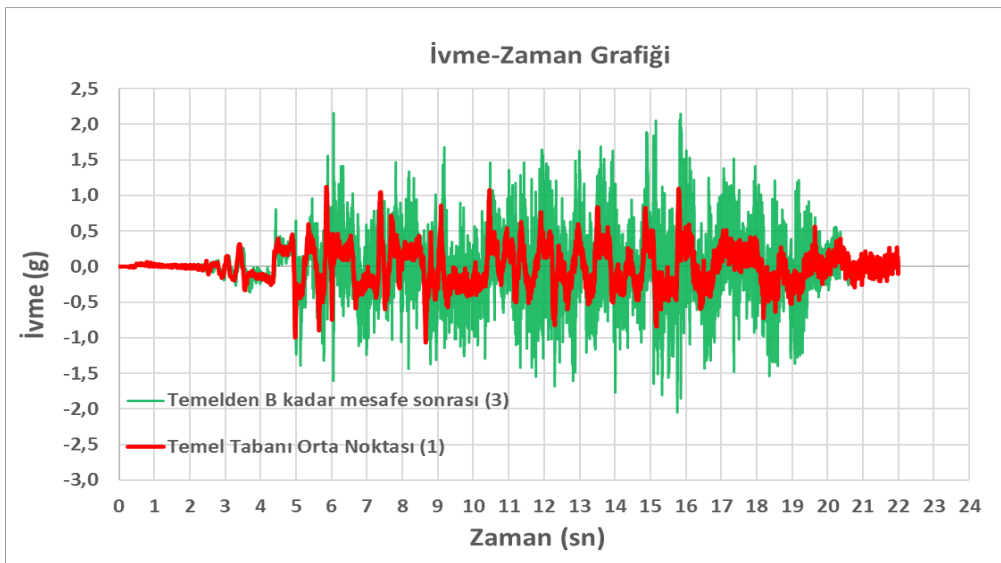
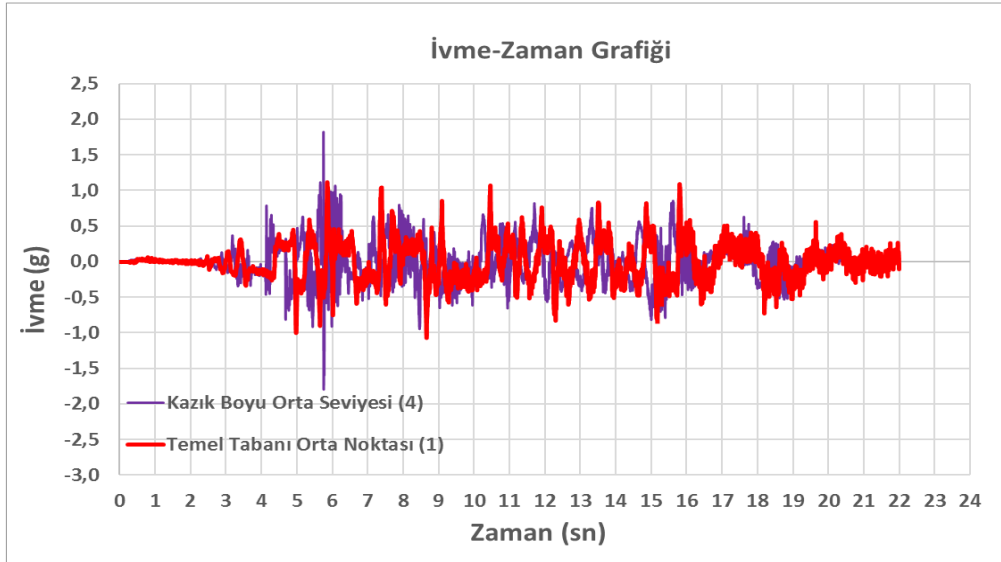
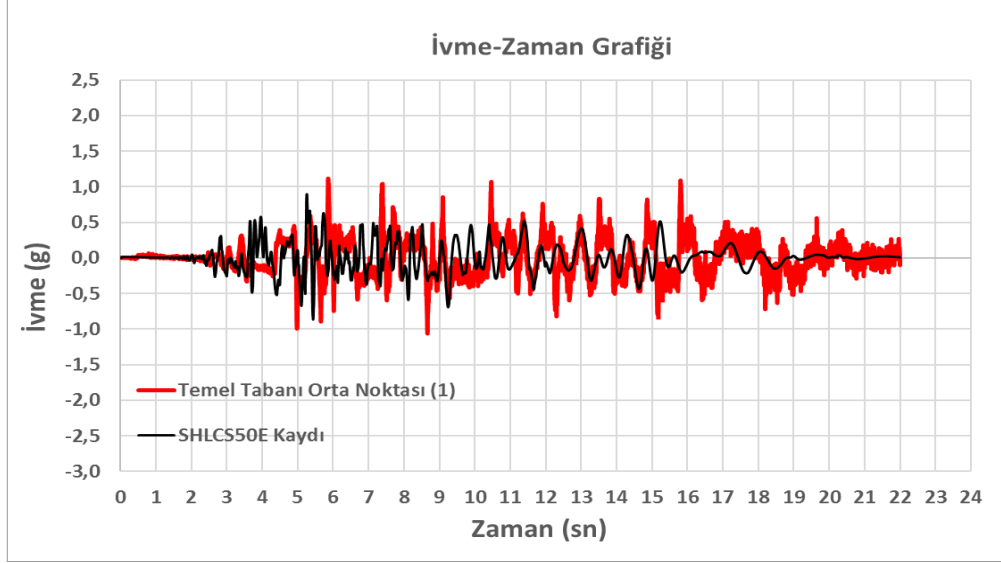
## 4.7.2 SHLCS50E deprem kaydı ile analiz sonuçları

### 4.7.2.1 Yatay ivme kaydı ve tepki spektrumu değişimi

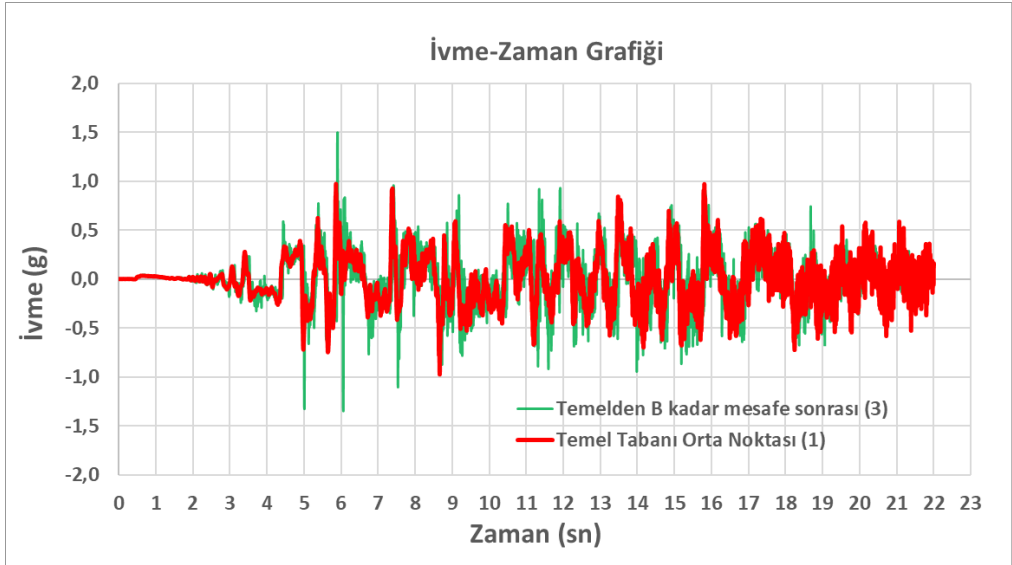
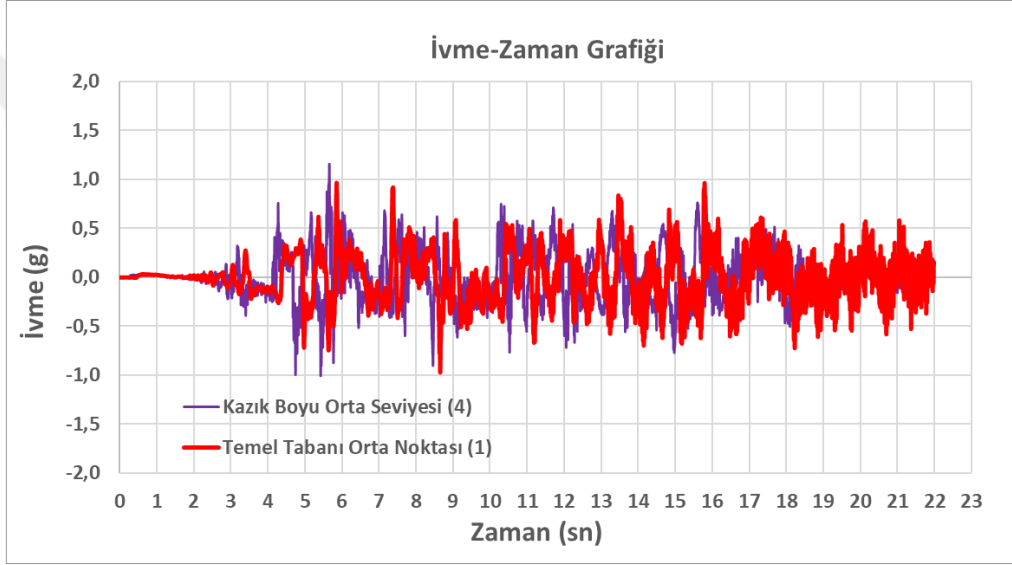
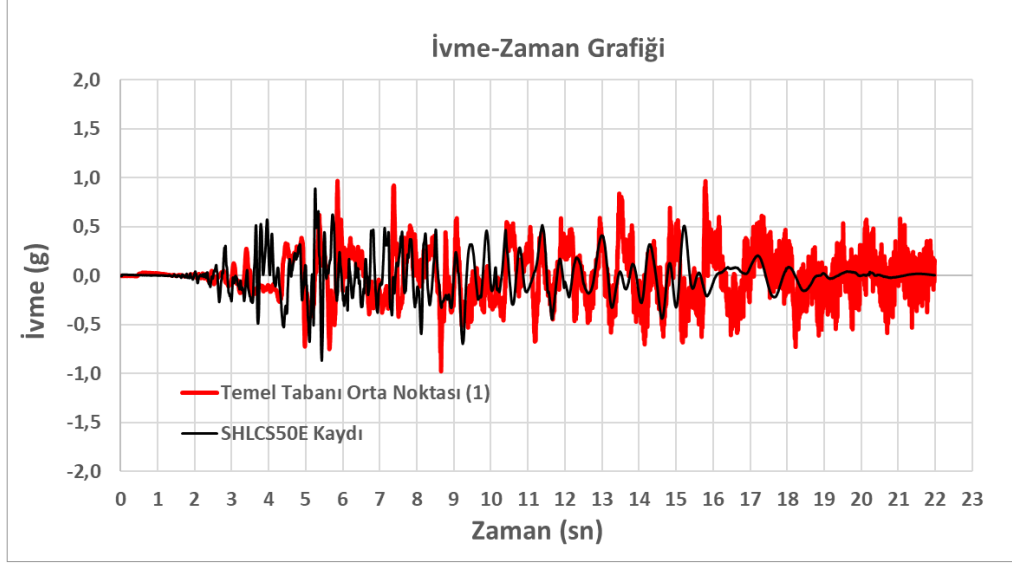
Model-1 , Model 1-2 ve Model 1-3 için şekil 4.26’da belirtilen noktalar için ivme kaydı değişim grafikleri ve temel tabanı orta noktasında elde edilen tepki spektrumu grafiği aşağıdaki şekillerde sunulmuştur (Şekil 4.47- Şekil 4.50).



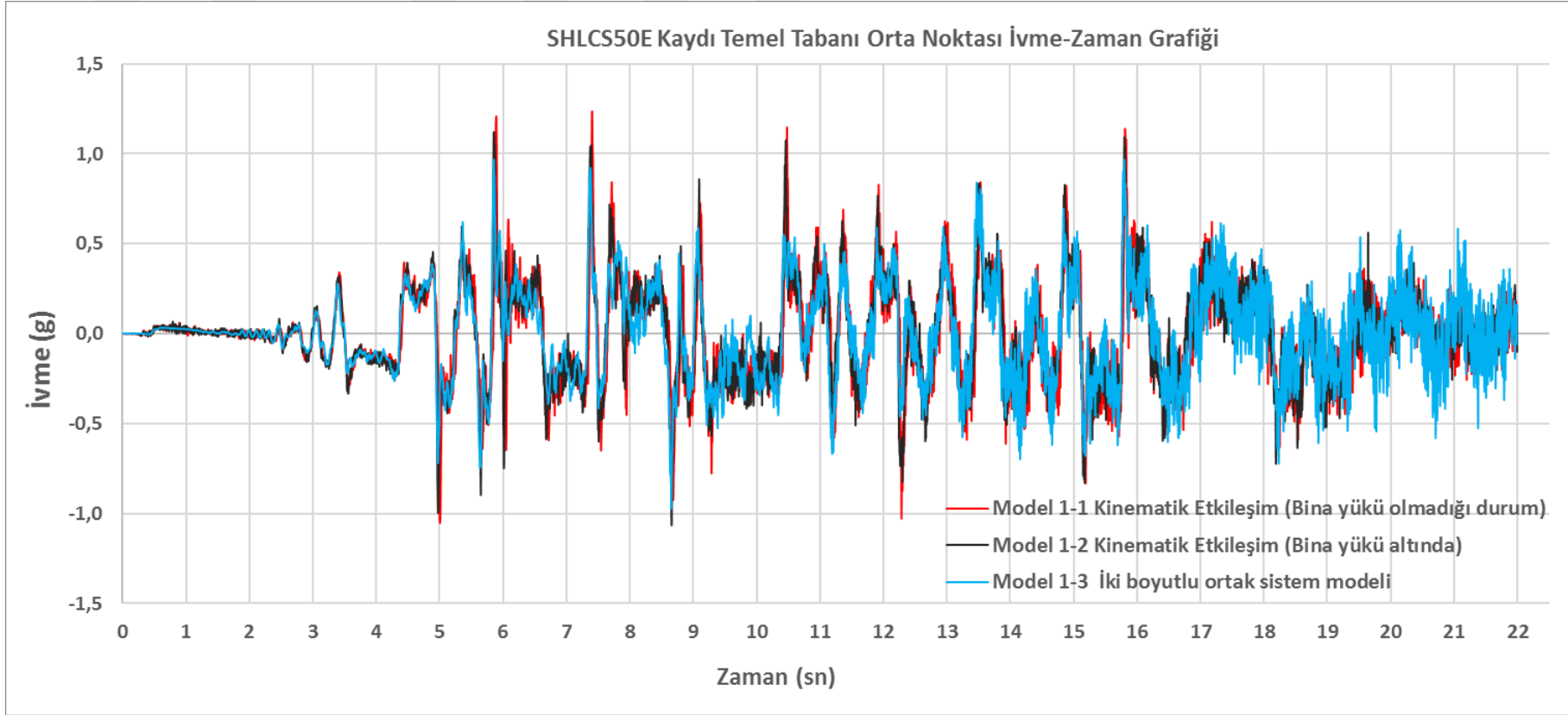
Şekil 4.48 : Model 1-1 Kinematik Etkileşim (Bina yükü olmadığı durum) için ivme kaydı değişimleri.



**Şekil 4.49** : Model 1-2 Kinematik Etkileşim (Bina yükü altında) için ivme kaydı değişimleri.



**Şekil 4.50** : Model 1-3 Üstyapı-Temel-Kazık-Zeminden oluşan iki boyutlu ortak sistem modeli için ivme kaydı değişimleri.

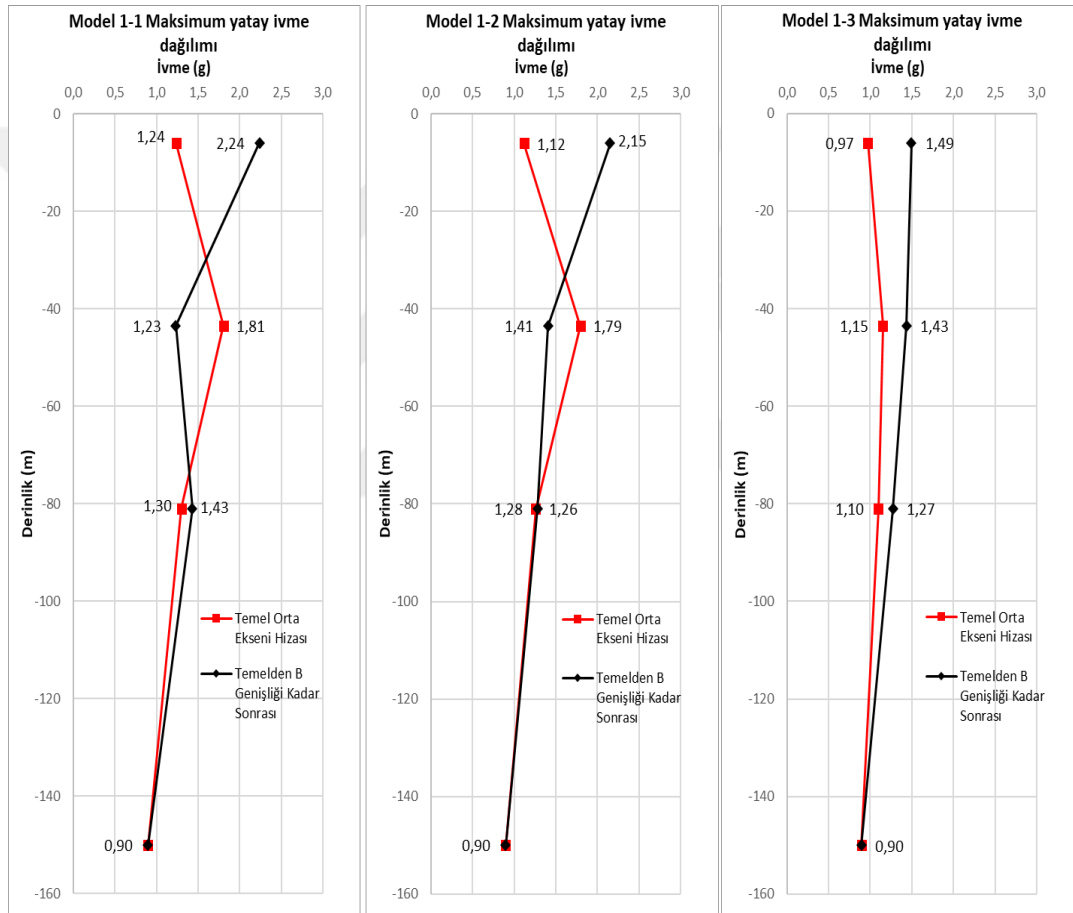


**Şekil 4.51** : SHLCS50E Kaydı Temel orta noktası yatay ivme kaydı değişimi

Model-1’de SHLCS50E kaydı ile yapılan analiz için temel orta eksenini ve temelden temel genişliği “B=30m” kadar uzakta olan noktalar için ivme , hız ve deplasman değerlerinin değişimi aşağıda Şekil 4.51 ve Şekil 4.56’da verilmiştir.

Düşeyde model tabanı-temel tabanı seviyesi arasındaki ivme, hız ve deplasman değerlerinin karşılaştırıldığı eksenler Şekil 4.31a’da , yataydaki değerlerin alındığı eksenler ise Şekil 4.31b’de kesik çizgi ile gösterilmiştir.

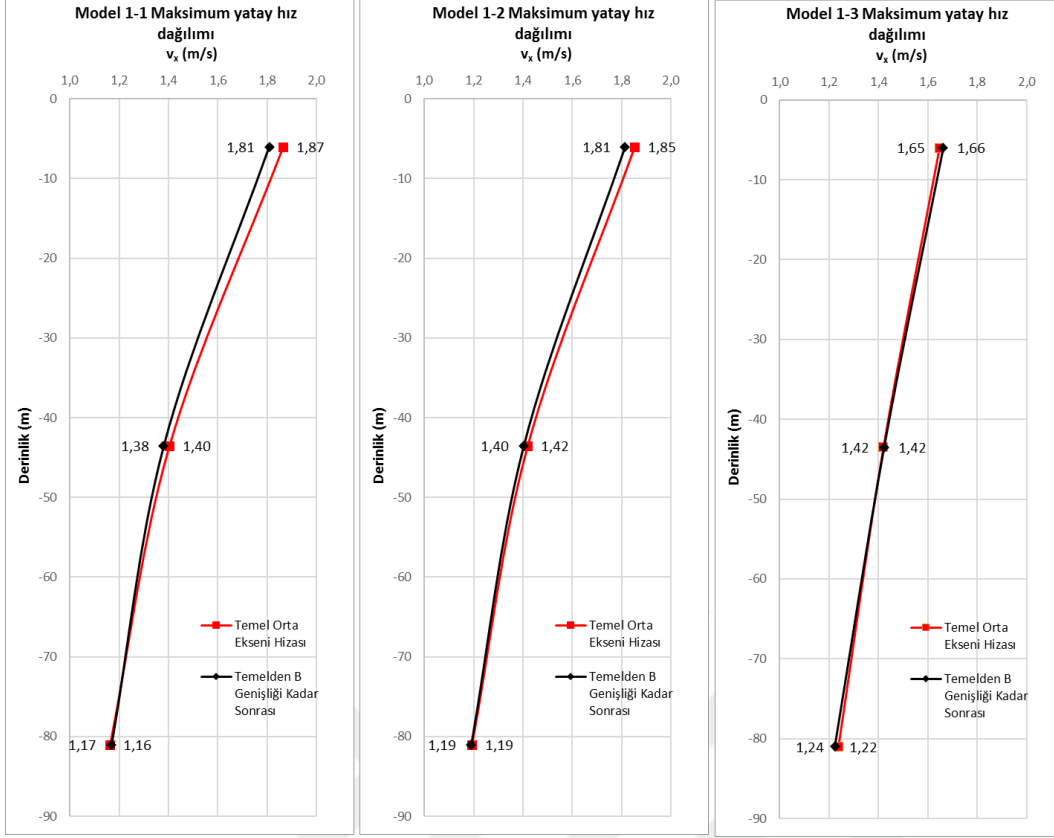
Yataydaki grafikler açısından (Şekil 4.54, 4.55 ve 4.56) Temel orta eksenini belirten “1” nolu nokta  $x=15, y= - 6$  , “3” nolu nokta ise  $x= - 30, y= -6$  koordinatlarındadır.



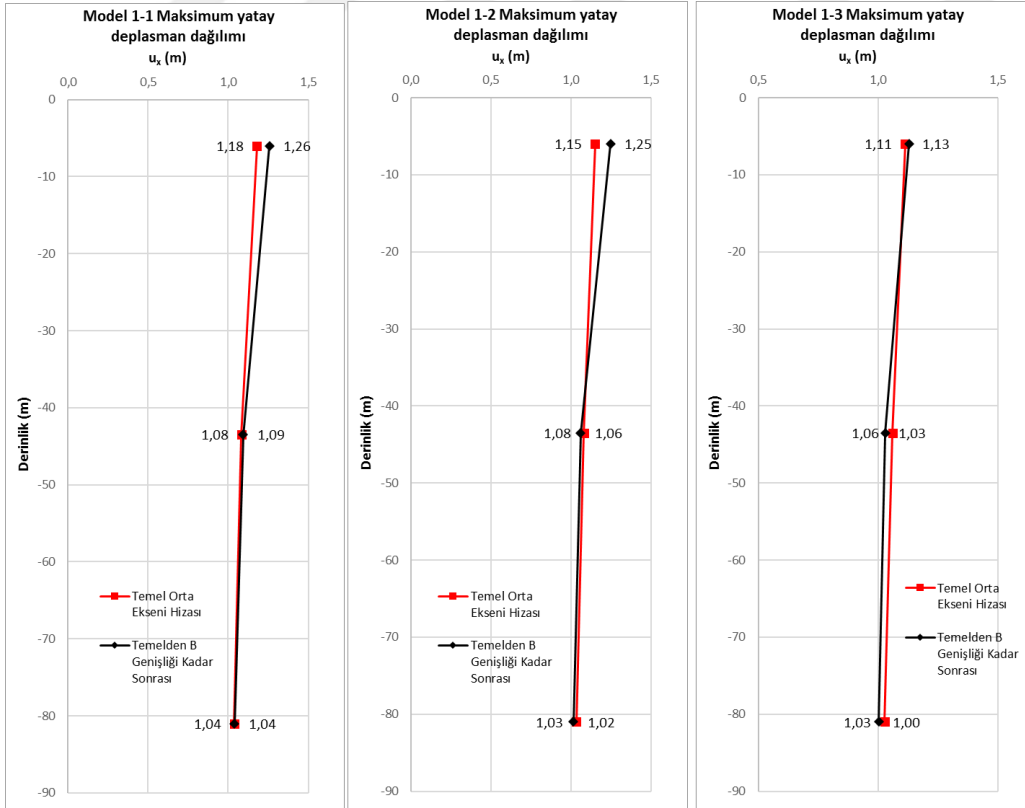
**Şekil 4.52 :** Model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum ivme değerleri

Söz konusu şekiller derinlik boyunca belirli noktaların birleştirilmesi ile elde edilmiştir.

Şekillerde kırmızı renkli çizgiler temel orta eksen hizasında elde edilen değerleri, siyah renkli çizgiler ise temelden temel genişliği kadar sonra elde edilen değerleri göstermektedir.

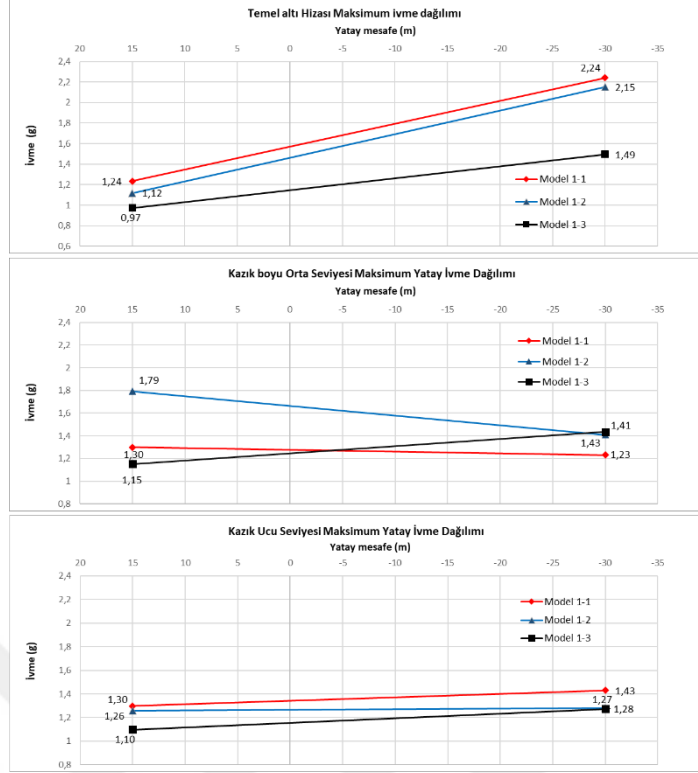


Şekil 4.53 : Model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum hız değerleri.

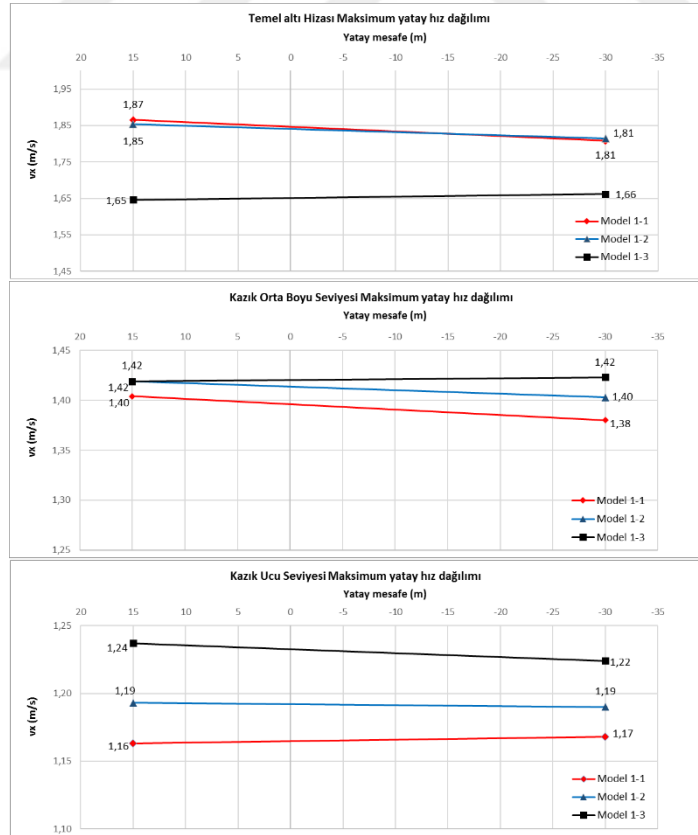


Şekil 4.54 : Model tabanı, kazık ucu seviyesi (5&6), kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve temel tabanı hizası (1&3) noktalarındaki maksimum deplasman değerleri.

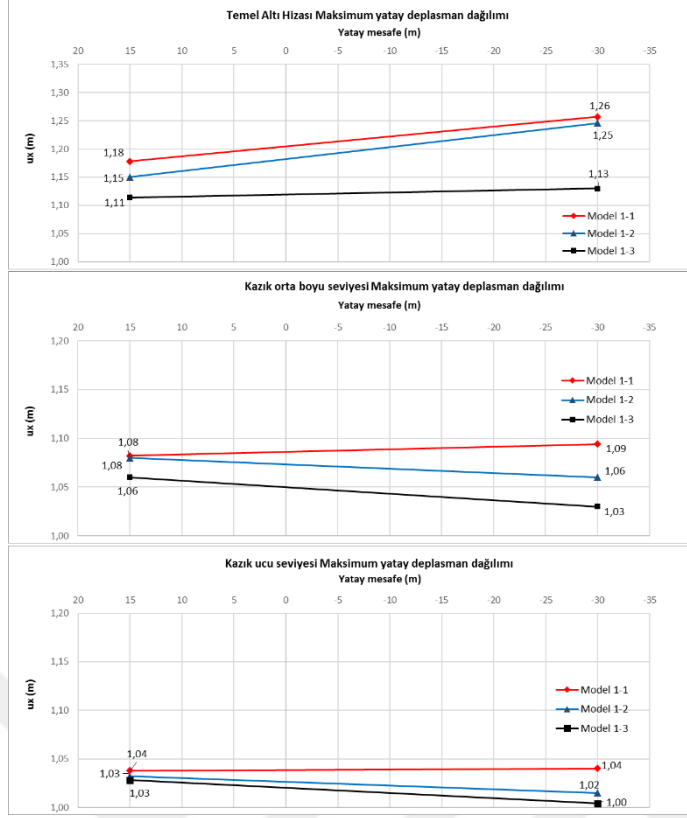




Şekil 4.55 : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum ivme değerleri.

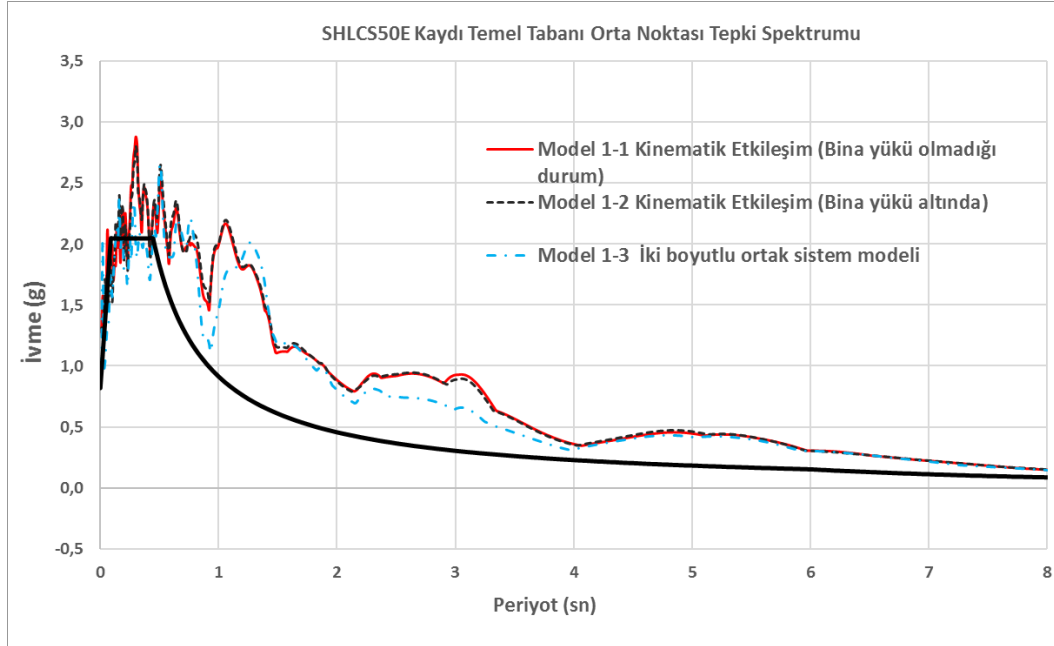


Şekil 4.56 : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum hız değerleri.



Şekil 4.57 : Temel altı hizası (1&3) , kazık boyu orta seviyesi(4&7) ve kazık ucu seviyesi (5&6) arasındaki maksimum deplasman değerleri.

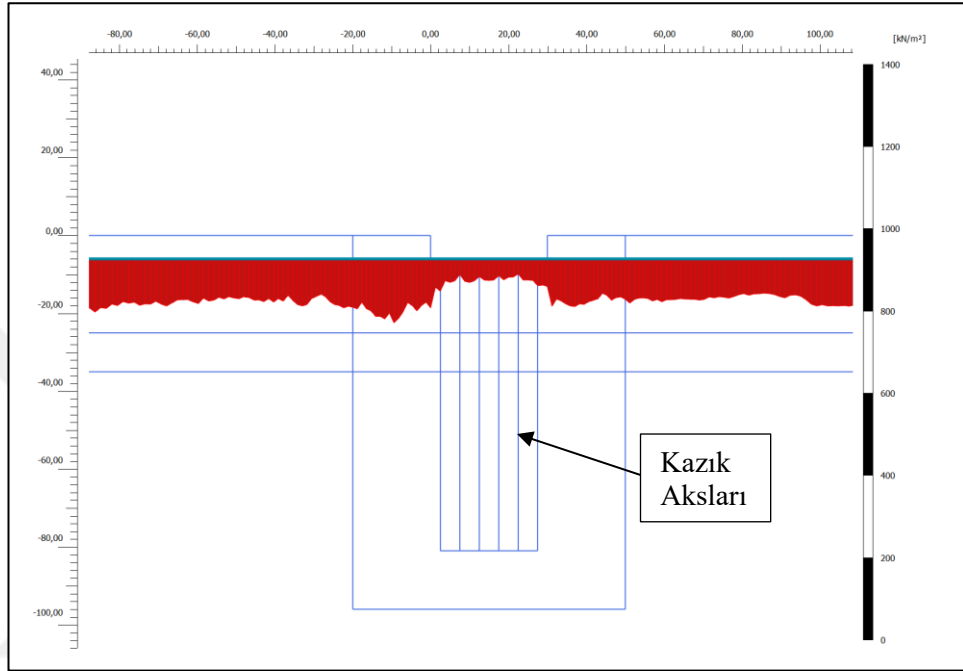
Temel tabanı orta noktasında SHLCS50E kaydı ile yapılan analiz sonucu elde edilen %5 sönümlü tasarım spektrumu grafikleri şekil 4.58’de verilmiştir.



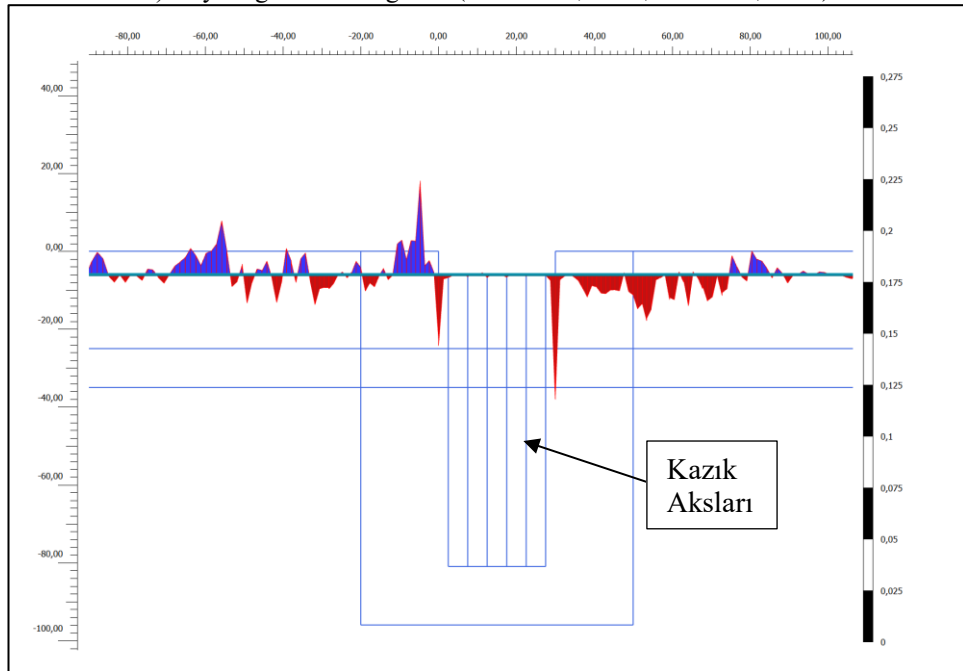
Şekil 4.58 : SHLCS50E kaydı ile analiz sonucu temel tabanı orta noktasında elde edilen %5 sönümlü tepki spektrumu karşılaştırması.

#### 4.7.2.2 Zeminde oluşan kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyonu değerleri

Model 1-1 ,1-2 ve 1-3 için kazık - temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir (Şekil 4.58 – Şekil 4.60).

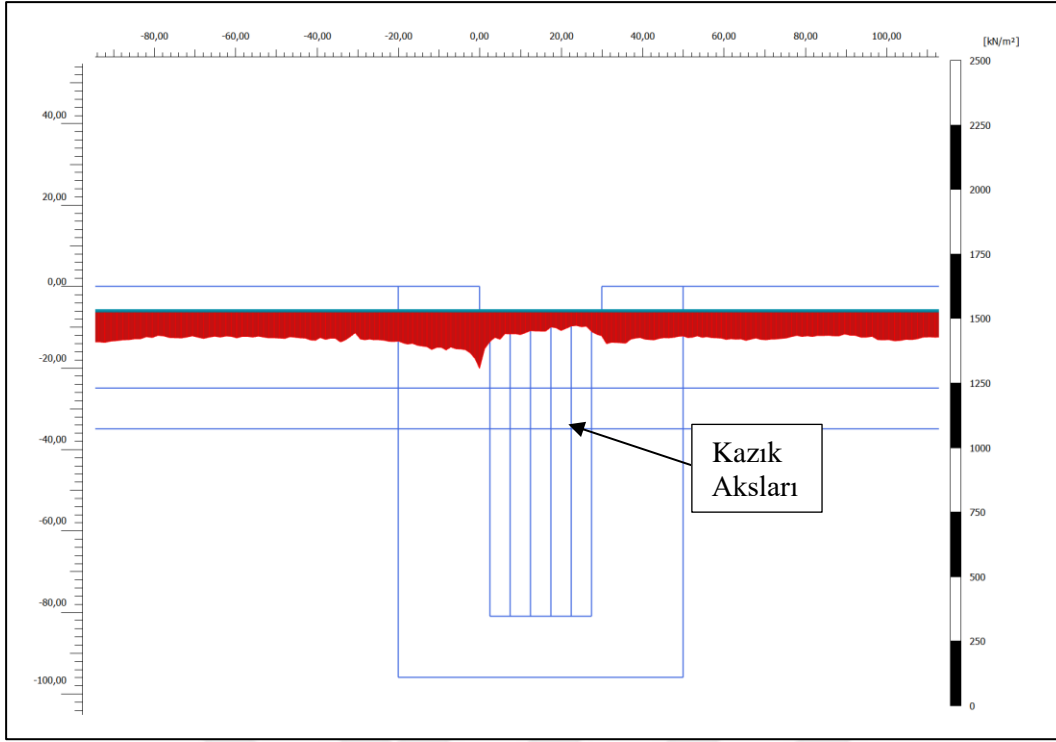


a) Kayma gerilmesi dağılımı (min.: -164,7 kPa, maks -38,9 kPa)

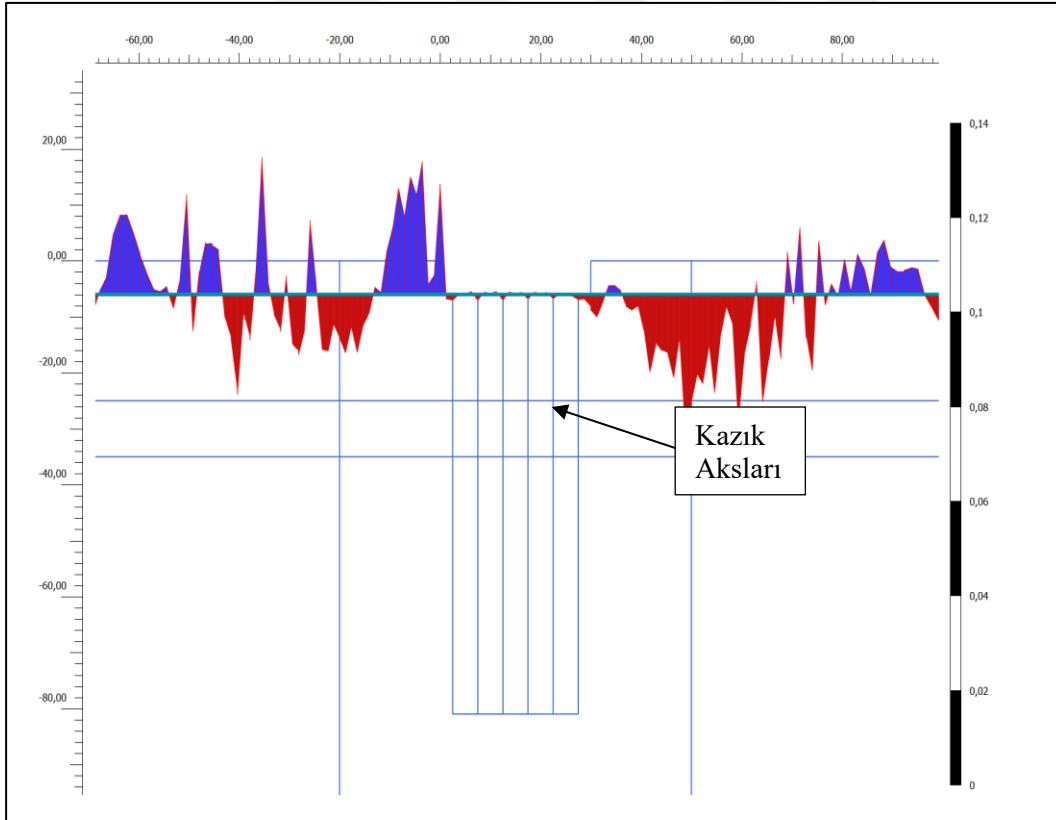


b) Kayma birim deformasyonu dağılımı (min.: -0.06411, maks 0,04820 )

**Şekil 4.59 :** Model 1-1 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme.

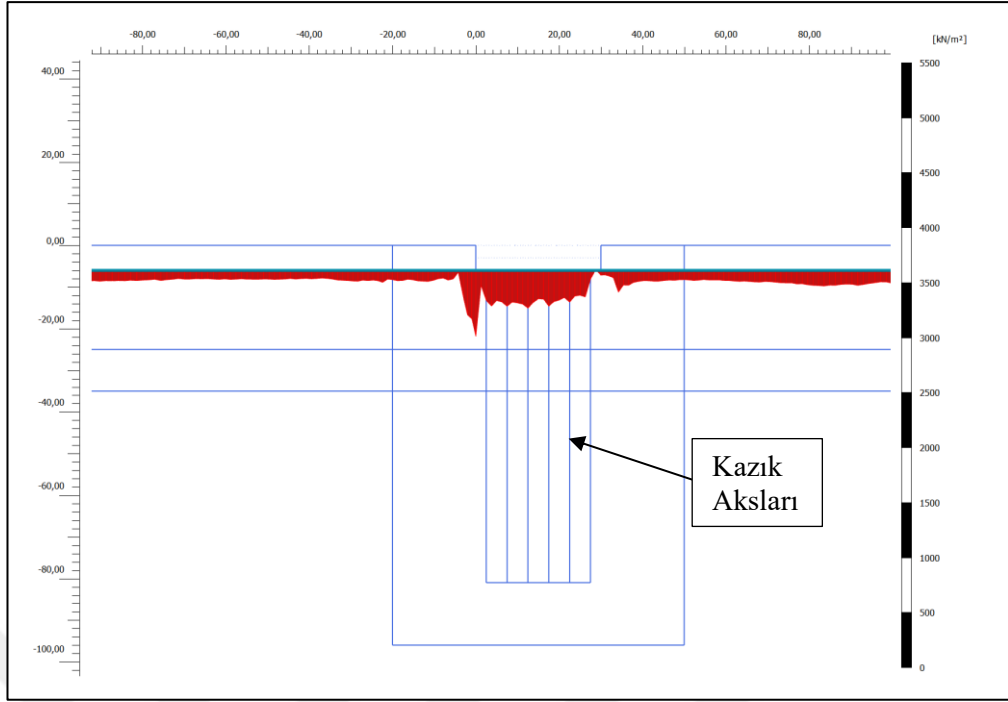


a) Kayma gerilmesi dağılımı (min.: -236,8 kPa, maks -60,60 kPa)

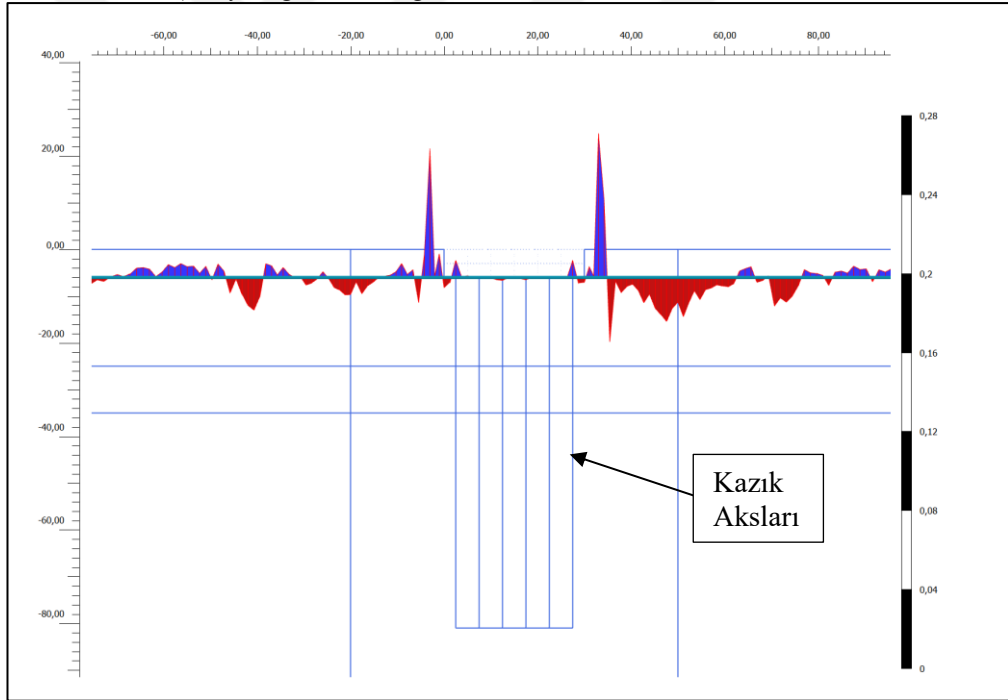


b) Kayma birim deformasyonu dağılımı (min.: -0.03059, maks 0,03061 )

**Şekil 4.60 :** Model 1-2 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme



a) Kayma gerilmesi dağılımı (min.: -634,4 kPa, maks 5,42 kPa)

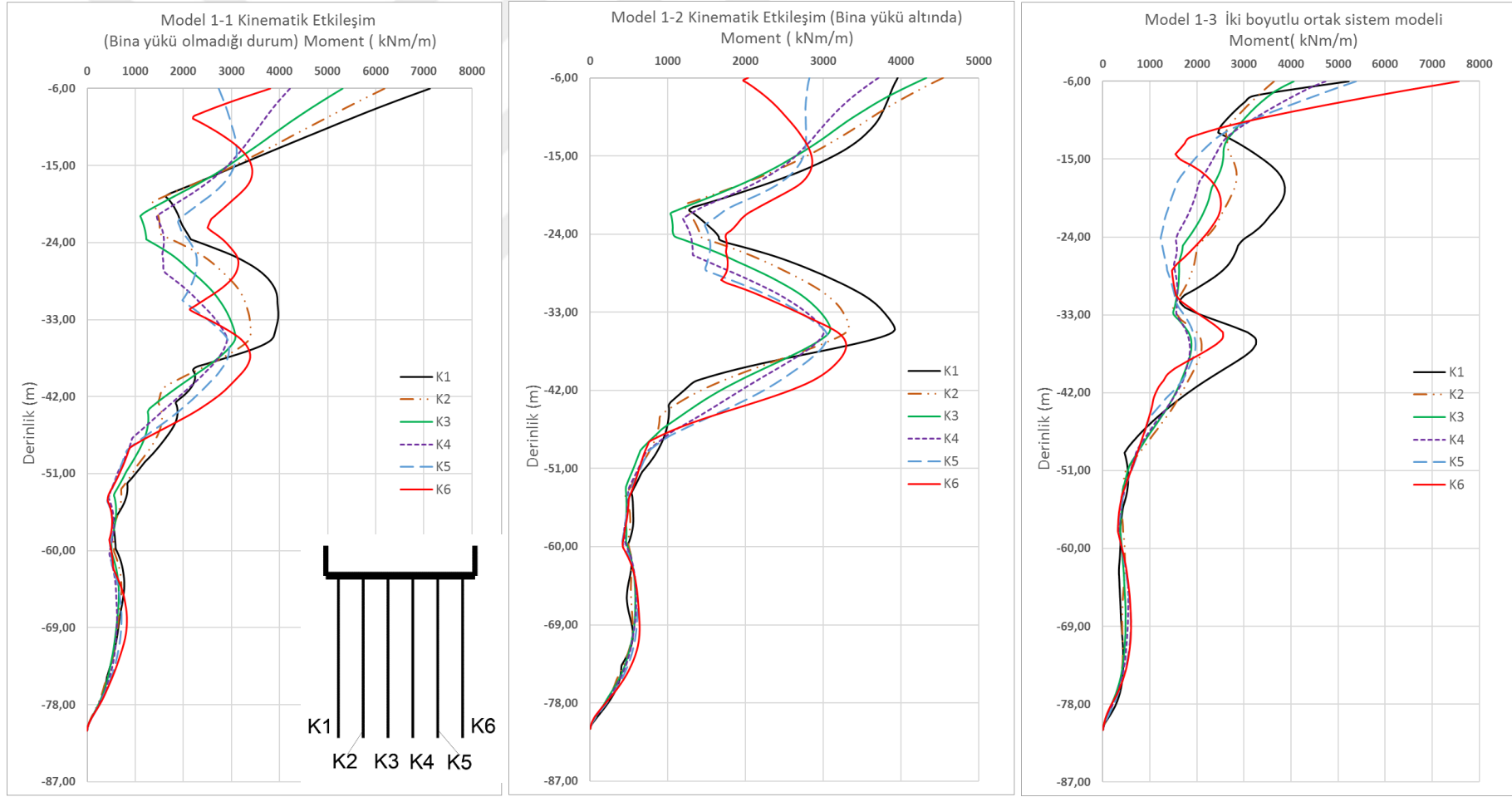


b) Kayma birim deformasyonu dağılımı (min.: -0.03451, maks 0.07713)

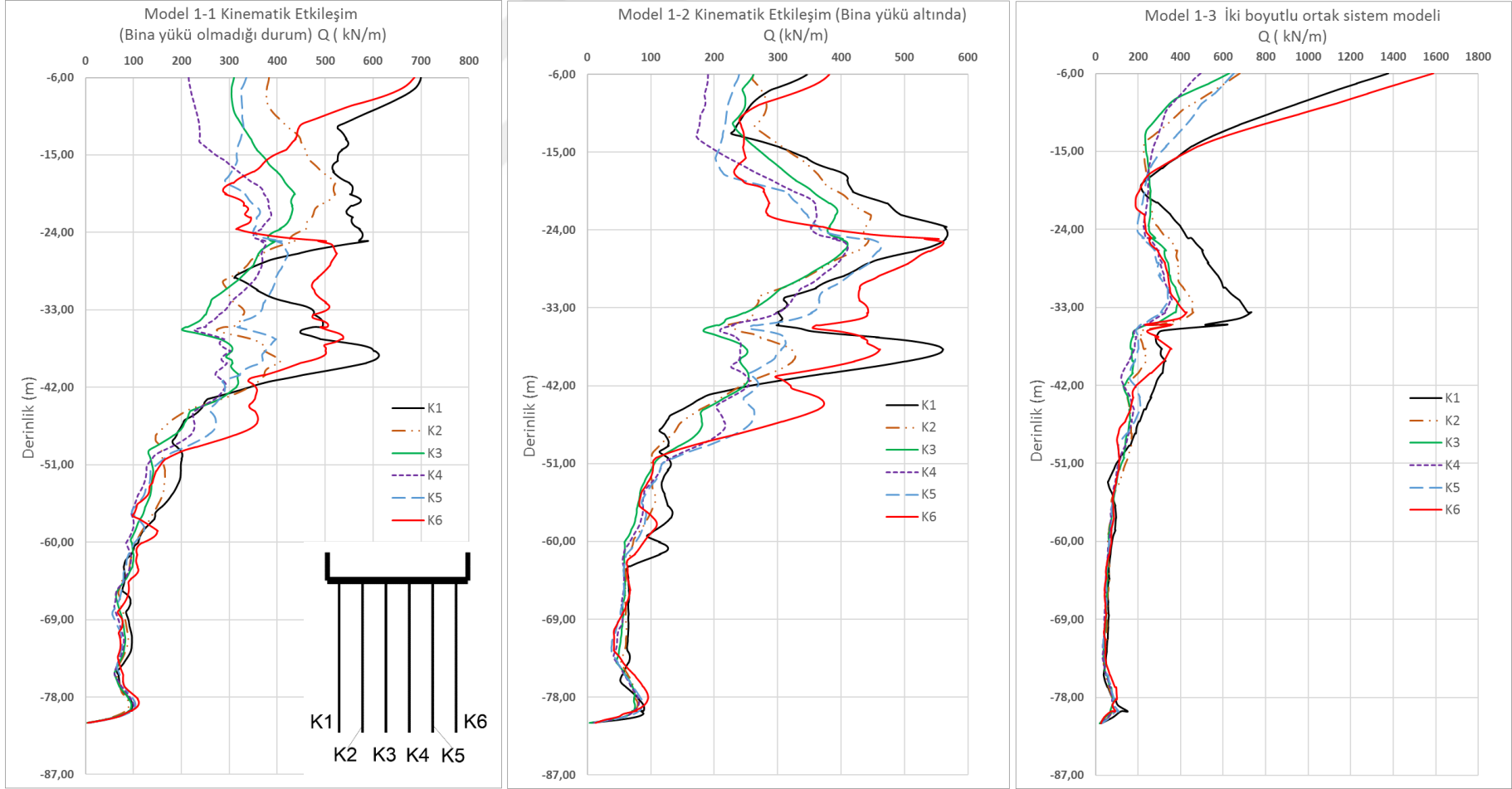
**Şekil 4.61 :** Model 1-3 kazık -temel birleşim bölgesinden geçen eksendeki kayma gerilmeleri ve kayma birim deformasyon değerleri a) kayma gerilmesi , b) kayma birim şekil değiştirme

#### 4.7.2.3 Kazık moment ve kesme kuvveti değerleri

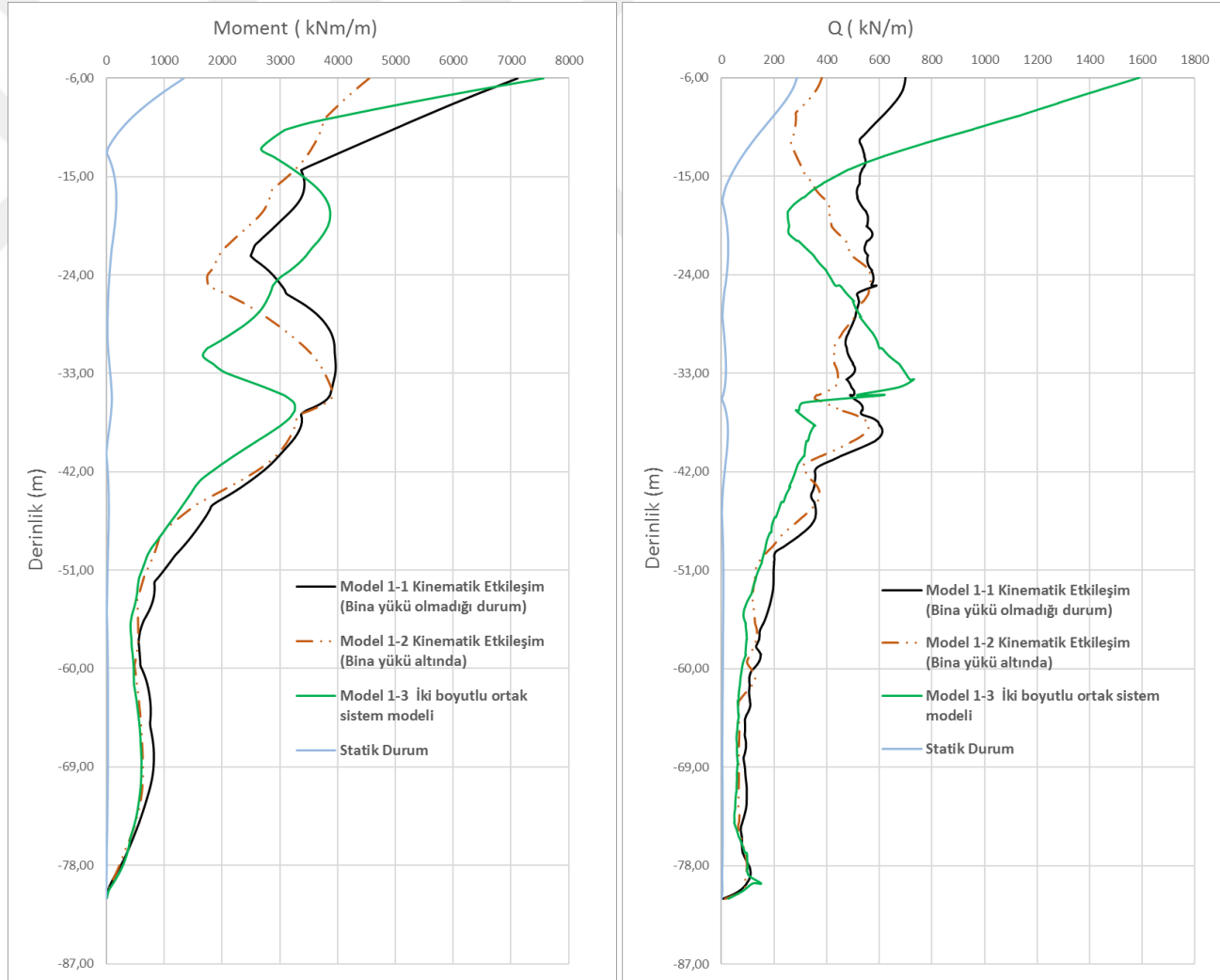
Analizler sonucunda kazıklarda elde edilen kesme kuvveti ve moment değerlerinin dağılımları aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.61 - Şekil 4.65).



Şekil 4.62 : Model -1 SHLCS50E Kaydı ile analiz moment değışim grafikleri.



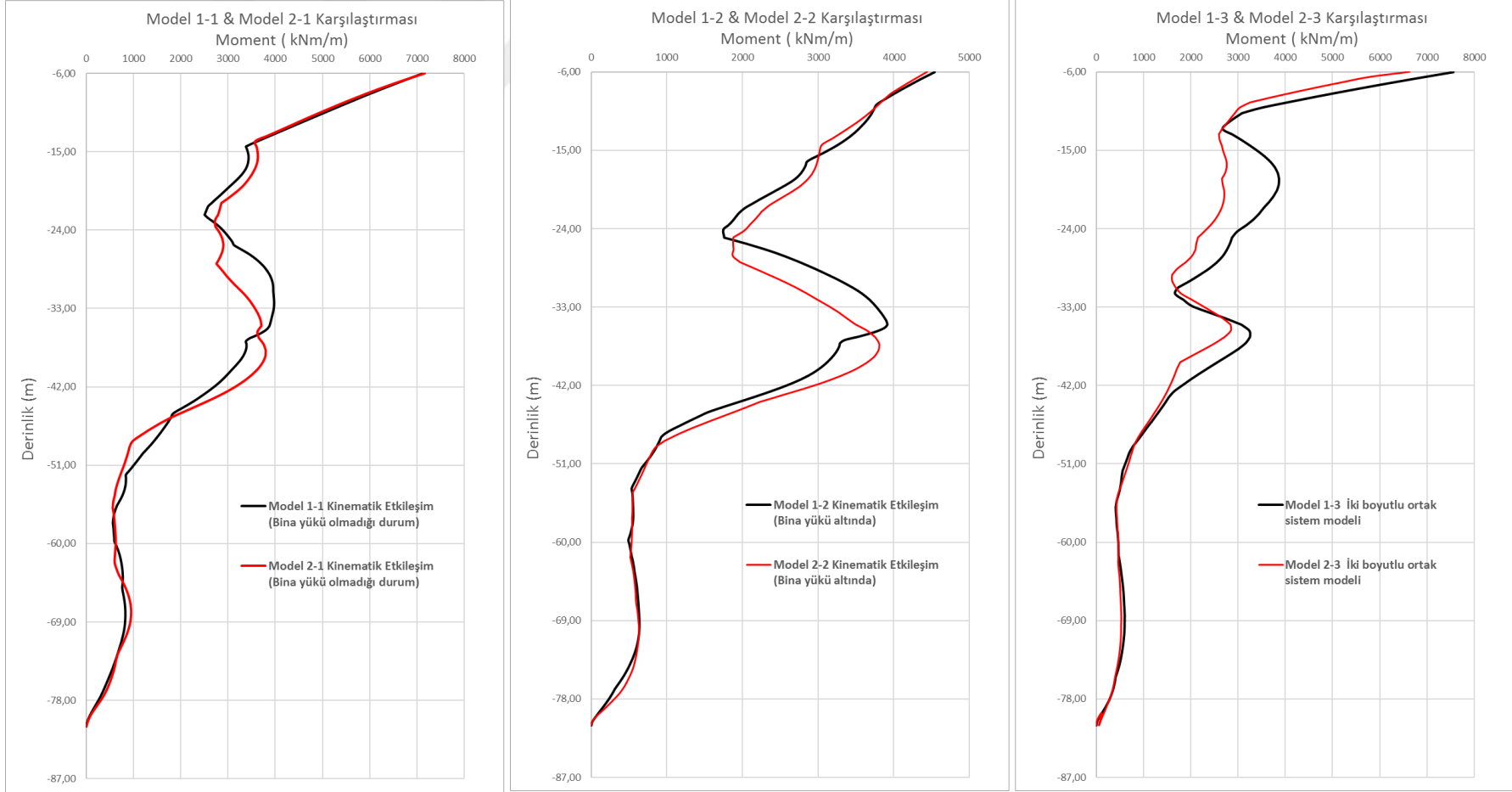
Şekil 4.63 : Model -1 SHLCS50E Kaydı ile analiz Kesme kuvveti değişim grafikleri.



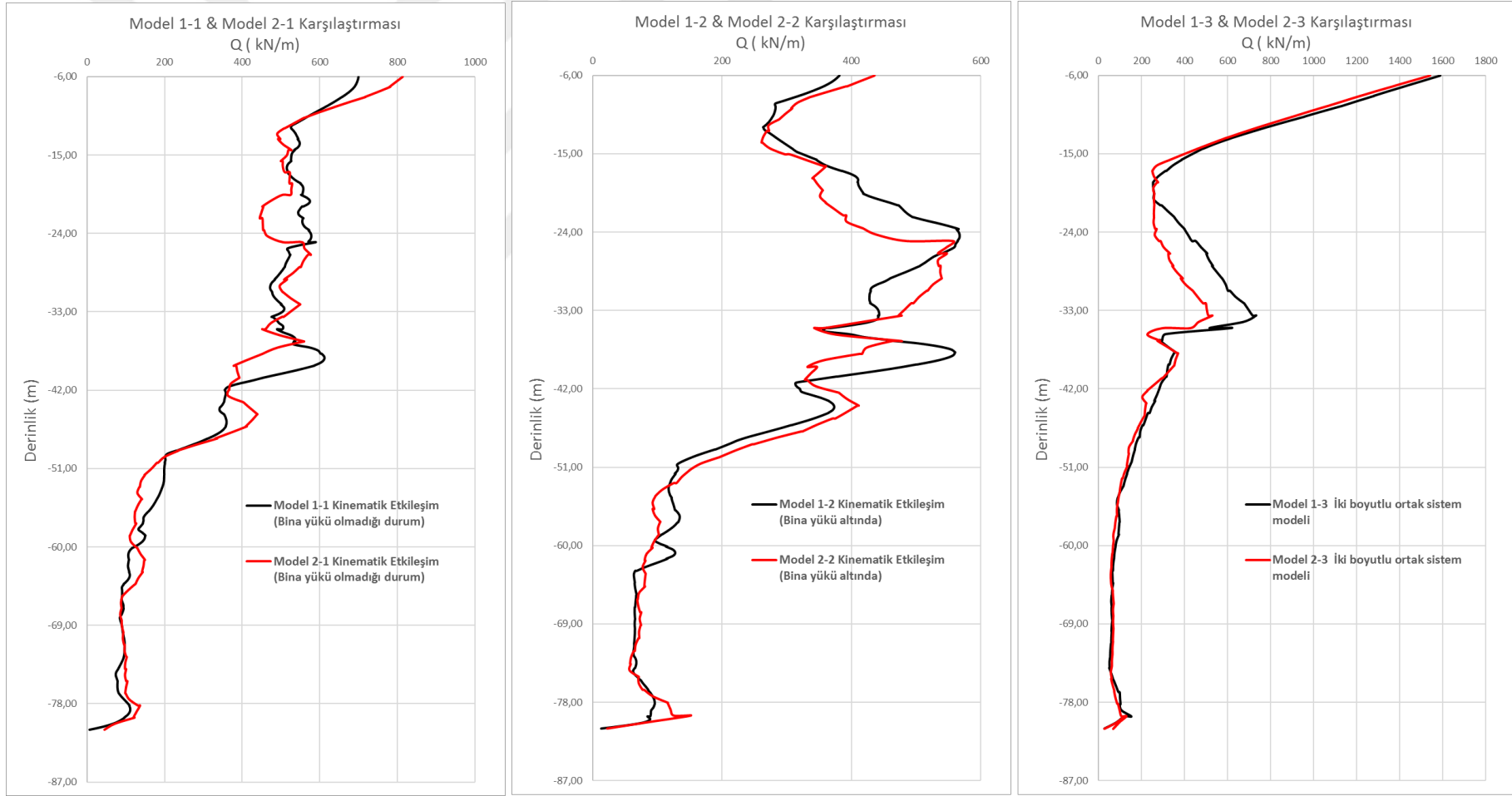
Şekil 4.64 : Model -1 SHLCS50E Kaydı Kesme kuvveti ve Moment Zarfı değişim grafiği.



#### 4.7.3 Model-1 ve model-2 kazıklarda oluşan etkilerin karşılaştırılması



Şekil 4.65 : Model -1 ve Model-2 SHLCS50E kaydı Moment zarfı karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.66 : Model -1 ve Model-2 SHLCS50E kaydı Kesme Kuvveti zarfı karşılaştırma grafiği

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bölüm 4.6.1 ve 4.7.1’de anlatıldığı üzere sonlu elemanlar analiz modelleri üç alt modele ayrılmıştır.

Kinematik etkileşim analizi için 2 alt model :

- **Model 1-1** : Kütlesiz-sonsuz rijit Temel + Kazık+Zemin
- **Model 1-2** :Kütlesiz-sonsuz rijit Temel + Kazık+Zemin+Bina Yüğü

şeklinde oluşturulmuştur. Kinematik etkileşim analizlerinde üstyapı modellenmemiştir.

Üçüncü alt model ise :

- **Model 1-3** :Üstyapı+Temel+Kazık+Zeminden oluşan 2 boyutlu ortak sistem modeli

şeklinde oluşturulmuştur. Model 1-3 ile üstyapının kütlesi ve rijitliği de modellenerek eylemsizlik kuvvetlerinin analiz sonuçlarına etkisi araştırılmıştır.

**Model-2** ise temel genişliği kadar ( $B=30m$ ) mesafe sonrasında ikinci bir yüksek katlı yapı olması durumunu ele alan analizdir. Model-1’in alt modelleri için verilen bilgiler Model-2 alt modelleri (2-1, 2-2 ve 2-3) için de aynen geçerlidir. Model-2’de sadece ilave olarak ikinci bir yapının varlığı göz önüne alınmıştır. Analiz sonuçları açısından yakın mesafede ikinci bir yüksek katlı yapının olması durumunun kazık kesme kuvveti ve moment zarfına olan etkisi verilmiştir. Bölüm 5.1 ve 5.2’de verilen sonuçlar EK.C içerisinde görsel olarak da belirtilmektedir.

### 5.1 Deprem hareketlerinin değişimi

Analizlerde temel tabanı seviyesi, kazık boyu orta seviyesi ve kazık ucu seviyesi için hem yatay hem düşey doğrultuda deprem hareketlerinin değişimleri şekiller halinde bölüm 4 içerisinde verilmiştir. Söz konusu şekiller incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır :

- Temel tabanı orta noktasında elde edilen maksimum ivmeler :

**Model 1-1 > Model 1-2 > Model 1-3** olarak hesaplanmıştır.

- Temel tabanı seviyesinde temelden B genişliği (B=30m) kadar uzakta serbest zemin içerisinde elde edilen maksimum ivmeler :

**Model 1-1 > Model 1-2 > Model 1-3** olarak hesaplanmıştır.

- Maksimum ivme değerleri her üç modelde düşeyde, temel orta eksen hizasında , model tabanından kazık boy orta seviyesine kadar artmakta daha sonra temel seviyesine doğru azalmaktadır. Buna karşın temelden temel genişliği (B=30m) kadar uzakta zemin içerisindeki noktada ise kinematik etkileşim modellerinde model tabanından temel seviyesine doğru maksimum ivmelerin artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.
- Kinematik etkileşim analizlerinde bina ağırlığının yayılı yük olarak göz önüne alınması temel tabanı orta noktasında elde edilen maksimum ivme değerlerinde %10, “B=30m” sonrasında elde edilen maksimum ivme değerlerini ise %5 oranında (bina yükünün dikkate alınmadığı Model 1-1’e göre) azaltmıştır.
- Üstyapı ve temelin kütlelerinin göz önüne alınması (Model 1-3) hem temel tabanı seviyesindeki hem de temel dışındaki ivme kaydını ve maksimum ivme değerlerini değiştirmiştir. Bu değişiklik genel olarak daha düşük ivme değerlerinin ortaya çıkması şeklinde olmuştur. 1-3 modelinde temel tabanı seviyesinde kinematik etkileşim modellerine göre %10-%20 arasında daha düşük pik ivme değerleri elde edilmiştir. Bu fark temel genişliği (B=30m) kadar uzaktaki nokta için %35-%40 oranına çıkmaktadır.

## **5.2 Kazık moment ve kesme kuvveti değerlerinin değişimi**

DD-1 deprem düzeyi ve ZD yerel zemin sınıfı tasarım spektrumuna göre spektral uyuşum sağlanacak şekilde dönüştürülmüş GAZ090 ve SHLCS50E deprem kayıtları altında yapılan analizlere göre moment ve kesme kuvveti değerleri açısından aşağıdaki sonuçlarına ulaşılmıştır.

- Model-1 analiz sonuçlarına göre her iki kayıt için de derinliğe bağlı olarak moment ve kesme kuvveti zarfı incelendiğinde maksimum değerler beklendiği gibi temel-kazık birleşim bölgesinde elde edilmiştir.

- Dinamik analizlerde elde edilen maksimum moment değerleri statik analiz değerlerinin 3 ila 7 katı olmaktadır. Kinematik etkileşim analizi sonucunda elde edilen maksimum moment değerleri statik durumdaki maksimum moment değerinin 3 ila 6 katı arasında , iki boyutlu ortak sistem modelinde ise bu oran 5 ila 7 kat arasında elde edilmiştir.
- Kesme kuvveti değerleri ise kinematik etkileşim analizlerinde statik durumda hesaplanan değer 2 ila 3 katı, iki boyutlu ortak sisteminde ise 3 ile 5 katı olarak hesaplanmıştır.
- Kinematik etkileşim analizleri olarak gerçekleştirilen 1-1 ve 1-2 modellerinde bina yükünün varlığı nedeniyle 1-2 modelinde daha düşük moment ve kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda bina ağırlığının yayılı yük olarak etki ettirilmesi moment ve kesme kuvveti değerlerini bariz oranda azaltmıştır. Moment değerleri için %35-%40 oranında bir azalım söz konusu iken , kesme kuvveti değerinde bu azalım %20-%30 aralığında hesaplanmıştır.
- 1-1 , 1-2 ve 1-3 modelleri incelendiğinde maksimum moment değeri GAZ090 kaydında 1-1 kinematik etkileşim modelinde , SHLCS50E kaydı ile yapılan analizde ise iki boyutlu ortak sistem modelinde (1-3) elde edilmiştir.
- İki boyutlu analiz modellerinde 6 adet kazık yer almaktadır. Bu kazıklar soldan sağa doğru K1, K2, K3, K4, K5 ve K6 olarak adlandırılmıştır. İç (K2, K3, K4, K5) ve köşe kazıklarda (K1 ve K6) oluşan etkiler aşağıdaki gibi gözlemlenmiştir.
  - Kinematik etkileşim modelleri (1-1 ve 1-2) arasında bina yükünün göz önüne alınmadığı modelde (1-1) maksimum moment değeri K6 köşe kazığında gözlemlenirken bina yükü altında yapılan kinematik etkileşim analizinde(1-2) K2 ,K3 iç kazıklarında maksimum moment değerine rastlanılmıştır. Buna ilaveten özellikle köşe kazıklarda 1-2 modelinde kısmen daha sağlam zemin tabakasına geçiş sınırı olan -35m derinlikte temel-kazık birleşim bölgesindekinden daha fazla veya yakın mertebelerde moment değerleri hesaplanmıştır.
  - 1-3 modeli moment dağılımlarında ise genel olarak kazıklarda oluşan etkilerin birbirine yakınsadığı, her iki depremlili analizde de maksimum etkinin K6 köşe kazığında olduğu görülmüştür.

- 1-1,1-2 kinematik etkileşim ve 1-3 iki boyutlu ortak sistem modellerinde elde edilen kesme kuvveti dağılımları en fazla zorlanan kazıkların K1 ve K6 köşe kazıkları olduğunu göstermektedir. Kinematik etkileşim modellerinde bina yükünün göz önüne alınmasıyla köşe kazıklarında tabaka geçiş sınırları olan -25m ve -35m derinliklerde gözlemlenen kesme kuvveti değerlerinde ciddi bir artış ortaya çıktığı görülmüştür. Hatta SHLCS50E kaydı ile yapılan analiz sonuçları incelendiğinde maksimum kesme kuvveti değerinin temel seviyesinde değil -25m ve -35m tabaka geçiş sınırlarında oluştuğu görülecektir. (Şekil 4.42 ,4.43). 1-3 modelinde ise en fazla zorlanmaların temel seviyesinde olduğu ancak benzer şekilde tabaka geçiş seviyelerinde kısmi artışların yaşandığı gözlemlenmiştir.
- İki boyutlu ortak sistem modeli (1-3) ile üstyapının ve kütesinin göz önüne alınmadığı 1-1 kinematik etkileşim modelinde benzer mertebelerde kazık kuvvetlerine rastlanmıştır. Ancak diğer kinematik etkileşim modeli (1-2 : üstyapının ağırlığını yayılı yük olarak göz önüne alan) ile sonuçlar karşılaştırıldığında iki boyutlu ortak sistem modelinde yaklaşık olarak %60 daha fazla kazık kuvvetleri oluştuğu anlaşılmıştır.
- Model -2 ile yapılan analizler sonucunda yakın mesafede aynı özellikte yüksek katlı-derin temelli başka bir yapının varlığı tek binanın göz önüne alındığı Model-1'e göre aşağıdaki değişikliklere yol açmıştır :
  - Kinematik etkileşim analizlerinden elde edilen moment değerleri açısından ikinci bir yapının varlığı hesaplanan değerler üzerinde  $\pm$  %1 mertebelerinde bir etkiye sahiptir. Ancak iki boyutlu ortak sistem modelinde ise bu etkinin maksimum moment değerini %6 ~%12 oranında azaltacak şekilde olduğu tespit edilmiştir.
  - Kesme kuvveti değerlerinin ise ikinci yapının varlığı ile artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Kinematik etkileşim modellerinde bu artış oranının %1~%15, iki boyutlu ortak sistem modellerinde ise %1~%10 mertebelerinde olduğu anlaşılmıştır.

- Dolayısıyla yapılan analizler sonucunda ikinci yapının moment değerleri açısından azaltıcı, kesme kuvvetleri açısından ise arttırıcı yönde etkileri olduğu tespit edilmiştir.







## KAYNAKLAR

- Akgün, M., Özdağ, Ö. C., Uluğ, A., Utku, M., Erdican, B., Şenkal, G., & Altundağ, T. K.** (2015). Bayraklı Belediye Sınırları İçinde Yüksek Katlı Yapılar İçin 1-2 Boyutlu Zemin Ana Kaya Modellerinin Tanımlanmasına Yönelik Jeolojik, Jeofizik ve Geoteknik Çalışmalar. *Türkiye Deprem Mühendisliği*. İzmir.
- API.** (1987). Recommended Practice For Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. 17. Washington D.C.: American Petroleum Institute.
- API.** (1993). Recommended Practice For Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working stress design. 20. Washington D.C.: American Petroleum Institute.
- API WSD RP-2A.** (2000). *Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*. American Petroleum Institute.
- Axtell, P. J., & Stark, T. D.** (2008). Increase in Shear Modulus by Soil Mix and Jet Grout Methods. *The Journal of the Deep Foundations Institute*, 11-21. doi:10.1179/dfi.2008.002
- Aydınoğlu, M. N.** (2011). *Zayıf zeminlerde yapılan binalarda dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi için uygulamaya yönelik bir hesap yöntemi*. Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı. İzmir: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi.
- Aydınoğlu, M. N.** (2012, Nisan 12). *Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi*. İzmir: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi.
- Budhu, M.** (2011). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Çelebi, E.** (2005). *Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi*. Hazırlanmış Ders Notları.
- Çelik, İ. D., Mehmet, F., Sivri, M., Kımillı, N. A., & Bayraktar, D.** (2015). Fema (273, 356, 368, 369, 440), Eurocode 8 ve DBYBHY (2007) Yönetmeliklerinde Yapı-Zemin Etkileşimi Problemi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 2(5), 19-29.
- Çetin, K., Bilge, T., Yunatçı, A., Siyahi, B., & Unsal, S.** (2013). Yüksek katlı yapı sistemlerinde sismik zemin-kazık- radye-yapı etkileşimi üzerine bir değerlendirme.
- Das, B. M., & Ramana, G. V.** (2011). *Principles of Soil Dynamics*. Stamford: Cengage Learning.
- DBYBHY.** (2007, Mart 06). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Fahjan, Y. M.** (2008). Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007). *İMO Teknik Dergi*, 4423-4444.
- Gazetas, G.** (1991). *Foundations Vibrations* (2nd ed.). (H. Fang, Ed.) New York: Chapman and Hall.
- Gibson, R. E.** (1953). Experimental Determination of the True Cohesion and True Angle of Internal Friction in Clays. *Proceedings of the Third International*

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1*, s. 126-130. Zurich.
- Graizer, V., & Kalkan, E.** (2009). Prediction of Spectral Acceleration Response Ordinates Based on PGA Attenuation. *Earthquake Spectra*, 25(1), 39-69.
- Han, J.** (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Hardin, B., & Drnevich, V.** (1972). Shear modulus and damping in soils : Design equations and curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(SM7), 667-692.
- Hashash, Y. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D.** (2016). DEEPSOIL 6.1, User Manual. Urbana, IL: Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kalkan, E., & Chopra, A. K.** (2010). *Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010 .
- Kausel, E.** (2010). Early history of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), 822-832.
- Kausel, E., Whitman, A., Murray, J., & Elsabee, F.** (1978). The Spring Method for Embedded Foundations. *Nuclear Engineering and Design*, 48.
- Kolk, H., & Velde, V.** (1996). A reliable method to determine the friction capacity of piles driven into clays. *Proc. of the 28th Annual Offshore Technology Conference*, (s. 337-346). Texas.
- Kramer, S. L.** (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Kuhlemeyer, R., & Lysmer, J.** (1973). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 99 (5), 421-427.
- Kuruoğlu, Ö., Horoz , A., & Erol, O.** (2011). Sert Killerde Tekrarlı Deprem Yükleri Altında Kazık-Zemin Etkileşiminin Modellenmesi : p-y Eğrileri. *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*. Ankara.
- Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J.** (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic and Professional.
- Midas GTS NX.** (2015, February 17). Retrieved from Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=OYKfO8Fbmb4>
- NEHRP, C. J.** (2012). *Soil-Structure Interaction For Building Structures ,NIST GCR 12-917-21*. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology.
- Nikolaou, A. S.** (1998). *A gis platform for earthquake risk analysis*. ( Ph.D Dissertation) State University of Newyork at Buffalo.
- Önalp, A., & Sert, S.** (2016). *Geoteknik bilgisi III bina temelleri*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Özdemir, Z., & Fahjan, M. Y.** (2007). Gerçek Deprem Kayıtlarının Tasarım Spektrumlarına Uygun Olarak Zaman ve Frekans Tanım Alanlarında Ölçekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, (s. 435-446). İstanbul.
- Özkan , M. Y.** (2017). *Zemin Dinamiğine Girişi*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Özsoy, B., & Durgunoğlu, T.** (2003). Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*. İstanbul.

- Pando, M. A.** (2013). Analyses of Lateral Loaded Piles with P-Y Curves - Observations on the Effect of Pile Flexural Stiffness and Cyclic Loading. *NCDOT 7th Geotechnical Conference*.
- Pecker, A.** (2007). Soil Structure Interaction. *Advanced Earthquake Engineering Analysis* (s. 33-42). içinde Udine: SpringerWienNewyork.
- PEER.** (tarih yok). *Ground Motion Database*. <https://ngawest2.berkeley.edu/> adresinden alındı
- Plaxis.** (2019). Material Models Manual.
- Randolph, M., & Murphy, B.** (1985). Shaft capacity og driven piles in clay. *Proc. of the 17th Annual Offshore Technology Conference*, (s. 371-378). Texas.
- Richart, F. E., & Whitman , R. V.** (1967). Comparison of Footing Foundation Tests with Theory. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 93, 143-167.
- Roesset, J., Whitman, R., & Dobry, R.** (1973). Modal Analysis for Structures with Foundation with Foundation Interaction. *Journal of Structural Engineering Division*, 99, 89-416.
- Seismomatch.** (2019). Seismosoft Web site: <https://www.seismosoft.com/> adresinden alındı
- Sluis, J.** (2012). *Validation of embedded pile row in PLAXIS 2D*. MSc Thesis, Delft University of Technology.
- TBDY.** (2018, Mart 18). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmi Gazete.
- Vanmarcke, E. H.** (1979). *State of Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States : Representation of Earthquake Groun Motions-Scaled Accelograms and Equivalent Reponse Spectra*. Miscellaneous Paper S-73-1, US Army Corps of Engineers Waterways Expreriment Station, Mississippi.
- Vucetic, M., & Dobry, R.** (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107.
- Wolf, J. P.** (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction*. New Jersey: Printice Hall.



## **EKLER**

### **EK A: Sondaj Logları ve Laboratuvar Deney Sonuçları**

Not :Sondaj loglarında proje, koordinat, sondajı yaptıran ve logu hazırlayan kısımlardaki bilgiler gizlilik çerçevesinde kaldırılmıştır.



TEMEL SONDAJ LOGU																			
Sondaj No		SK-1/1		Yeraltı Suyu Durumu															
Sondaj Derinliği (m)		40,00		Derinlik		2,00													
Zemin Kotu (m)		0,00		Tarih		13-5-13													
Koordinatlar E.W.(X)				Saat															
Koordinatlar N.S.(Y)				Açıklama		VAR													
Proje				Sondaj Firması/Sondör															
Yeri ( İl/ilçe/Belediye )				İzmir- Karşıyaka				Makina Tipi		D 500									
Yaptıran				Sondaj Metodu															
Logu Hazırlayan				Başlama/Bitiş Tarihi															
DERİNLİK		ÖRNEK - SAMPLE				STANDART PENETRASYON						ZEMİN TANIMLAMASI		KAYA ÖZELLİKLERİ					
DEPTH		Tabaka Derinliği (m)		Muhafaza Borusu		DARBE		N30		SPT - GRAFIK									
(m)						15 30 45		N30		10 20 30 40 50									
1														DOLGU (0,00-2,00m)					
2																			
3				SPT1		3,00-3,45		1 1 1		2				SİLT üst seviyeler sarımsı kahve renkli, altında Yeşilimsi gri renkli, ince kum- silt karışımı					
4																			
5				SPT2		4,50-4,95		1 1 1		2									
6				SPT3		6,00-6,45		UD1						KİL Yeşilimsi gri renkli,					
7																			
8				SPT4		7,50-7,95		4 4 6		10				SİLT Yeşilimsi gri renkli, ince kum- silt karışımı (7,50- 12,50m)					
9				SPT5		9,00-9,45		4 6 11		17									
10																			
11				SPT6		10,50-10,95		6 11 10		21									
12				SPT7		12,00-12,45		9 8 10		18				KİL Yeşilimsi gri-koyu gri renkli kil yer yer silt bantları geçişli (12,50-					
13																			
14				SPT8		13,50-13,95		2 3 5		8				SİLT Yeşilimsi gri renkli, ince kum- silt karışımı (7,50- 12,50m)					
15				SPT9		15,00-15,45		UD2											
16																			
17				SPT10		16,50-16,95		3 4 3		7				KİL Yeşilimsi gri-koyu gri renkli kil yer yer silt bantları geçişli (12,50- 32,00m)					
18				SPT11		18,00-18,45		4 3 3		6									
19																			
20				SPT12		19,50-19,95		3 3 5		8									
ZEMİN DEĞERLENDİRİLMESİ										KAYA DEĞERLENDİRİLMESİ									
İNCE DANELİ (Kohezyonlu)				İRİ DANELİ (Kohezyonsuz)				PLASTİSİTE (PI)				KAYA KALİTESİ (ROD %)		ÇATLAK SIKLIĞI (M)		AYRISMA DERESESİ (W)			
N : 0-2 Çok Yumuşak				N : 0-4 Çok Gevşek				PI:1-6 Çok Az				0-25 Çok Zayıf		M1 < 1 Masif		W1 Taze (Ayrılmamış)			
N : 2-4 Yumuşak				N : 5-10 Gevşek				PI:6-10 Az				25-50 Zayıf		M2 = 1-3 Az Çatlaklı-Kırıklı		W2 Az Ayrılmış			
N : 4-8 Orta Katı				N : 11-30 Orta Sıkı				PI:10-20 Orta				50-75 Orta		M3 = 3-10 Kırıklı		W3 Orta Derecede Ayr.			
N:8-15 Katı				N : 31-50 Sıkı				PI:20-40 Yüksek				75-90 İyi		M4 = 10-50 Çok Çatlaklı-Kırıklı		W4 Ayrılmış			
N > 30 Sert				N > 50 Çok Sıkı								90-100 Çok İyi		M5 > 50 Parçalanmış		W5 Tamamen Ayrılmış			







TEMEL SONDAJ LOGU

Sondaj No	SK-2/2		Yeraltı Suyu Durumu		
Sondaj Derinliği (m)	70,00		Derinlik	2,00	
Zemin Kotu (m)	0,00		Tarih	17-5-13	
Koordinatlar E.W.(X)			Saat		
Koordinatlar N.S.(Y)			Açıklama	VAR	
Proje			Sondaj Firması/Sondör		
Yeri ( İl/İlçe/Belediye )	İzmir- Karşıyaka		Makina Tipi	EGT 1500	
Yaptıran			Sondaj Metodu	Rotary	
Logu Hazırlayan			Başlama/Bitiş Tarihi	13.05 / 16.05.2013	

DERİNLİK DEPTH (m)	ÖRNEK - SAMPLE				STANDART PENETRASYON					Zemin Grup Semb. Jeolojik Kesit	ZEMİN TANIMLAMASI	KAYA ÖZELLİKLERİ						
	Tabaka Der. Muhafaza Bl.	Manevra Açı	Numune Türü	N30	SPT - GRAFİK							Doğam Su	Dayanım	Ayrışma	Çatlak Sı	ROD (%)		
					DARBE	N30											SPT - GRAFİK	
					15	30	45	N30	10	20	30	40	50					
20																		
21			SPT 10	21,00-21,45	3	4	5	9										
22			SPT 11	22,50-22,95	4	4	4	8										
23			SPT 12	24,00-24,45	4	4	5	9										
24			SPT 13	25,50-25,95	5	4	4	8										
25			SPT 14	27,00-27,45	5	6	6	12										
26			SPT 15	28,50-28,95	5	5	5	10										
27			SPT 16	30,00-30,45	4	6	7	13										
28			SPT 17	31,50-31,95	5	6	8	14										
29			SPT 18	33,00-33,45	7	6	9	15										
30			SPT 19	34,50-34,95	8	10	12	22										
31			SPT 20	36,00-36,45	9	9	8	17										
32			SPT 21	37,50-37,95	8	7	8	15										
33			SPT 21	39,00-39,45	7	7	9	16										
34																		
35																		
36																		
37																		
38																		
39																		
40																		

ZEMİN DEĞERLENDİRİLMESİ

KAYA DEĞERLENDİRİLMESİ

İNCE DANELİ (Kohezyonlu)	İRİ DANELİ (Kohezyonsuz)	PLASTİSİTE (PI)	KAYA KALİTESİ (ROD %)	ÇATLAK SIKLIĞI (M)	AYRIŞMA DERECESESİ (W)
N : 0-2 Çok Yumuşak	N : 0-4 Çok Gevşek	PI:1-6 Çok Az	0-25 Çok Zayıf	M1 < 1 Masif	W1 Taze (Ayrışmamış)
N : 2-4 Yumuşak	N : 5-10 Gevşek	PI:6-10 Az	25-50 Zayıf	M2 = 1-3 Az Çatlaklı-Kırıktı	W2 Az Ayrışmış
N : 4-8 Orta Katı	N : 11-30 Orta Sıkı	PI:10-20 Orta	50-75 Orta	M3 = 3-10 Kırıktı	W3 Orta Derecede Ayr.
N:8-15 Katı	N : 31-50 Sıkı	PI:20-40 Yüksek	75-90 İyi	M4 = 10-50 Çok Çatlaklı-Kırıktı	W4 Ayrışmış
N > 30 Sert	N > 50 Çok Sıkı		90-100 Çok İyi	M5 > 50 Parçalanmış	W5 Tamamen Ayrışmış



TEMEL SONDAJ LOGU																							
SondaJ No		SK-2/4			Yeraltı Suyu Durumu																		
SondaJ Derinliği (m)		70,00			Derinlik		2,00																
Zemin Kotu (m)		0,00			Tarih		17-5-13																
Koordinatlar E.W.(X)					Saat																		
Koordinatlar N.S.(Y)					Açıklama		VAR																
Proje					SondaJ Firması/Sondör																		
Yeri ( İl/ilçe/Belediye )		İzmir / Bayraklı			Makina Tipi		EGT 1500																
Yaptıran					SondaJ Metodu		Rotary																
Logu Hazırlayan					Başlama/Bitiş Tarihi		13.05 / 16.05.2013																
DERİNLİK DEPTH (m)	ÖRNEK - SAMPLE				STANDART PENETRASYON					Zemin Grup Semb. Jeolojik Kesit	ZEMİN TANIMLAMASI	KAYA ÖZELLİKLERİ											
	Tabaka Der.	Muhafaza B.	Manevra A.	Numane Tipi	DARBE			N <sub>30</sub>				SPT - GRAFİK		Dolgu su	Dayanım	Ayrışma	Çatlak s	RQD (%)					
	15	30	45	N <sub>30</sub>	10	20	30	40	50														
60																							
61																							
62																							
63																							
64																							
65																							
66																							
67																							
68																							
69																							
70																							
71																							
72																							
73																							
74																							
75																							
76																							
77																							
78																							
79																							
80																							
ZEMİN DEĞERLENDİRİLMESİ											KAYA DEĞERLENDİRİLMESİ												
İNCE DANELİ (Kohezyonlu)				İRİ DANELİ (Kohezyonsuz)				PLASTİSİTE (PI)				KAYA KALİTESİ (RQD %)				ÇATLAK SIKLIĞI (M)				AYRIŞMA DERECESESİ (W)			
N : 0-2 Çok Yumuşak				N : 0-4 Çok Gevşek				PI:1-6 Çok Az				0-25 Çok Zayıf				M1 < 1 Masif				W1 Taze (Ayrışmamış)			
N : 2-4 Yumuşak				N : 5-10 Gevşek				PI:6-10 Az				25-50 Zayıf				M2 = 1-3 Az Çatlaklı-Kırıklı				W2 Az Ayrışmış			
N : 4-8 Orta Katı				N : 11-30 Orta Sıkı				PI:10-20 Orta				50-75 Orta				M3 = 3-10 Kırıklı				W3 Orta Derecede Ayr.			
N:8-15 Katı				N : 31-50 Sıkı				PI:20-40 Yüksek				75-90 İyİ				M4 = 10-50 Çok Çatlaklı-Kırıklı				W4 Ayrışmış			
N > 30 Sert				N > 50 Çok Sıkı								90-100 Çok İyİ				M5 > 50 Parçalanmış				W5 Tamamen Ayrışmış			









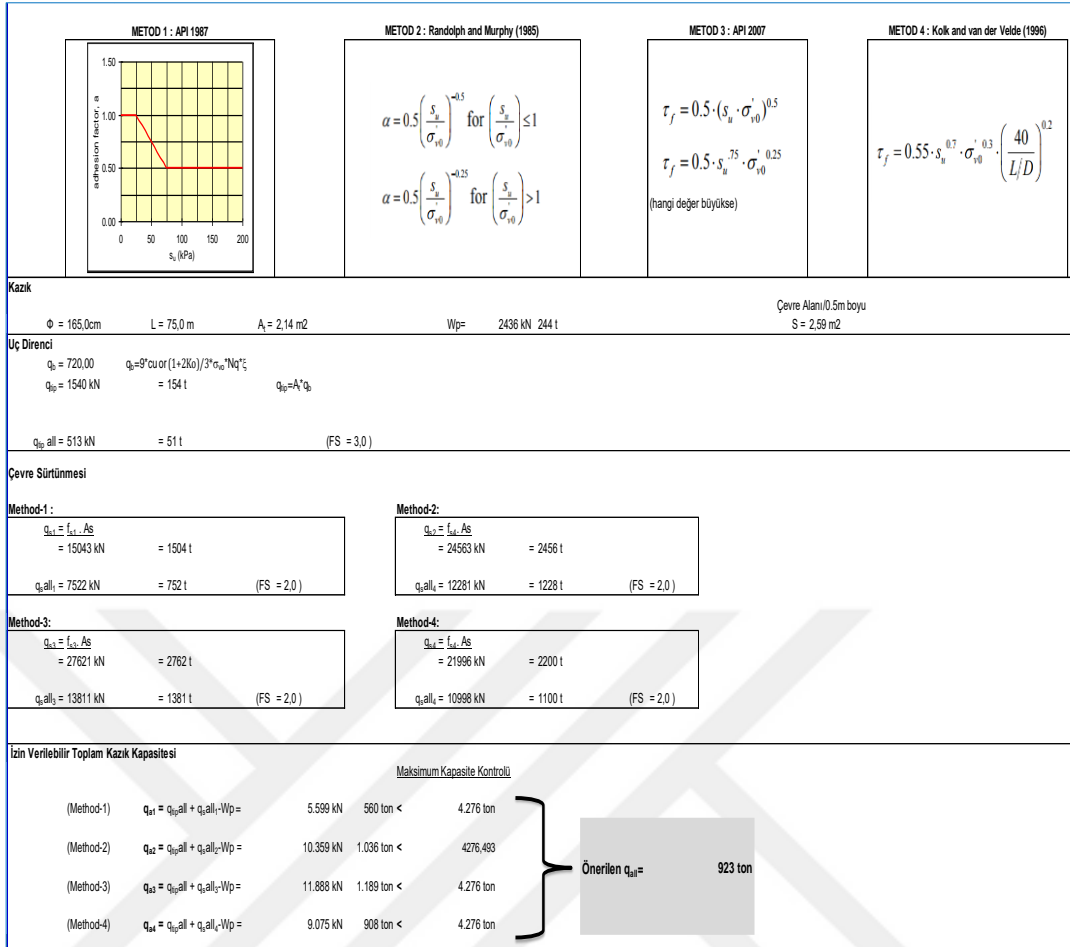




TEMEL SONDAJ LOGU

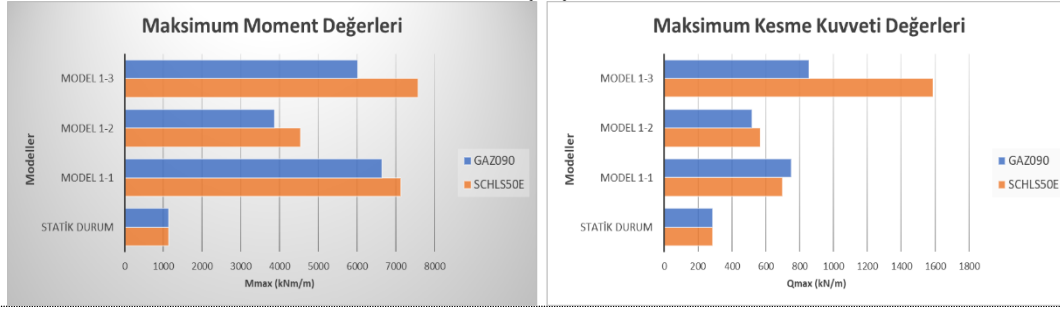
Sondaj No		SK-7						Yeraltı Suyu Durumu								
Sondaj Derinliği (m)		20,00						Derinlik		2,00						
Zemin Kotu (m)		0,00						Tarih		19-5-13						
Koordinatlar E.W.(X)								Saat								
Koordinatlar N.S.(Y)								Açıklama		VAR						
Proje								Sondaj Firması/Sondör								
Yeri ( İl/ilçe/Belediye )		İzmir- Karşıyaka						Makina Tipi		D 500						
Yaptıran								Sondaj Metodu		Rotary						
Logu Hazırlayan								Başlama/Bitiş Tarihi		19.05 / 19.05.2013						
DERİNLİK	ÖRNEK - SAMPLE	STANDART PENETRASYON					Zemin Grup Sembolu	Jeolojik Kesit (Profil)	KAYA ÖZELLİKLERİ							
DEPTH		DARBE			N30	SPT - GRAFIK			ZEMİN TANIMLAMASI							
(m)	Teşhah Derinliği (m) Mühafaza Borusu Manevra Aralığı (m) Numune Tudu ve Nozu	15	30	45	N <sub>30</sub>	10	20	30	40	50	Dolgu suyu kayma %	Dayanımı (q), (t/s)	Ayrışma (W)	Çatlak sıklığı (M)	RQD (%)	
1																
2																
3	SPT1 3,00-3,45	1	1	1	2											
4																
5	SPT2 4,50-4,95	1	2	1	3											
6																
7	SPT3 6,00-6,45	1	2	2	4											
8																
9	SPT4 7,50-7,95	5	7	9	16											
10																
11	SPT5 9,00-9,45	9	11	10	21											
12																
13	SPT6 10,50-10,95	6	9	10	19											
14																
15	SPT7 12,00-12,45	8	9	9	18											
16																
17	SPT8 13,50-13,95	10	8	10	18											
18																
19	SPT9 15,00-15,45	7	9	8	17											
20																
21	SPT9 16,50-16,95	8	10	11	21											
22																
23	SPT10 18,00-18,45	6	8	7	15											
24																
25	SPT11 19,50-19,95	4	5	5	10											



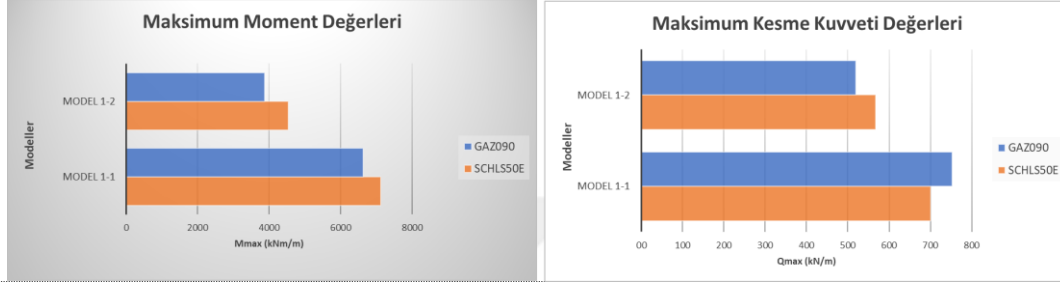


## EK C: Kazık Kuvvetleri ve İvme Karşılaştırma Görselleri

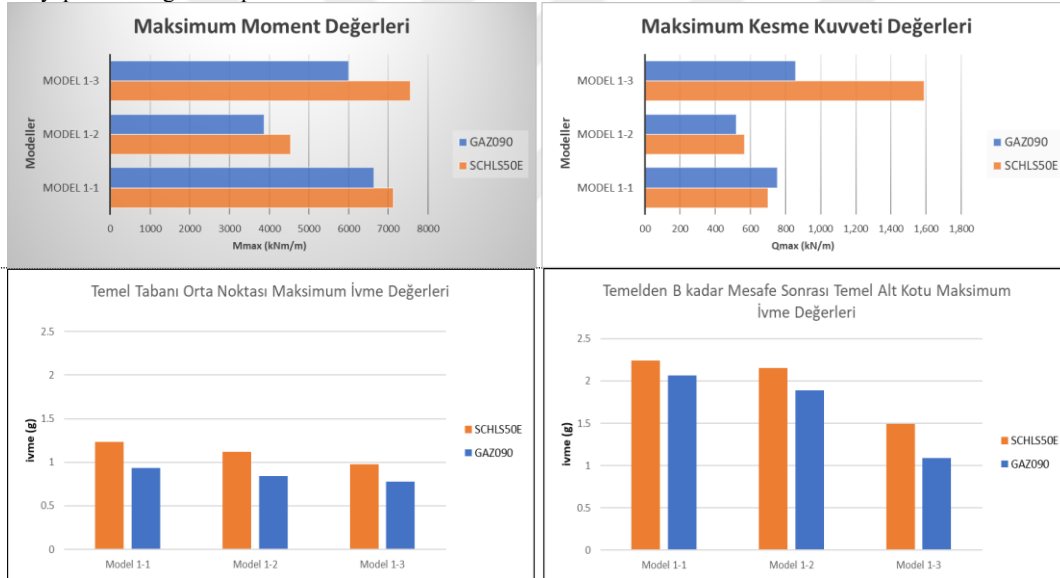
Statik ve dinamik durumdaki kazık kuvvetlerinin karşılaştırılması



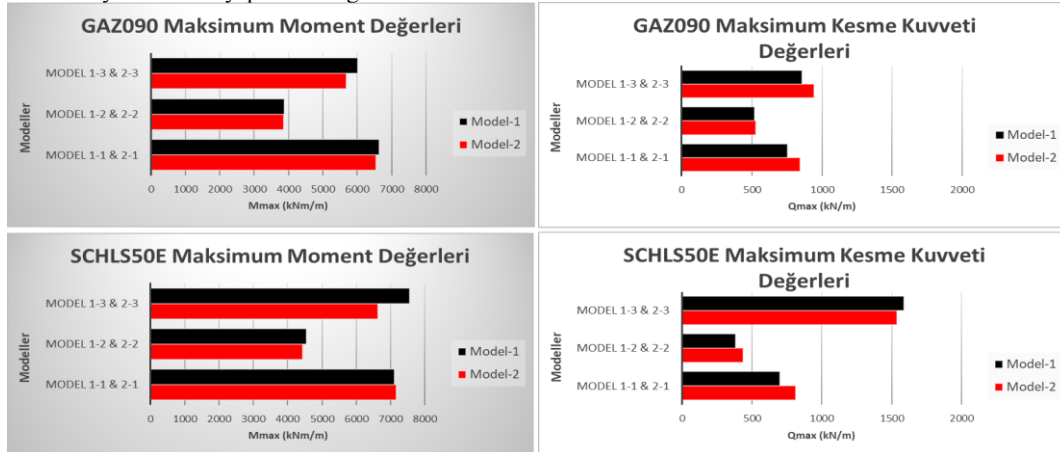
Bina yükünün göz öne alınmasının kinematik etkileşimde kazık kuvvetlerine etkisi



Üst yapının varlığının deprem hareketine ve kazık kuvvetlerine etkisi:



İkinci bir yüksek katlı yapının varlığının kazık kuvvetlerine etkisi :



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Deniz Kurt  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20.04.1989 Amasya  
**E-posta** : denizkurtx@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014-İTÜ İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

### MESLEKİ DENEYİM / ÖNEMLİ PROJELER :

#### **Mersin Metro Projesi Hat-1 (Serbest Bolge-Cumhuriyet İstasyonları)**

- 2018, Mersin/Türkiye
- 19 Km'lik hattın Geoteknik Değerlendirme ve Parametre Seçim Raporunun Hazırlanması

#### **Taypark Yüksek Katlı Residans ve Ofis Binası**

- 2017-2018, İzmir/Türkiye
- Deepsoİl yazılımı ile Site Response Analizi ve Tasarım spektrumunun tespiti,
- Deprem Hareketlerinin seçimi ve ölçeklenmesi

#### **Adana Hunutlu Kömür Santrali Projesi**

- 2017-2018, Adana/Türkiye
- Saha araştırmalarının planlanması,
- Geoteknik değerlendirme raporunun hazırlanması dolgu tasarımı
- Zeminlerin korozif etkilerinin değerlendirmesi

#### **Ismep Sismik Tehlikeye Karşı 45 Okulun Yeniden İnşaaşı Projesi**

- 2017-2018, İstanbul/Türkiye
- Saha araştırmalarının planlanması, Zemin etüd raporunun hazırlanması,
- Derin kazık iksa sisteminin Tasarlanması

### **Gebze-Orhangazi -Izmir Otoyolu**

- 2017-2018, Bursa/ Türkiye
- Heyelan tehlikesi Değerlendirmesi
- Çelik Tel Ağ Projesi
- İnkö Değerlendirmesi ve Şev Stabilite Analizleri
- Zemin Çivili Duvar ve Taş Duvar Tasarımı

### **Arçelik Tuzla Fabrikası Mevcut Bina Temel Altının İyileştirilmesi Projesi.**

- 2017, İstanbul/Türkiye
- Sızdırma Enjeksiyonu ile zemin iyileştirme proje ve raporunun hazırlanması

### **Soma Çimento Fabrikası**

- 2017, Manisa/Türkiye
- Çimento Fabrikası yapılarının temel altı zemin iyileştirme projelerinin hazırlanması

### **THSK Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu Kampüsü Projesi**

- 2017, Ankara/Türkiye
- Kampüs içerisinde 16 binanın geoteknik değerlendirilmesi

### **Nador West Med Liman Projesi**

- 2016, Nador/Fas
- Taşıma Kapasitesi, Oturma Hesapları , Sıvılaşma Tehlikesi Analizi

### **Bursa Ali Sönmez Hastanesi**

- 2016, Bursa/Türkiye
- Ankrajlı Derin Kazı İksa Tasarımı

### **Awash-Weldia Demiryolu Projesi ( Saha Mühendisi)**

- 2015-2016, Kombolcha/Etiyopya
- Köprü Forekazık İmalatları ,Kazık deneylerinin yapılması
- Köprü Kenar-Ayak , Orta Ayak Betonarme İmalatları
- Köprü Çelik montaj ve Kaldırma işleri
- Mimari, Yapısal,Mekanik, Elektrik ve Çelik işlerin koordinasyonunun sağlanması
- Lojistik-Satınalma koordinasyonu
- Metraj Çıkarılması
- İş programı- adamsaat analizlerinin yapılması , günlük, haftalık ve aylık ilerleme raporlarının düzenlenmesi
- Saha iş sağlığı ve Güvenliği Tedbirlerinin alınması

### **Awash-Weldia Demiryolu Projesi (Teknik Ofis Mühendisi)**

- 2013-2015, İstanbul/Türkiye
- Metraj hesaplamaları (Menfez,İstinat Duvarı,Köprü ayakları, Bina mimarı, yapısal ve elektromekanik metrajları vb.)
- Taşeron teklif şartnamelerinin,Teklif karşılaştırma tablolarının hazırlanması, Taşeron Sözleşmelerinin Hazırlanması ve Sözleşme Takibi
- Teknik Satınalma yapılması ve Sevkiyat Programlarının hazırlanması
- İş programı hazırlanması

- Birim-Fiyat / Birim- Adamsaat analizlerinin yapılması
- Kamp mobilizasyonunun planlanması(Şantiye yerleşim planları, kamp lokasyonları,kamp ulaşım yolları, kamp binaları,alt yapı,tefrişat) ve mobilizasyon bütçesinin hazırlanması

**BİLGİSAYAR :**

- Plaxis 2D : İyi Kullanıcı
- Plaxis 3D : İyi Kullanıcı
- Midas GTS NX 3D : Standart Kullanıcı
- AutoCad : İyi Kullanıcı
- Talren V5 : İyi Kullanıcı
- Deep Soil : İyi Kullanıcı
- D-Foundation : İyi Kullanıcı
- GGU- Footing : İyi Kullanıcı
- Excel : Profesyonel Kullanıcı

